



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

VLIV ABS NA CHOVÁNÍ VOZIDLA

ABS IMPACT TO BEHAVIOR OF VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB ZICH

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF STRNADEL, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



Student: **Zich Jakub**
Program: Informační technologie
Název: **Vliv ABS na chování vozidla**
ABS Impact to Behavior of Vehicle
Kategorie: Modelování a simulace

Zadání:

1. Zdokumentujte základní pojmy a principy související s činností Anti-lock Breaking Systémů (ABS) v automobilech a proved'te rešerši v oblasti prostředků modelování systémů a analýzu jejich vlastností.
2. Navrhněte vhodnou abstrakci automobilu, jeho okolí a komponent klíčových z pohledu ABS a zvolte prostředky vhodné pro modelování a analýzu řízení a chování vozidla.
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 zhodno'te 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, 2 zadání, vytvoření modelu chování vozidla bez ABS.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Strnadel Josef, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1. listopadu 2019
Datum odevzdání: 28. května 2020
Datum schválení: 25. října 2019

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá systémem ABS (Anti-lock braking system) a jeho vlivem na délku brzdné dráhy vozidla. Práce obsahuje řešení k tomuto problému, přehled vhodných modelovacích prostředků, návrh řešení, jeho implementaci v modelovacím nástroji UPPAAL a testy prováděné s modelem. Testy zkoumají průběh vývoje základních veličin spojených s brzděním (rychlost, brzdná dráha, skluz, úhlová rychlost, koeficient tření) v simulacích nouzového brzdění s použitím systému ABS a bez něj, a výsledky porovnávají. Taktéž ověřují pravděpodobnost, že vozidlo zastaví v různých podmínkách za danou vzdálenost. V neposlední řadě umí model simulovat poruchu brzd či brzdových čidel a výsledky těchto simulací je možné porovnávat se simulacemi bez poruchy.

Abstract

The bachelor thesis discusses the Anti-lock braking system and its impact on braking distance of a vehicle. The thesis contains research of this problem, a summary of suitable modeling tools, solution draft, its implementation in the UPPAAL modeling tool and tests performed with the model. The tests examine the course of progression of basic quantities associated with braking (velocity, braking distance, slip, angular velocity, friction coefficient) in simulations of emergency braking with and without the use of ABS, and compare the results. They also verify probability of the vehicle stopping in different circumstances on given distance. Lastly, the model can simulate brake or sensor defect, and results of those simulations can be compared to simulations without defect.

Klíčová slova

ABS, brzdová soustava, brzdná síla, brzdná dráha, rychlost, simulace, modelování, časované automaty, verifikace, ověřování modelů

Keywords

ABS, braking system, braking force, braking distance, speed, simulation, modeling, timed automata, verification, model checking

Citace

ZICH, Jakub. *Vliv ABS na chování vozidla*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Josef Strnadel, Ph.D.

Vliv ABS na chování vozidla

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Josefa Strnadela, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Jakub Zich
27. května 2020

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu, panu Ing. Josefu Strnadelovi, Ph.D. za jeho vedení a poskytování cenných rad v průběhu řešení práce. Poděkování si také zaslouží moje rodina a přítelkyně za veškerou jejich podporu.

Obsah

1	Úvod	3
2	Rešerše k řešení problému	4
2.1	Brzdy	4
2.1.1	Bubnové brzdy	4
2.1.2	Kotoučové brzdy	4
2.2	Součásti kotoučových brzd	5
2.2.1	Brzdové kotouče	5
2.2.2	Brzdové destičky	6
2.2.3	Písty	8
2.2.4	Brzdová kapalina	9
2.3	ABS	9
2.3.1	Historie ABS	9
2.3.2	Princip ABS	10
2.3.3	Komponenty ABS	11
2.3.4	Fyzikální zákonitosti spojené s brzděním a činností ABS	13
	Požadavky na systém ABS	16
3	Základy modelování a simulace	17
3.1	Základní pojmy v modelování	17
3.2	Princip modelování a simulace	18
3.3	Modelovací prostředky	19
3.3.1	MATLAB	19
3.3.2	SIMLIB	20
3.3.3	UPPAAL	20
4	Zvolené realizační prostředky a návrh řešení	21
4.1	Modelovací nástroj UPPAAL	21
4.1.1	Nástroje rodiny UPPAAL	22
4.1.2	Důležité pojmy	22
4.2	Návrh řešení	24
5	Implementace modelu	26
	Popis programu	26
5.1	Model řidiče	29
5.2	Model překážky	31
5.3	Model systému ABS	31
5.4	Model kola	32

5.5	Model řídicí jednotky	33
5.6	Model čidla	33
6	Simulace a výsledky	35
6.1	Test č. 1 - simulace průběhu nejdůležitějších veličin v případech s použitím ABS i bez něj	35
6.2	Test č. 2 - pravděpodobnost zastavení na určité vzdálenosti ze 100 km/h s použitím ABS i bez něj pro různé povrchy	37
6.3	Test č. 3 - porovnání pravděpodobnosti zastavení na určité vzdálenosti na stejném povrchu pro počáteční rychlost 100 km/h a 50 km/h	39
6.4	Test č. 4 - simulace poruchy brzd	41
6.5	Test č. 5 - simulace poruchy čidel	41
7	Závěr	44
	Literatura	45
A	Test č. 1 - ilustrace k testům na ledě	48
B	Test č. 2 - další tabulky	50
C	Test č. 4 - upravený automat Control_unit	51
D	Test č. 5 - upravený automat Sensor	52

Kapitola 1

Úvod

Téměř každá rodina má dnes alespoň jeden automobil. V automobilkách se neustále zvyšuje výroba a silnice se plní. Je tedy nutno vymýšlet a zpřísnovat silniční předpisy, jakožto i zdokonalovat jízdní a bezpečnostní parametry automobilů. Moderní automobily mají nižší emise a spotřebu, začínají využívat ekologičtější paliva a zdokonalují se jim jak jízdní, tak i bezpečnostní vlastnosti. Než je nový typ vozidla vpuštěn na trh, automobilka ho musí povinně podrobit crash-testům, aby vyhovoval daným bezpečnostním standardům. Kupující má tak možnost vybrat si automobil s technickými vlastnostmi, které nejvíce vyhovují jeho požadavkům. Uvádí se rozměry automobilu, typ motoru a převodovky, výkon a točivý moment, maximální rychlost, doba zrychlení 0-100 km/h, průměrná spotřeba na 100 km, případně i základní výbava. Brzdné a bezpečnostní vlastnosti se většinou neuvádějí, i když jsou velice důležité.

Bezpečnostní vlastnosti automobilů se dělí na pasivní (když nastane nehoda, řidič i spolujezdci musí utrpět co nejmenší zranění) a aktivní (pomocné systémy vozidla, které zlepšují jeho jízdní vlastnosti v krizových situacích a pomáhají předcházet nehodám). Mezi systémy napomáhající s aktivní bezpečností patří např.: ESP, ASR, brzdny asistent, nebo systém ABS, kterým se bude zabývat tato práce.

ABS, neboli Anti-lock braking system byl vyvinut ve druhé polovině 20. století. Při nouzovém brzdění předchází zablokování kol, a tím umožňuje automobil ovládat až do úplného zastavení. Tato práce vysvětlí princip fungování ABS v rámci brzdny soustavy (kapitola 2), popíše základní pojmy související s modelováním a princip modelování a simulace a pohovoří o současných prostředcích pro modelování a simulaci (kapitola 3), vysvětlí návrh řešení v integrovaném prostředí pro modelování UPPAAL (kapitola 4), implementaci návrhu (kapitola 5) a následně popíše samotné simulace provedené programem a jejich výsledky, tedy jaký vliv má systém ABS na brzdnou dráhu vozidla atd. (kapitola 6).

Kapitola 2

Rešerše k řešení problému

Tato kapitola se bude zabývat popisem brzdného systému automobilu, potažmo jinými částmi, které s daným problémem souvisí. Jednotlivé části včetně ABS budou popsány a bude vysvětlen princip jejich funkčnosti a s tím související fyzikální zákonitosti. Dále kapitola vysvětlí pojem brzdná dráha.

2.1 Brzdy

V kabině automobilu se nachází brzdový pedál. Jeho sešlápnutím je stlačena brzdová kapalina v hydraulickém brzdovém obvodu [6], která působí tlakem na brzdový píst. Píst, k němuž jsou připevněné brzdové destičky, je přimontován k brzdovému třmenu. Třmen je pevně připevněn k nápravě vozidla. K nápravě je taktéž připojen kotouč (rotor) u kotoučových brzd 2.1.2, či buben u bubnových brzd 2.1.1. Ten se otáčí společně s kolem.

Při vyvolání tlaku brzdovou kapalinou na píst jsou brzdové destičky přitlačeny k bubnu nebo kotouči, a vyvolávají tak třecí sílu, která zpomaluje automobil tak, že přeměňuje jeho kinetickou energii na tepelnou energii [7], dokud automobil nezastaví.

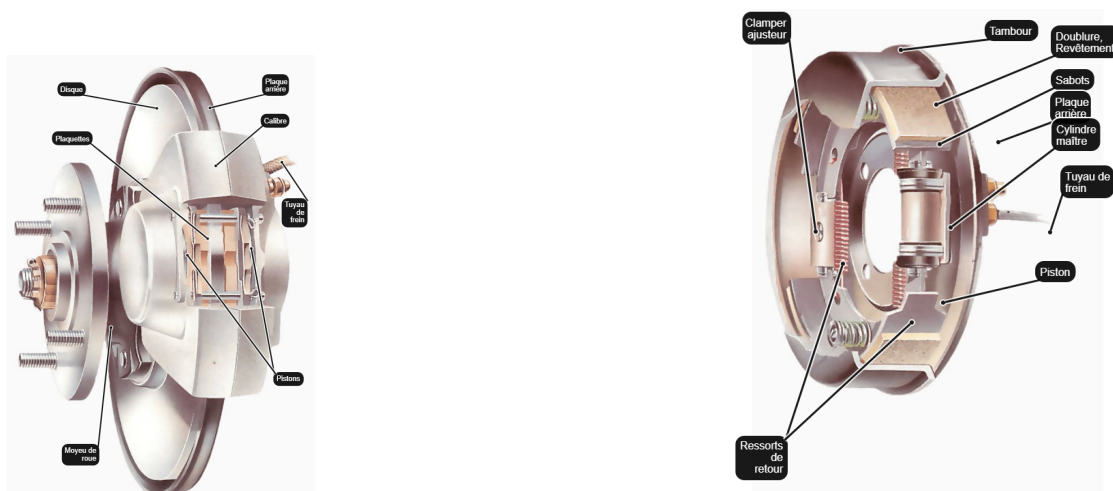
2.1.1 Bubnové brzdy

Ke kolu je zevnitř připojen tzv. buben. Uvnitř bubnu se nachází brzdové čelisti s brzdovými destičkami. Mezi čelistmi se nachází píst, který se pomocí hydraulického tlaku vyvolaného sešlápnutím brzdového pedálu roztahuje, a tím pádem tlačí destičkami zevnitř na buben a vyvolává tak třecí sílu [13]. Bubnové brzdy jsou předchůdcem brzd kotoučových a v dnešní době jsou spíše na ústupu. Používají se už pouze v zadní nápravě levnějších automobilů pro snížení ceny.

2.1.2 Kotoučové brzdy

Zevnitř kola je připevněn kotouč (rotor), který se společně s kolem otáčí. Nachází se tam taktéž brzdový třmen, který je k automobilu pevně namontován a neotáčí se. Uvnitř třmenu se nachází jeden nebo více pístů, a z každé strany kotouče jedna nebo více brzdových destiček. Hydraulický tlak vyvolaný brzdovým pedálem působí zevnitř na písty, a díky tomu jsou z obou stran ke kotouči přitlačeny brzdové destičky. Vzniká třecí síla, která přemění kinetickou energii na tepelnou.

První kotoučové brzdy byly s pevným třmenem, kdy byl na každé straně kotouče jeden píst, ale novější modely mají tzv. pohyblivý třmen, kdy je píst pouze na jedné straně, na druhé je pouze brzdová destička připevněná přímo ke třmeni, a kotouč je na ni pístem z druhé strany přitlačen. Kotoučové brzdy se dnes používají v drtivé většině případů. Jsou přesnější, výkonnější, spolehlivější a jednodušší z konstrukčního hlediska. Taktéž je snadnější výměna opotřebovaných součástí [6].



Obrázek 2.1: Kotoučová (vlevo) a bubnová (vpravo) brzda.¹

2.2 Součásti kotoučových brzd

2.2.1 Brzdové kotouče

Existuje několik druhů brzdových kotoučů. Nejběžnější jsou vrtané (drilled), drážkované (slotted) a ventilované (vented). Požadovanými vlastnostmi jsou: dobrá možnost chlazení a pevnost kotouče. Každý druh kotouče má své výhody a nevýhody.

Vrtané

Rotor je provrtaný skrz naskrz. Vzniklé otvory odvádějí jak vzduch a teplo, tak i vodní páru a případně i úlomky brzdových destiček. Výhodou je relativně dobré chlazení. Nevýhoda spočívá v tom, že provrtáním kotouče se snižuje jeho třecí plocha a tím pádem se snižuje účinek brzdění. Také se může stát, když se kotouč moc zahřeje, že kvůli rozdílu teplot děr a samotného kotouče může vzniknout prasklina a kotouč je znehodnocen. Kvůli svým nevýhodám zaostávají za ostatními typy kotoučů. Přesto se objevují na některých silničních vozech kvůli svému esteticky příjemnému vzhledu. V závodních automobilech se však nepoužívají.

¹<https://www.unevoiture.com/rudiments/le-fonctionnement-du-systeme-de-frein>

Drážkované

Na vnější straně kotouče jsou udělané drážky. Ty odvádí teplo velice účinně a zároveň zde nevzniká problém s rozdíly teplot jako u vrtaných kotoučů. Také svou rotací napomáhají k očišťování brzdových destiček od nečistot. Zároveň ale způsobují větší opotřebení destiček než ostatní typy rotorů. Používají se v závodních automobilech.

Ventilované

Tyto kotouče jsou často používány v přední nápravě automobilů. Jedná se o dva spojené kotouče, mezi nimiž jsou ventilační otvory pro lepší chlazení. Někdy jsou ventily zahnuté, takže rotací vzniká jakási pomyslná pumpa, která odvádí vzduch ze středu ven, a tím kotouče ochlazuje. Jejich výhodou je delší životnost, díky účinnému odvádění tepla. Používají se v závodních i obyčejných silničních automobilech [13].

Kotouče - shrnutí

V praxi se dají používat i kombinace těchto tří druhů, například ventilované kotouče, které mají zároveň drážky, aby byla jejich účinnost co nejvyšší. Vrtané kotouče jsou v dnešní době spíše jen na okrasu. Aby bylo brzdění ještě efektivnější, dají se použít větší kotouče, musí to však dovolit velikost kol automobilu. Také můžeme zajistit lepší přívod vzduchu a tím lepší ochlazování.



Obrázek 2.2: Vrtaný (vlevo), drážkový (uprostřed) a ventilovaný (vpravo) brzdový kotouč. ²

2.2.2 Brzdové destičky

Brzdové destičky jsou během brzdění pístem přitlačeny k rotoru a jejich úkolem je, aby při styku s kotoučem působily co největší třecí silou a automobil tak zastavil co nejrychleji. Jak se technologie zdokonaluje, jsou dokonalejší i materiály, z nichž se destičky vyrábí. Mohou být polokovové (semi-metallic), organické (organic), nebo keramické (ceramic).

²Vrtaný - <https://store.vacmotorsports.com/brembo-cross-drilled-rotor-kit-for-mini-p204.aspx>

Drážkový - <https://www.summitracing.com/parts/ssb-23056aa2r/>

Ventilovaný - <https://www.carid.com/2017-chrysler-300-brake-parts/raybestos-r-line-brake-rotor-516361547.html>

Polokovové

Tento typ destiček používá dnes většina automobilů. Skládají se z hoblin mědi, oceli a grafitu spojených pryskyřicí. Jsou vhodné především pro vozidla určená pro každodenní ježdění. Používají je i těžká nákladní auta, která potřebují vysokou brzdou sílu.

Mezi jejich výhody patří poměrně malá cena, a fakt, že dobře brzdí. Také jsou pevné, takže se opotřebovávají pomalu. Na druhou stranu jsou ale těžší než jiné druhy destiček, takže mohou malou měrou přispívat k vyšší spotřebě vozidla. Tím, že jsou velice tvrdé, také opotřebovávají ostatní komponenty, o které při brzdění třeou. Při opotřebení mohou také vydávat nelibé zvuky.

Tyto brzdové destičky nejlépe fungují, pokud jsou zahřáté. To má za následek, že v chladnějších přírodních podmínkách může auto reagovat na sešlápnutí brzdového pedálu s menší odezvou, jelikož se destička musí nejprve zahřát na určitou teplotu.

Dají se kombinovat s keramickými komponenty, takže získávají jejich výhody, ale mají nižší cenu, než keramické destičky.

Organické

Organické brzdové destičky se skládají z nekovových materiálů jako je guma, sklo, nebo kevlar. Stejně jako polokovové destičky jsou ale spojené pryskyřicí. Oproti nim jsou ale měkčí. Nejlépe se chovají v podmínkách s vysokou teplotou, neboť teplo lépe spojí částičky k sobě. Dříve obsahovaly také částičky azbestu, ale zjistilo se, že při jejich odírání vznikal azbestový prach, který je po vdechnutí velice nebezpečný, takže se dnes již azbest nepoužívá.

Tyto destičky jsou při brzdění narozdíl od polokovových velice tiché i po opotřebení. Také jsou relativně ekologické, protože z nich odřené částičky neublíží životnímu prostředí. Nejsou ale velmi odolné a částičky se z nich odírají rychleji. Proto se využívají hlavně u lehčích automobilů a v mírných podmínkách na silnici, kdy je není nutné příliš zatěžovat. Pro závodní automobily jsou tedy nevhodné.

Keramické

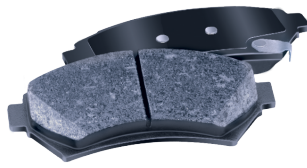
Keramické destičky se skládají hlavně z keramických vláken, ale mohou obsahovat také vlákna měděná. Pracují velice dobře u závodních automobilů a vozidel s velkým výkonem, která při brzdění generují velké množství tepla.

Jsou velmi odolné a opotřebení je pomalé. Mají malou hmotnost a neodírá se z nich tolik částiček, jako u předešlých typů. Také velice rychle odvádějí teplo, takže jsou vhodné i na časté a prudké brzdění. Jsou ale velice drahé, tudíž se v běžných automobilech neobjevují [2].

Ukázku brzdových destiček můžeme vidět na obrázku 2.3. Ve středu destičky se nachází malá drážka. Ta napomáhá k odvádění odřených částiček. Když se destička zahřeje, může se tedy roztáhnout bez poškození.

Pro větší efektivitu může být použita větší destička. Ta má více materiálu, takže se pomaleji opotřebovuje, a zároveň se lépe chladí, takže se pomaleji zhoršují její třecí vlastnosti [15].

³<https://duragoparts.com/products/brake-pad-and-shoes/>



Obrázek 2.3: Brzdová destička.³

2.2.3 Písty

V kotoučových brzdách se písty nacházejí uvnitř brzdového třmenu. Každá brzda může využívat jeden nebo více pístů. Podle toho, zda jsou písty z obou stran kotouče, nebo jen z jedné, se brzdy rozdělují na brzdy s pevným třmenem a brzdy s pohyblivým třmenem (obrázek 2.4). Zlepšit brzdné účinky můžeme následujícími způsoby:

Zvýšení počtu pístů

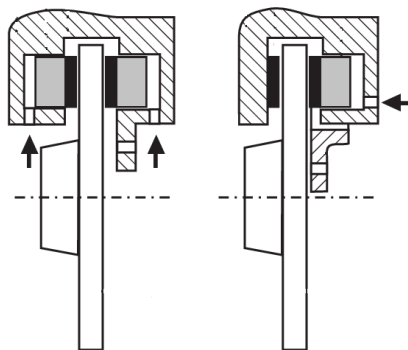
Více pístů umožňuje lépe rozložit tlakovou sílu, kterou působí na kotouč. V této variantě se také dají používat větší brzdové destičky, takže se zvětší i třecí plocha.

Větší písty

Větší píst může působit na větší plochu. Podle vzorce $F = p * S$ ($F[N]$ - tlaková síla, $p[Pa]$ - tlak, $S[m^2]$ - plocha) víme, že velikost tlakové síly se rovná součinu tlaku a plochy, na kterou působí. Pokud zvětšíme plochu, ale tlak zůstane stejný, zvětší se i tlaková síla a brzdění bude efektivnější.

Více pístů v řadě

Na každou brzdovou destičku tlačí několik pístů seřazených za sebou, kdy každý další je o něco větší než předchozí. Důvodem jejich rozdílné velikosti je skutečnost, že při postupném zahřívání rotoru na něj musí být aplikována stále větší tlaková síla pro stejný brzdný účinek [13].



Obrázek 2.4: Brzdy s pevným (vlevo) a pohyblivým (vpravo) třmenem.⁴

⁴https://www.researchgate.net/figure/Fixed-and-pin-slide-caliper-brake_fig3_229048752

2.2.4 Brzdová kapalina

Brzdová kapalina se nachází v hydraulickém brzdovém obvodu a slouží k přenosu síly mezi sešlápnutým pedálem a brzdovými písty. Je požadováno, aby byla chemicky neutrální a nepůsobila korozivně na kovové součásti brzdového systému, ani nijak agresivně na gumové těsnění. Používají se tedy kapaliny na bázi alkoholových sloučenin, jako je glykol, nebo glykoléterové směsi se speciálními přísadami.

Brzdové kapaliny mají životnost 2 až 4 roky, neboť uvedené sloučeniny pohlcují vzdušnou vlhkost, čímž se kapalině snižuje bod varu z asi 260 °C na 160 °C, a také se zhoršují požadované vlastnosti a dochází ke snížení brzdného účinku.

2.3 ABS

Motivace

Při nouzovém brzdění způsobí brzdná soustava zablokování kol vozidla. Zablokování znamená, že se kola přestanou úplně otáčet. V této situaci pneumatiky drhnou o asfalt, odírají se a zahřívají, a tím ztrácí brzdné vlastnosti. Sedřený materiál způsobuje nižší přilnavost a brzdná dráha je tak delší. Vozidlo se také v této situaci nedá ovládat, jelikož se kola neotáčejí, a klouže pořád stejným směrem, jako když začalo brzdit. Řidič se tak nemůže vyhnout případným překážkám.

Systém ABS (Anti-lock Braking System) tento problém řeší tak, že periodicky několikrát za sekundu sníží tlak v brzdovém pístu, a tím zabráňuje úplnému zablokování kol. To má za následek zkrácení brzdné dráhy ve většině případů, menší opotřebení pneumatik, menší zahřívání brzdového kotouče a destiček, a také to, že se vozidlo dá po celou dobu brzdění ovládat. Tím se mnohonásobně zvyšuje bezpečnost jízdy. Systém ABS patří mezi prvky aktivní bezpečnosti vozidla společně se systémy ESP nebo ASR. Dnes se používá v drtivé většině vozidel, protože je takřka nezbytný [19].

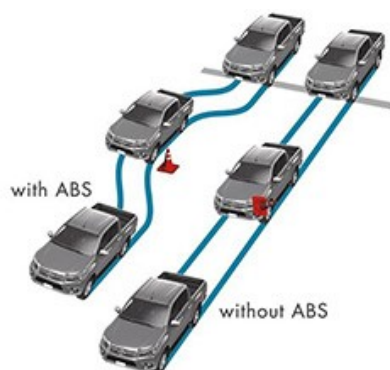
2.3.1 Historie ABS

Již od vzniku prvních automobilů se inženýři snažili zajistit co největší bezpečnost jízdy. Z počátku se nejednalo o ABS, ale pouze o účinný brzdový systém. První patentovaný brzdový systém byl vyvinut v roce 1928 Karlem Wesselem. Podobný patent vydal o osm let později i Robert Bosh. Oba koncepty zůstaly však pouze ve fázi návrhu. První pracující systém ABS byl vyvinut na počátku třicátých let pro letecký průmysl. Letadla ho používala, aby jim při brzdění nepraskly nápojem pneumatiky. Tento první systém byl u letadel používán jak za druhé světové války, tak i po ní, neboť se osvědčil. V této době však stále nebyl velmi rozšířený.

V šedesátých letech se systém ABS začal testovat i u osobních automobilů, avšak pouze v zadní nápravě. S rychle se rozvíjejícím elektronickým průmyslem bylo jen otázkou času, než se v automobilech začne běžně používat. Do širšího povědomí se systém dostal, když Chrysler přišel s modelem 1971 Imperial. Tento model jako první používal ABS u všech čtyřech kol. V osmdesátých letech byl již systém ABS rozšířen nejen v USA, ale i v Evropě a Japonsku. První automobilka, která v Evropě sériově produkovala vozidla s ABS na obou nápravách, byl Mercedes-Benz se svým modelem S. Tento model využíval systém ABS navržený firmou Bosch v roce 1978. V dnešní době je ABS součástí téměř všech osobních vozidel, neboť je důležitým prvkem aktivní bezpečnosti [8, 23].

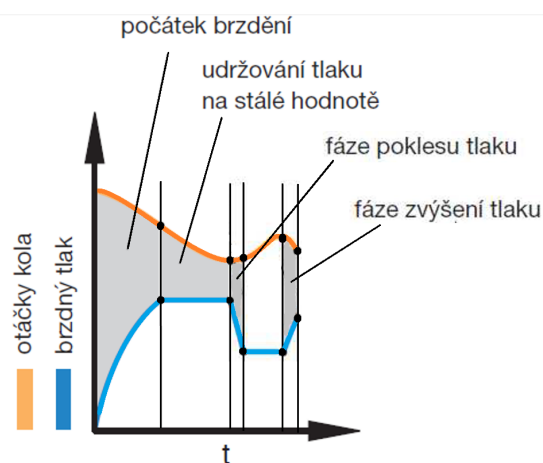
2.3.2 Princip ABS

Jak už bylo řečeno, úkolem systému ABS je zastavit vozidlo na co nejkratší vzdálenosti. Zároveň musí být po celou dobu ovladatelné, aby nad ním měl řidič kontrolu a mohl se vyhnout případným překážkám na cestě. U vozidla bez ABS dojde při nouzovém brzdění k zablokování kol, a vozidlo se tak stává neovladatelným.



Obrázek 2.5: Ukázka brzdění se systémem ABS a bez něj.⁵

Princip tohoto systému je následující: Na každém kole se nachází senzor, který snímá jeho obvodovou rychlost. Sensory zasílají informace řídicí jednotce, která ze získaných údajů spočítá obvodovou rychlost kola a následně jeho skluz na základě referenční rychlosti vozidla. Pokud je hodnota skluzu moc velká, řídicí jednotka přikáže hydraulické brzdové soustavě, aby uvolnila tlak v pístech. K uvolnění tlaku slouží regulační ventil. V této chvíli dochází k přerušení hlavního brzdového obvodu. Díky uvolnění tlaku se kola vozidla mohou roztočit rychleji, dochází tedy k jejich odblokování a vozidlo je stále ovladatelné. Po chvíli je tlak v pístech znovu zvýšen a kola začnou znovu brzdit. Tento proces se opakuje až patnáctkrát za sekundu [19]. Na obrázku 2.8 můžeme vidět schéma systému ABS.



Obrázek 2.6: Vývoj otáček kola a brzdny tlaku v jednotlivých fázích brzdění.⁶

⁵<http://www.toyotamalawi.com/anti-lock-brake-system-abs/>

⁶Převzato z: [22]

2.3.3 Komponenty ABS

Řídicí jednotka

Hydraulická řídicí jednotka (HCU - hydraulic control unit) zodpovídá činnost systému ABS. Spolupracuje s řídicím modulem ABS (ABS control module). Na základě dat, která snímají senzory, zasílá řídicí modul příkazy, a HCU na ně reaguje regulací tlaku v pístech jednotlivých kol, aby nedošlo k jejich zablokování. Snižování tlaku v jednotlivých pístech je prováděno pomocí elektromagnetických ventilů. Brzdná soustava každého kola má vstupní a výstupní ventily [8].

Rychlostní senzory

Tyto senzory se nacházejí na kolech vozidla. Snímají jeho obvodovou rychlost a směr otáčení, a data zasílají řídicímu modulu ABS. Rychlost je snímána pomocí magnetického pole. Senzory se tak kola přímo nedotýkají. Automobily mohou mít různý počet senzorů:

Čtyři senzory

Každé kolo má svůj senzor a všechna jsou tedy ovládána nezávisle na sobě. Bezpečnost a přijatelná délka brzdné dráhy jsou zajištěny na všech typech vozovek. Musí být také zajištěna rovnováha při brzdění (většina automobilů nemá rovnoměrně rozloženou hmotnost kvůli umístění motoru).

Tři senzory

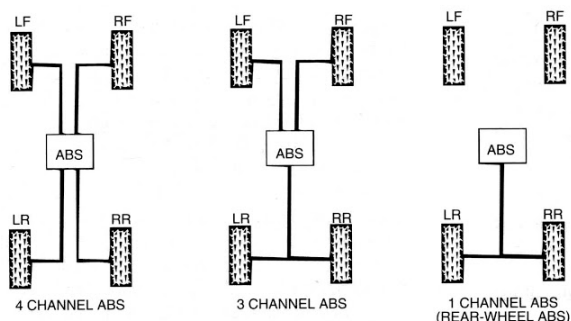
Vozidla s tímto typem ABS mají pouze jeden senzor pro obě zadní kola. Přední kola mají každé vlastní senzor. Tento typ se používá u automobilů s paralelními brzdovými okruhy.

Dva senzory

Senzory se nacházejí pouze na zadních kolech. Každé má však svůj vlastní senzor. Tento typ ABS se používá u nákladních vozidel a kamionů.

Jeden senzor

Jeden senzor mají např. vozy SUV nebo pickupy. Senzor se nachází na zadní nápravě vozidla [8].



Obrázek 2.7: Schéma různých typů umístění a zapojení senzorů.⁷

Zpomalovací senzor

Nachází se v nákladním nebo motorovém prostoru vozidla a nejčastěji ho používají automobily s pohonem na všechna čtyři kola. Zpomalovací senzor měří velikost zpomalení vozidla a data zasílá stejně jako ostatní čidla řídicímu modulu ABS. Ten ze získaných informací zjistí, o jaký povrch vozovky se jedná, a podle toho může provést příslušná kontrolní opatření [8].

Elektromagnetické ventily

Tyto ventily jsou součástí hydraulického brzdového obvodu. Ovládá je HCU a slouží pro regulaci tlaku v brzdových pístech jednotlivých kol. Ventily se mohou nacházet ve třech různých polohách:

Otevřený ventil

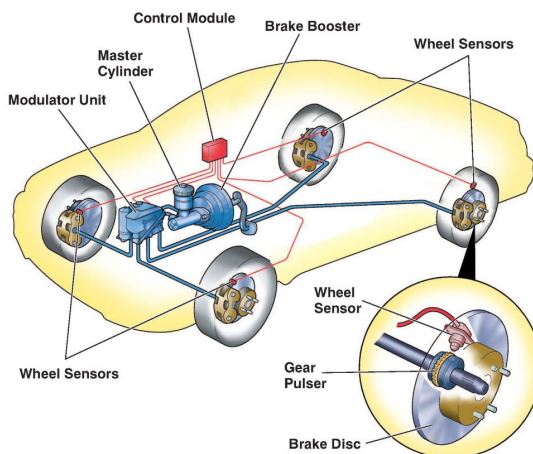
V této pozici je v pístech největší tlak a kola tak brzdí plnou silou. Ventil může zůstat otevřený, pokud je hodnota skluzu kola menší než daná hranice.

Uzavřený ventil

Když je ventil uzavřený, je přerušena hydraulický brzdový obvod a není tedy přenášena žádná tlaková síla, i když řidič sešlape brzdový pedál plnou silou. Ventil je uzavřen, pokud hodnota skluzu přesáhla optimální hranici a začínají se tak zhoršovat brzdné účinky.

Napůl otevřený ventil

Třetí pozice ventilu udržuje v brzdových pístech konstantní tlak. Automobil tak stále brzdí, ale ne maximální brzdou silou. V této pozici ventil zůstane, pokud je hodnota skluzu kola blízko ideální hranici. Tlak v pístech není potřeba snížit, ani zvýšit. V této chvíli je brzdný účinek optimální [8, 15].



Obrázek 2.8: Schéma systému ABS.⁸

⁷<http://janzttec4848.blogspot.com/2012/06/abs-system.html>

⁸<https://worldtechpedia.com/abs-anti-lock-braking-system/>

2.3.4 Fyzikální zákonitosti spojené s brzděním a činností ABS

Tato kapitola bude popisovat činnost ABS, potažmo celé brzdné soustavy, z fyzikálního pohledu. Délka brzdné dráhy závisí na velikosti třecí síly mezi brzdovými kotouči a destičkami, odporu vzduchu, ale i na povrchu vozovky.

Brzdná dráha

Naším hlavním cílem bude spočítat délku brzdné dráhy automobilu. Jedná se o rovnoměrně zpomalený pohyb. Použijeme tedy základní rovnici pro rovnoměrně zrychlený pohyb [32]:

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

$v[m/s]$ - výsledná rychlost (chceme, aby automobil úplně zastavil, bude tedy nulová)

$v_0[m/s]$ - počáteční rychlost v momentě, kdy vozidlo začalo brzdit

$a[m/s^2]$ - zrychlení (při brzdění má zápornou hodnotu)

$t[s]$ - čas

Z této rovnice si vyjádříme čas t . Víme, že výsledná rychlost bude nulová, vzorec bude tedy vypadat následovně:

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

Tímto vzorcem následovně vyjádříme čas v rovnici pro dráhu:

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

$s[m]$ - dráha

Vznikne nám tedy požadovaná rovnice pro výpočet brzdné dráhy pro pohyb rovnoměrně zpomalený s počáteční rychlostí v_0 a zrychlením a o záporné hodnotě [15]:

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

Třecí síla

Třecí síla je pro brzdění velmi důležitá a setkáváme se s ní hned v několika případech. Nejprve uvnitř brzdové soustavy, kde třecí síla vzniká mezi brzdovou destičkou a brzdovým kotoučem, ale také mezi pneumatikou automobilu a povrchem vozovky. Tato kapitola se bude zabývat druhým případem.

Velikost třecí síly závisí na koeficientu tření. Je to bezrozměrná veličina specifická pro každou dvojici povrchů, mezi kterými vzniká třecí síla. Existují dva druhy koeficientů. Koeficient statického tření (μ_s) a koeficient kinetického tření (μ_k). Velikosti koeficientů pro jednotlivé povrchy můžeme vidět v tabulce 2.1. Jejich hodnoty se liší (hodnota μ_k je z pravidla o něco menší) a my při výpočtu velikosti třecí síly musíme zvolit správný koeficient. Pokud se dva povrchy vzájemně dotýkají, ale nejsou vůči sobě v pohybu, mluvíme o síle statického tření (např. když vozidlo jede a nebrzdí a hodnota skluzu mezi pneumatikami a vozovkou je nulová). Naopak, když se povrchy dotýkají a jsou vůči sobě v pohybu, mluvíme o síle kinetického tření (např. když vozidlo brzdí, kola jsou zablokovaná a hodnota skluzu je 100 %). Vztah pro výpočet velikosti statické třecí síly je následující:

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

$F_s[N]$ - statická třecí síla
 μ_s - koeficient statického tření
 $F_n[N]$ - normálová síla

a pro kinetickou třecí sílu:

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

$F_k[N]$ - kinetická třecí síla
 μ_k - koeficient kinetického tření

Ze vztahu vyplývá, že statická třecí síla je větší než kinetická, protože její velikost je přímo úměrná velikosti koeficientu tření, který je větší u statické třecí síly. Normálová síla F_n je konstantní, jak vyplývá z následujícího vztahu:

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

$m[kg]$ - hmotnost automobilu
 $g[m/s^2]$ - gravitační zrychlení

Obě veličiny jsou konstantní. Cílem systému ABS tedy je, aby mezi pneumatikami automobilu a povrchem vozovky vznikala pouze statická třecí síla. Vozidlo je tak schopné rychleji zastavit [16].

Nyní můžeme upravit původní vztah pro výpočet brzdné dráhy, neboť již známe velikost zrychlení ($a = g * \mu$). Po úpravě bude vypadat následovně:

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

kde μ je koeficient tření. Podle toho, jestli bude vozidlo zastavovat smykem nebo bez smyku, použijeme koeficient kinetického, resp. statického tření. Systém ABS střídavě blokuje a uvolňuje kola automobilu, v praxi musíme tedy k výpočtu délky dráhy využít kombinaci hodnot obou koeficientů. [15, 28]

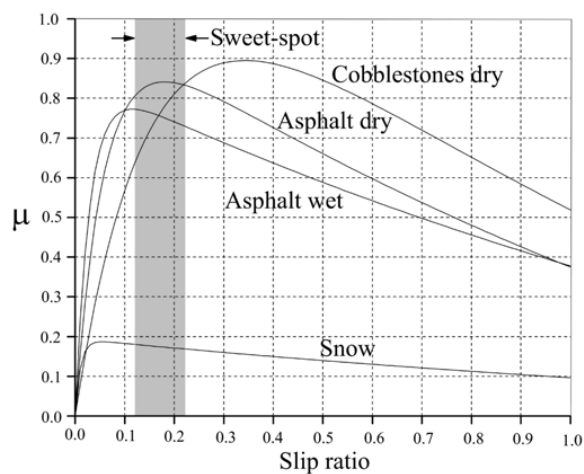
Skluz

Skluz vzniká mezi pneumatikou a povrchem vozovky, pokud se liší rychlost automobilu a obvodová rychlost kola. Může vznikat jak při prudkém rozjždění, tak i při prudkém brzdění. Skluz je bezrozměrná veličina, jeho velikost se tedy vyjadřuje zlomkem či procenty. 100% skluz znamená, že je kolo zablokované, 0% naopak, pokud se jeho obvodová rychlost rovná rychlosti automobilu. Brzdný účinek je největší při skluzu v rozmezí přibližně 10 % až 30 % (oblast stability). Při vyšší hodnotě skluzu se účinek zhoršuje (oblast nestability). Systém ABS tedy počítá velikost skluzu a podle toho reguluje rychlost kol, aby se vozidlo drželo stále ve stabilní oblasti. Křivky závislosti koeficientů tření u různých povrchů na velikosti skluzu jsou znázorněny na obrázku 2.9.

⁹https://www.researchgate.net/figure/Friction-coefficient-versus-slip-ratio-curves-for-different-road-surfaces-at-linear-speed_fig2_220674889/

Povrch vozovky	μ_s	μ_k
Asfalt nebo beton (suchý)	0.8-0.9	0.75
Asfalt (mokrý)	0.5-0.7	0.45-0.6
Beton (mokrý)	0.8	0.7
Štěrk	0.6	0.55
Zemité cesta (suchá)	0.68	0.65
Zemité cesta (Mokrá)	0.55	0.4-0.5
Sníh	0.2	0.15
Led	0.1	0.07

Tabulka 2.1: Srovnání statického a kinetického koeficientu tření mezi pneumatikou a různými povrchy [31].



Obrázek 2.9: Křivka závislosti koeficientu tření na skluzu.⁹

Velikost skluzu spočítáme vztahem:

$$slip = 1 - \frac{\omega_v}{\omega_w} \quad (2.9)$$

$slip$ - skluz

$\omega_v[rad/s]$ - referenční úhlová rychlost automobilu

$\omega_w[rad/s]$ - úhlová rychlost kola

Jednotlivé úhlové rychlosti pak vztahem:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.10)$$

$v[m/s]$ - rychlost

$r[m]$ - poloměr kola

který je stejný u referenční rychlosti automobilu v_v i rychlosti kola v_w [15, 24].

Aerodynamický odpor

Při jízdě automobilem kolem něj proudí vzduch. Proudnice za vozem se neuzavírají, ale nastává víření. Tím vzniká aerodynamický odpor [20]. Vyjadřujeme ho Newtonovým odporovým vzorcem [29]:

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

$F_r[N]$ - velikost odporové síly

C - součinitel vzdušného odporu

$\rho[kg/m^3]$ - hustota vzduchu

$S[m^2]$ - čelní plocha vozidla

$v[m/s]$ - rychlost proudění vzduchu kolem vozidla

Hodnoty C , ρ a S budou v práci považované za konstantní. Rychlost proudění vzduchu se bude ve výpočtech rovnat rychlosti pohybu vozidla. V reálných podmínkách se veličiny mění s teplotou, nadmořskou výškou, či se směrem a rychlostí větru, a působí zde i jiné síly. Prakticky však tyto změny představují malý rozdíl a navíc do simulace nelze zahrnout všechny aspekty reálného světa. Změny budeme tedy při výpočtech zanedbávat. Hodnoty veličin budou následující: $C = 0.294$ [4], $\rho = 1.2047[kg/m^3]$ [9] (hustota vzduchu při standardním atmosferickém tlaku 1,013 bar a teplotě 20 °C) a $S = k * h * 0.9$. k a h jsou šířka, resp. výška automobilu Škoda Rapid, který je použit v modelu [5]. V realitě ale není čelní plocha vozidla pouze součinem těchto dvou rozměrů, protože bychom tak museli zanedbat volný prostor mezi podvozkem a vozovkou, a také tvar karoserie, který netvoří přesný obdélník. Reálná plocha je tedy o něco menší. Abychom tuto skutečnost nezanedbali, vynásobíme součin konstantou 0,9. Díky tomu se velikost S více blíží skutečnosti.

Požadavky na systém ABS

- Vozidlo musí být po celou dobu nouzového brzdění ovladatelné.
- Řídicí korekce (natáčení volantu) musí být co nejmenší i na vozovce s rozdílnou přilnavostí na levé a pravé straně.
- ABS musí správně pracovat v celém rychlostním rozsahu vozidla (vypíná se, když vozidlo zpomalí na 4 km/h, aby mohlo úplně zabrzdit).
- Řiditelnost vozidla má vždy přednost před zkrácením brzdné dráhy (to může mít někdy za následek, že zastaví na delší dráze, než by zastavilo bez ABS).
- Je-li rozeznána závada systému ABS, musí být vypnut a řidič o tom musí být informován kontrolkou [19].

Kapitola 3

Základy modelování a simulace

V této kapitole budou shrnuty základní pojmy z oblasti modelování a simulace, vysvětlen obecný princip tvoření modelu a následně popsány některé modelovací prostředky.

3.1 Základní pojmy v modelování

System

System je soubor elementárních částí (prvků), které jsou mezi sebou propojené vazbami. Rozdělují se podle několika kritérií:

Podle existence:

- Reálné - existující
- Nereálné - fiktivní/ještě neexistující

Podle změn stavu:

- Statické - v čase nemění svůj stav
- Dynamické - mění stav v čase

Modelují se zejména dynamické systémy [26].

Model

Model je napodobenina systému jiným systémem. Musí napodobovat všechny důležité vlastnosti modelovaného systému, ale nepotřebné vlastnosti smí zanedbávat. Jedná se např. o počítačový program, soustavu rovnic, schéma, diagram atd. [26].

Modelování

Modelování je proces vytváření modelu. Vyžaduje důkladné znalosti modelovaného systému a často i znalosti z oborů, které s modelovaným systémem souvisejí. Čím je vytvořený model kvalitnější, tím jsou potom přesnější na něm prováděné experimenty. Musíme tedy zvážít, které části můžeme při modelování zanedbat [26].

Simulace

Simulace je metoda k získávání nových znalostí o systému prováděním experimentů s jeho modelem. Ne každý model je vhodný pro simulaci, musí být tedy popsán určitým způsobem. Na jednom modelu lze provádět i několik experimentů, jednotlivé experimenty mohou být prováděny s různými parametry. Některé experimenty je třeba zopakovat několikrát pro větší přesnost výsledků [26].

3.2 Princip modelování a simulace

Další důležité pojmy - vztahy mezi modely

Homomorfní vztah - vztah N:1, tedy zjednodušení. U tohoto vztahu některé prvky původního systému zanedbáváme, nebo nahradíme několik jeho komponent pouze jednou komponentou ve výsledném modelu.

Izomorfní vztah - vztah 1:1, ke zjednodušení tedy nedochází.

Postup při modelování

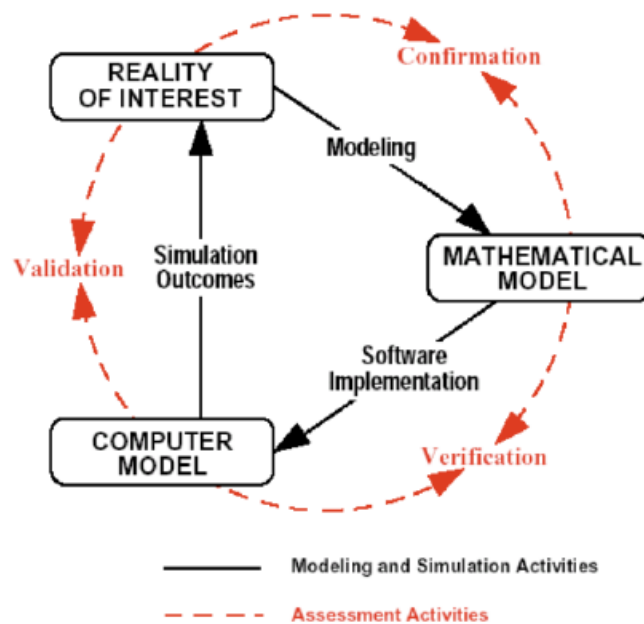
1. *Abstraktní model* - na základě znalostí o modelovaném systému vybereme ty jeho vlastnosti, které jsou pro naše experimenty podstatné, a vytvoříme abstraktní model. Abstraktní model je tedy zjednodušenou verzí modelovaného systému (mezi modelovaným systémem a tímto modelem je tedy homomorfní vztah). Nejedná se však o reálný model, nelze s ním tedy experimentovat. Příkladem tohoto modelu je soustava rovnic nebo blokové schéma.
2. *Simulační model* - z abstraktního modelu vytvoříme simulační model. Tento model již žádné aspekty zanedbává, mezi ním a abstraktním modelem je tedy izomorfní vztah. Dají se s ním však provádět experimenty. Příkladem simulačního modelu je počítačový program.
3. *Provádění experimentů* - se simulačním modelem provádíme experimenty a jejich výsledky analyzujeme. Cílem je získání nových znalostí [26].

Validace a verifikace

Verifikace modelu - předchází vlastní simulaci. V tomto případě znamená verifikace modelu ověření izomorfního vztahu (1:1) mezi abstraktním a simulačním modelem z hlediska struktury a chování.

Validace modelu - ověřování platnosti. Při validaci se snažíme ověřit, že daný model je adekvátní danému systému (chová se stejně jako modelovaný systém v totožných situacích). Tento proces je velice náročný a validita modelu se nedá nikdy dokázat na 100 % [26].

¹https://www.researchgate.net/figure/Basic-activities-involved-in-model-verification-and-validation_fig7_236525322



Obrázek 3.1: Základní aktivity spojené s validací a verifikací.¹

3.3 Modelovací prostředky

3.3.1 MATLAB

MATLAB je programovací nástroj pro technické výpočty. Byl vytvořen z jazyku FORTRAN v 70. letech 20. století. Nabízí snadný přístup ke knihovnám EISPACK a LINPACK. V 80. letech byl přepsán do jazyku C a byla mu taktéž přidána nová funkcionalita. V dnešní době je stále velice používaným nástrojem [17].

Součástí MATLABU jsou nejen vestavěné funkce (např. goniometrické funkce, logaritmus, mocnina/odmocnina, maximum/minimum, zaokrouhlení atd.), ale dají se zde definovat i funkce uživatelské (podobně jako v jiných programovacích jazycích). Jeho součástí jsou také předdefinované hodnoty nejběžnějších konstant (např. π , imaginární člen i pro komplexní výpočty, nebo ∞). Umí též vykreslovat a následně upravovat grafy. Pracuje nejen s jednotlivými hodnotami, ale i s vektory a maticemi [17].

Výhodami MATLABU je, že:

- pracuje zároveň jako programovací jazyk i jako kalkulátor,
- výpočty se dají zobrazit pomocí grafu,
- je relativně jednoduché naučit se ho používat a
- výpočty v něm jsou relativně rychlé.

Naopak mezi **nevýhody** patří, že:

- není to univerzální programovací jazyk (jeho možnosti v jiných oblastech než matematických výpočtech jsou omezené),

- je interpretovaný a tedy rychlost běhu programu je nižší než u kompilovaných jazyků (C/C++, Java...) a
- většina příkazů je pro něj specifická (nemusí mít ekvivalent v jiných jazycích), programy jsou tudíž špatně přenositelné [17].

3.3.2 SIMLIB

SIMLIB je knihovna jazyka C++ vyvíjena od roku 1990 na Ústavu informatiky a výpočetní techniky FEI VUT Brno. Poskytuje základní prostředky pro popis modelů a řízení simulace [25].

Má specifické třídy pro diskrétní a spojitou simulaci a za pomoci grafických knihoven dokáže výsledky simulací zobrazit ve formě grafů, či pouze jako hodnoty [26]. SIMLIB byl také rozšířen o 3D abstrakce pro usnadnění popisu modelů vyžadujících popis vektorovými diferenciálními rovnicemi [25].

Za **výhody** se považuje:

- jedná se pouze o knihovnu, SIMLIB je tedy použitelný ve všech prostředích, která pracují s C++,
- prostředky knihovny si může uživatel sám doplnit, pokud bude potřebovat.

Nevýhodami je naopak:

- nemožnost dodatečných syntaktických a sémantických kontrol,
- nutná znalost jazyka C++ [25].

3.3.3 UPPAAL

V modelovacím nástroji UPPAAL byl vytvořen program použitý v této práci. Nástroj bude tedy podrobněji popsán až v kapitole *Zvolené realizační prostředky a návrh řešení* (4).

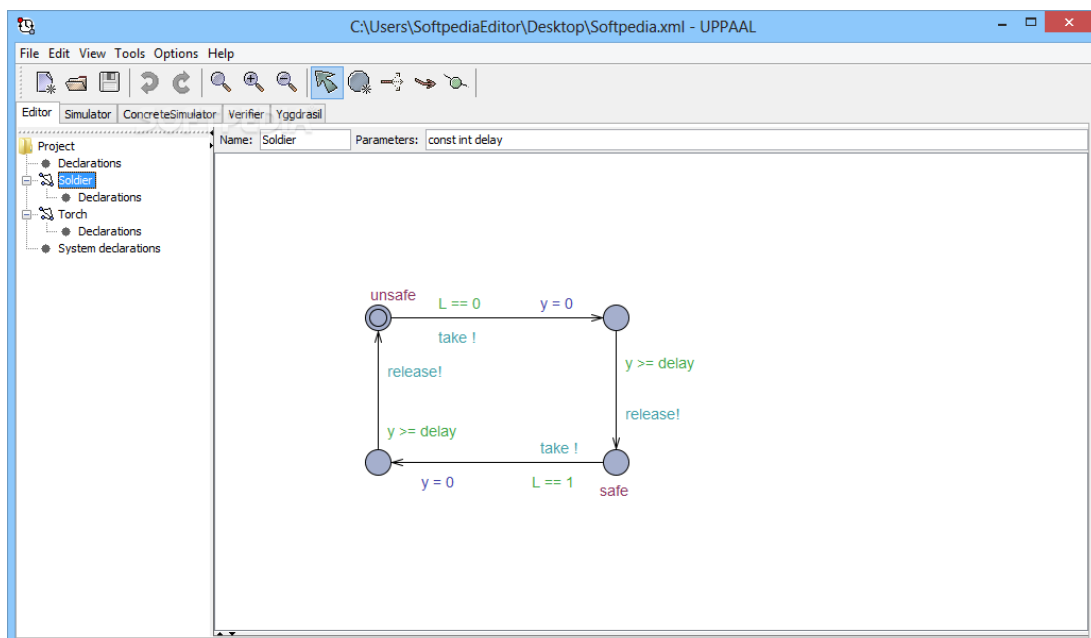
Kapitola 4

Zvolené realizační prostředky a návrh řešení

4.1 Modelovací nástroj UPPAAL

UPPAAL je modelovací nástroj pro validaci a verifikaci real-time systémů vyvinutý univerzitou v Uppsale a univerzitou v Aalborgu. Systémy se tímto nástrojem dají modelovat jako sítě časovaných automatů (stavové automaty rozšířené o měření času). Každý automat představuje jeden proces. Tyto procesy běží paralelně a jsou mezi sebou synchronizovány.

Tento nástroj disponuje grafickým uživatelským rozhraním implementovaným v jazyce *Java* a verifikátorem napsaným v *C++*. Současná verze pracuje s proměnnými datového typu *int*, *double*, *clock* (proměnná simulující běh času), ale i se strukturovanými proměnnými. Dále se dají implementovat uživatelské funkce a jednotlivé stavové automaty je možno synchronizovat pomocí synchronizačních kanálů [14].



Obrázek 4.1: Grafické uživatelské rozhraní UPPAAL - editor.¹

4.1.1 Nástroje rodiny UPPAAL

UPPAAL 4.0

Současná nejnovější stabilní akademická verze. Je sice vyspělá, stále však ne dostatečně k zachycení chování komplexních kybernetických systémů. Tyto systémy jsou dynamické a vyznačují se stochastickým chováním, proto je pro tuto verzi téměř nemožná kontrola modelu. Samotnými časovanými automaty se totiž toto chování dá jen těžko vymodelovat [3].

UPPAAL 4.1

Vývojová akademická verze. Jedná se o rozšíření UPPAALu 4.0 o statistickou kontrolu modelu (statistical model checking). V této nové verzi lze reprezentovat systémy pomocí sítí automatů, jejichž chování může záviset na stochastických i nelineárních dynamických prvcích. Konkrétně, každá složka modelovaného systému je popsána automatem, jehož hodiny se mohou vyvíjet různými rychlostmi. Ty lze stanovit např. diferenciálními rovnicemi.

Hlavní myšlenkou statistické kontroly modelu (SMC) je monitorovat některé simulace systému a následně použít statistické výsledky k určení, s jakou jistotou model splňuje dané podmínky. V podstatě jde o kompromis mezi testováním a základními technikami kontroly modelu. Metody založené na simulacích jsou obecně méně náročné na paměť a čas a často jde o jedinou možnost kontroly [3].

UPPAAL Stratego

Stratego je alternativní vývojová větev UPPAALu. Kombinuje principy z ostatních vývojových větví a zaměřuje se na vytváření, optimalizaci a srovnávání strategií pro řešení stochastických časovaných problémů (her). Se strategiemi pracuje jako s objekty a díky tomu je lze porovnat a vybrat tu nejúčinnější [30].

- *Stochastická časovaná hra* - matematický model systému skládající se z procesů (hráčů), které mají nezávislé cíle, snaží se jich dosáhnout a tím vyhrát hru. Časovaná hra znamená, že se hledá to řešení, které bude nejméně časově náročné (nejrychlejší), stochastická pak, že je hra rozšířena o pravděpodobnostní přechody. Řešením hry je buď nalezení vítězné strategie, nebo prokázání, že cíl není dosažitelný.
- *Strategie* - předpis akcí (přechodů) jednoho procesu (hráče), které vedou k dosažení cíle. Strategie mohou být deterministické (jedna akce pro každý stav, do kterého se proces může dostat) či nedeterministické (pro každý stav existuje několik alternativ akcí) [30].

Pokud je nalezena účinná strategie σ pro řešení hry G , je tato strategie uložena do paměti a lze ji pak znovu aplikovat.

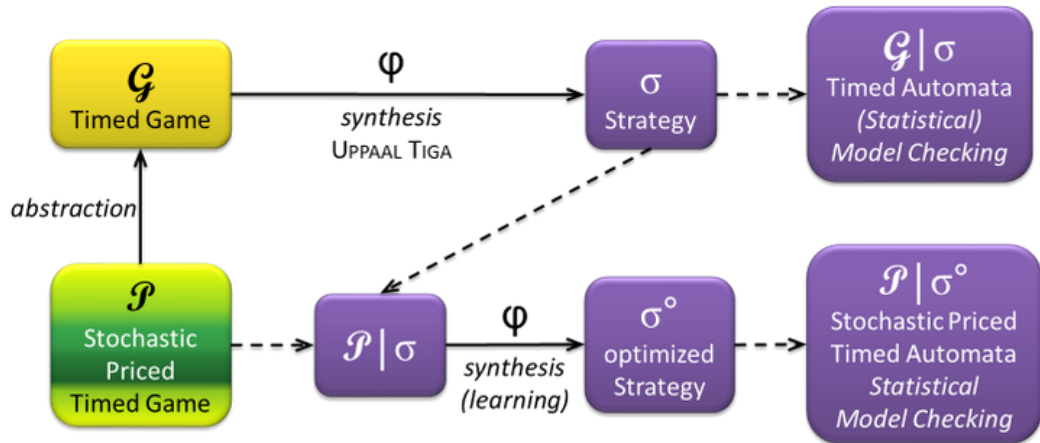
Na obrázku 4.2 je znázorněna činnost Stratega. Plné šipky značí transformaci a výpočet, přerušované naopak opětvonné užití objektů.

4.1.2 Důležité pojmy

Stavový automat - diagram popisující chování systému na základě vstupních signálů. To, jak na signál zareaguje, záleží na tom, ve kterém stavu se právě nachází. Diagram se

¹<https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/Uppaal.shtml>

²<https://people.cs.aau.dk/~marius/stratego/intro.html>



Obrázek 4.2: Přehled UPPAAL Stratego.²

skládá ze stavů a přechodů mezi nimi. Reakcí na vstupní signál je buď přechod do jiného stavu, nebo setrvání v současném stavu, v závislosti na podmínkách. Ve stavech i na přechodech mohou být definovány různé akce, které se v daný okamžik provedou. Každý automat má právě jeden počáteční stav (začíná v něm činnost procesu) a alespoň jeden koncový stav (činnost procesu v něm musí skončit, jinak se považuje za neukončený). Automat je popsán pomocí orientovaného grafu (uzly reprezentují stavy a orientované hrany znázorňují přechody). Stavy mohou být pojmenované nebo očíslované [12].

Čas - je v UPPAALu měřen po celou dobu simulace. Proměnná simulující běh času je datového typu *clock*. Kromě globálních hodin lze zavést i lokální hodiny pro měření času v jednotlivých automatech nebo jejich částech.

V reálném světě neexistuje akce, která by netrvala žádný čas. Časové automaty musí tuto skutečnost také simulovat. Pokud by mělo teoreticky proběhnout nekonečně mnoho přechodů za nulový čas, je toto chování označeno jako **Zeno behavior** a simulace je ukončena. Mohou však existovat stavy, ve kterých neběží simulační čas. Jedná se o:

- *Urgent stavy* - pokud se proces dostane do tohoto stavu, čas tohoto procesu neběží, dokud nepřejde do jiného stavu. Ostatní procesy tím nejsou nijak ovlivněny.
- *Committed stavy* - chovají se stejně jako urgent stavy, avšak ovlivňují i všechny ostatní procesy. To znamená, že proces, který se do committed stavu dostane, má prioritu - musí jako první přejít do následujícího stavu, než mohou učinit přechody ostatní procesy [14].

Stráže - omezení, která je možno aplikovat na přechody. Pokud není splněna podmínka (např. čas na hodinách nabude určité hodnoty), proces nemůže přejít do následujícího stavu [14].

Invarianty - omezení, která je možno aplikovat na stavy. Používají se tehdy, chceme-li nastavit vrchní hranici podmínky (např. proces musí přejít do následujícího stavu, než čas na hodinách nabude hodnoty *invariant*). V situacích, kdy je třeba omezit interval shora i zdola, se používají invarianty i stráže dohromady [14].

Synchronizační kanály - prostředek pro komunikaci a synchronizaci automatů mezi sebou. V UPPAALu se dají vytvořit pomocí proměnných typu (*broadcast*) *chan*. Stejně jako stavy mohou být urgentní.

Př.: Signál *s* je procesem vyslán pomocí vykřičníku, tedy *s!*. Naopak proces, který na signál čeká, používá otazník, tedy *s?*. Jedním signálem může být synchronizováno i několik procesů najednou. Po zachycení signálu mohou pokračovat ve své činnosti [14].

Aktualizace - akce, které se provedou během přechodu (např. přiřazení nové hodnoty proměnným nebo vynulování hodin) [14].

Části programu, ve které modelujeme stavové automaty a definujeme konstanty, proměnné, funkce atd., říkáme *editor*. UPPAAL obsahuje také *simulátor*, ve kterém je možno procházet danou simulací krok po kroku a sledovat, jestli pracuje tak, jak bychom předpokládali, a *verifikátor*, kde se dají tvořit vlastní simulace a volit jejich parametry. Verifikátorem lze ověřit, zda v modelu nedochází k uváznutí (deadlocku), a dále poskytuje výstupy jednotlivých simulací (ve formě grafů), které můžeme dále zkoumat [15].

Pro ověřování podmínek a provádění simulací má verifikátor vlastní dotazovací jazyk. Mezi jeho základní klíčová slova patří:

- *E* - existenční kvantifikátor. Udává, že existuje alespoň jedno větvení, které splňuje danou podmínku.
- *A* - univerzální kvantifikátor. Daná podmínka musí platit pro všechna větvení [27].
- *simulate* - provedení simulace. Lze nastavit počet průchodů programem, maximální dobu trvání jednoho průchodu a veličiny, jejichž průběh chceme simulovat.
- *Pr* - měření pravděpodobnosti určitého jevu. Stejně jako u simulace lze nastavit počet průchodů a maximální dobu jejich trvání. Dále je nutno zadat podmínku jevu, jehož pravděpodobnost chceme spočítat [3].

simulate a *Pr* jsou podrobněji popsány v kapitole 6 u jednotlivých testů.

4.2 Návrh řešení

Při návrhu řešení je třeba provést určitou úroveň abstrakce. Modelovaný systém automobil-řidič-vozovka je totiž velice složitý. Některé aspekty tedy zanedbáme.

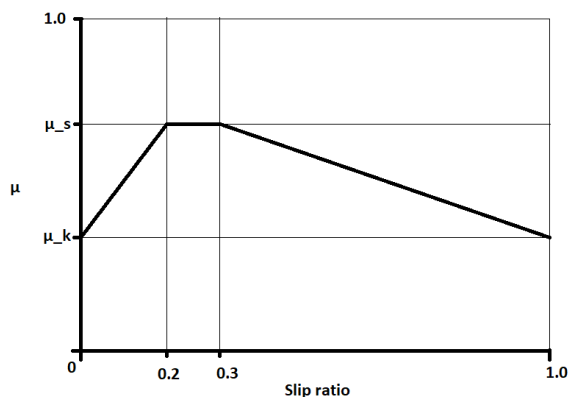
V modelu budeme předpokládat, že vozovka je vždy rovná bez stoupání či klesání, a bez zatáček. Také se neliší její vlastnosti při styku s jednotlivými koly vozidla, ale po celé své délce a šířce je homogenní.

Činnost řidiče bude také zjednodušena. Nejdříve může nastartovat nebo vypnout motor. Po nastartování stlačuje střídavě buď pedál akceleračního, nebo brzdového. Vždy musí stlačovat právě jeden z těchto pedálů. Pedály však nemusí stlačit maximálně, nýbrž má na výběr ze tří stupňů stlačení, aby model více odpovídal reálným podmínkám, kde se úroveň stlačení často mění. Poté co dosáhne požadované rychlosti pro simulaci, snaží se ji udržet ($\pm 5\%$). Když uvidí překážku, po krátkém okamžiku (doba reakce) stlačí brzdový pedál na maximum, a drží, dokud vozidlo úplně nezastaví. Chování řidiče bude totožné v simulacích s použitím ABS i bez něj.

U vozidla zanedbáme ty jeho části, které přímo nesouvisí s procesem brzdění. I samotný brzdňý systém je však třeba zjednodušit. Kola budeme modelovat pouze jako jedno kolo, a budeme předpokládat tytéž vlastnosti i u ostatních. Signály, které vysílají senzory řídicí jednotce, budou tedy také totožné. Činnost senzorů bude tedy vyjádřena jedním senzorem. U brzd zanedbáme jejich jednotlivé části, jako jsou brzdové kotouče, písty, brzdová kapalina atd. Veškerou činnost ovládá řídicí jednotka, která komunikuje se všemi ostatními komponentami, pošle signál systému ABS, zda má v brzdách uvolnit či ponechat tlak, a postará se také o konečnou úpravu rychlosti na základě odpovědi ABS. Samotné brzdy tedy model nebude obsahovat.

Překážka bude mít v modelu zanedbaný tvar, velikost, umístění na vozovce i vzdálenost od vozidla. Její činnost bude spočívat pouze v tom, že se vygeneruje za určitý časový interval poté, co vozidlo dosáhne požadované rychlosti pro zahájení simulace nouzového brzdění. Vozidlo nebude moci do překážky vrazit, ale řidič se bude pouze snažit zabrzdít co nejrychleji po tom, co vygenerovanou překážku spatří.

Reálná křivka závislosti skluzu na koeficientu tření, viz obrázek 2.9, je také příliš složitá. V simulacích použijeme zjednodušenou verzi, jak je vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 4.3: Zjednodušená křivka závislosti koeficientu tření na skluzu.

Kapitola 5

Implementace modelu

V této kapitole popíš implementaci navrženého modelu v modelovacím nástroji UPPAAL. Implementace vychází z návrhu v minulé kapitole.

Popis programu

Jako referenční vozidlo pro simulace byl použit automobil Škoda Rapid 1,2 TSI (nenalezené parametry byly převzaty z jiného typu Škody Rapid). Technické údaje lze nalézt na různých internetových stránkách ([5, 21, 1, 4, 11]). Na internetových stránkách je také možné nalézt hodnoty fyzikálních veličin ([9, 10, 18]). Pokud byla hodnota zadána intervalem, v programu je použita jeho střední hodnota. Ostatní konstanty byly zvoleny stochasticky, aby bylo zajištěno chování, které se dá jednoduše implementovat a zároveň co nejvíce odpovídá skutečným podmínkám.

Proměnné

braking_time - brzdný čas od okamžiku, kdy řidič stlačí brzdový pedál, do okamžiku, kdy vozidlo zastaví

reaction_time - doba reakce řidiče na spatřenou překážku

full_braking_time - celkový brzdný čas (brzdný čas + doba reakce řidiče)

braking_distance - délka brzdné dráhy od okamžiku stlačení brzdového pedálu do úplného zastavení vozidla

reaction_distance - dráha, kterou vozidlo ujede, než řidič zareaguje na překážku na vozovce

full_braking_distance - celá brzdná dráha (součet délky brzdné dráhy a reakční vzdálenosti)

initial_speed - počáteční rychlost před tím, než započne nouzové brzdění

sum_br_force - součet velikostí brzdné síly všech cyklů činnosti ABS od začátku nouzového brzdění do zastavení (kvůli výpočtu průměrné velikosti)

braking_counter - počítadlo cyklů činnosti ABS (pro výpočet průměrné velikosti brzdné síly)

avg_br_force - průměrná velikost brzdné síly při nouzovém brzdění

speed - okamžitá rychlost

slip - okamžitá velikost skluzu

angular_w - okamžitá velikost úhlové rychlosti kola

angular_c - okamžitá velikost referenční úhlové rychlosti vozidla (pro výpočet skluzu)

v_w - okamžitá obvodová rychlost kola
stability - pravdivostní hodnota určující, zda je hodnota skluzu ve stabilní oblasti
ABS_use - pravdivostní hodnota určující, zda v aktuálním cyklu bude použit systém ABS (bude uvolněn brzdový tlak)
braking_force - okamžitá velikost brzděné síly
braking_interval - čas jednoho cyklu ABS (hodnota je náhodně vybrána z intervalu, takže může být v každém cyklu rozdílná)
air_resistance - okamžitá velikost odporu vzduchu
braking - pravdivostní hodnota určující, zda může být vypočtena nová hodnota okamžité rychlosti při nouzovém brzdění
tmp_w_speed - pomocná proměnná, ve které je uchovávána hodnota velikosti obvodové rychlosti kola z minulého cyklu
rdy - pravdivostní hodnota určující, zda může automat *Control_unit* přejít ze stavu *decide_stability1* do stavu *decide_stability2*
tmp_coef - okamžitá hodnota koeficientu tření
defect - pravdivostní hodnota určující, zda již došlo k defektu v simulaci s poruchou brzd
real_slip - proměnná, do které je ukládána okamžitá reálná velikost skluzu v simulaci s poruchou brzdových senzorů

Parametry automobilu

l - konstanta délky vozidla
k - konstanta šířky vozidla
h - konstanta výšky vozidla
m - konstanta hmotnosti vozidla.
S - konstanta čelní plochy vozidla (pro zjednodušení předpokládám, že $S = k * h * 0.9$)
r_w - konstanta poloměru kola (průměr 17")
C - konstanta koeficientu odporu vzduchu

Fyzikální konstanty

g - konstanta tíhového zrychlení pro naši zeměpisnou šířku
ro - konstanta hustoty vzduchu pro teplotu 20 °C
epsilon - konstanta koeficientu valivého odporu
Fn - konstanta normálové síly na vodorovném povrchu
u_s, u_k - hodnoty koeficientů statického, resp. kinetického tření (v programu jsou na výběr různé varianty podle toho, na kterém povrchu je prováděna simulace. Kvůli malému rozdílu některých hodnot jsou v testech v kapitole 6 použity pouze koeficienty pro povrchy *suchý asphalt, mokrý asphalt, sníh a led*).

Ostatní konstanty

pedal_a, pedal_b - konstanty určující, zda řidič právě šlape na pedál akcelérátoru, či brzdy
phase_1, phase_2 - konstanty, které udávají, zda řidič teprve zrychluje na požadovanou rychlost (fáze 1), nebo už této rychlosti dosáhl a snaží se jet konstantní rychlostí, než uvidí na vozovce překážku (fáze 2)

aw_coef, **ABS_coef** - stochasticky zvolené konstanty potřebné ke snižování/zvyšování rychlosti otáčení kol automobilu podle toho, zda brzdy působí tlakem, nebo je tlak uvolňován kvůli ABS

speed_limit - konstanta požadované rychlosti, které musí vozidlo dosáhnout, než bude vygenerována překážka a započne nouzové brzdění

obstacle_min, **obstacle_max** - konstanty udávající minimální, resp. maximální čas, za který se na vozovce objeví překážka

Synchronizační kanály

engine_start, **engine_stop** - kanály, kterými automat *Driver* signalizuje automatům *ABS*, *Control_unit* a *Sensor*, že se mají spustit/vypnout

obstacle - kanál, jímž automat *Obstacle* signalizuje automatu *Driver*, že se na vozovce objevila překážka

steady - kanál, kterým automat *Driver* signalizuje automatu *Obstacle*, že vozidlo již dosáhlo požadované rychlosti a může být vygenerována překážka

brake - kanál, jímž automat *Driver* signalizuje automatům *ABS* a *Wheel*, že má začít nouzové brzdění

cslip - kanál, jímž automat *Wheel* signalizuje automatu *Sensor*, že má vypočítat novou hodnotu skluzu

count_stab - kanál, kterým automat *Sensor* signalizuje automatu *Control_unit*, že má započnout nový cyklus

wheel - kanál, jímž automat *ABS* signalizuje automatu *Wheel*, že má začít nový cyklus

Hodiny

time - globální čas celé simulace

x - lokální čas používaný automatem *Driver*

o - lokální čas používaný automatem *Obstacle*

r - čas od vygenerování překážky na vozovce do zastavení vozidla

b - lokální čas používaný automatem *ABS*

cu - lokální čas používaný automatem *Control_unit*

Funkce

double speed_update(int pedal, double car_speed, int phase) - funkce, která upravuje hodnotu rychlosti do té doby, než řidič začne nouzově brzdit. Parametr *pedal* určuje, zda byl stlačen pedál akcelérátoru nebo brzdy, *car_speed* je aktuální okamžitá rychlost (před aktualizací), *phase* určuje, zda se simulace nachází v první (zrychlování) nebo druhé (udržování rychlosti) fázi.

double angular_v_count(double speed) - funkce k výpočtu úhlové rychlosti. Parametr *speed* udává aktuální okamžitou rychlost vozidla.

double slip_count(double ang_wheel, double ang_car) - funkce k výpočtu skluzu. *ang_wheel* je parametr udávající úhlovou rychlost kol a *ang_car* referenční úhlovou rychlost vozidla.

double coef_count(double slip, double coef, double speed) - funkce k výpočtu aktuální hodnoty koeficientu tření. Parametr *slip* udává velikost skluzu, *coef* udává starou hodnotu koeficientu a *speed* okamžitou rychlost.

double Fb_count(double coef, double speed, int def) - funkce k výpočtu brzdné síly. *coef* je hodnota koeficientu tření, *speed* okamžitá rychlost a *def* je pravdivostní hodnota určující, zda došlo k defektu brzd.

double em_speed_update(int ABS_usage, double br_force, double wheel_speed, double speed, double br_interval) - funkce pro úpravu velikosti rychlosti během nouzového brzdění. *ABS_usage* je pravdivostní hodnota, která určuje, zda má být snížen brzdný tlak, *br_force* je velikost brzdné síly, *wheel_speed* obvodová rychlost kol, *speed* okamžitá rychlost vozidla a *br_interval* čas aktuálního cyklu.

double w_sp_update(double w, double speed) - funkce pro výpočet nové hodnoty okamžité obvodové rychlosti kol. *w* je aktuální rychlost kol a *speed* okamžitá rychlost vozidla.

int stab_cnt(double slip) - funkce pro výpočet stability. Parametr *slip* udává velikost skluzu.

int count_defect(int def) - funkce pro výpočet nové hodnoty proměnné *defect*. Parametr *def* je stará hodnota této proměnné. Tato funkce se používá v simulacích s defektem brzd.

double fake_slip_count() - funkce pro výpočet falešné hodnoty skluzu v simulacích s poruchou brzdových senzorů

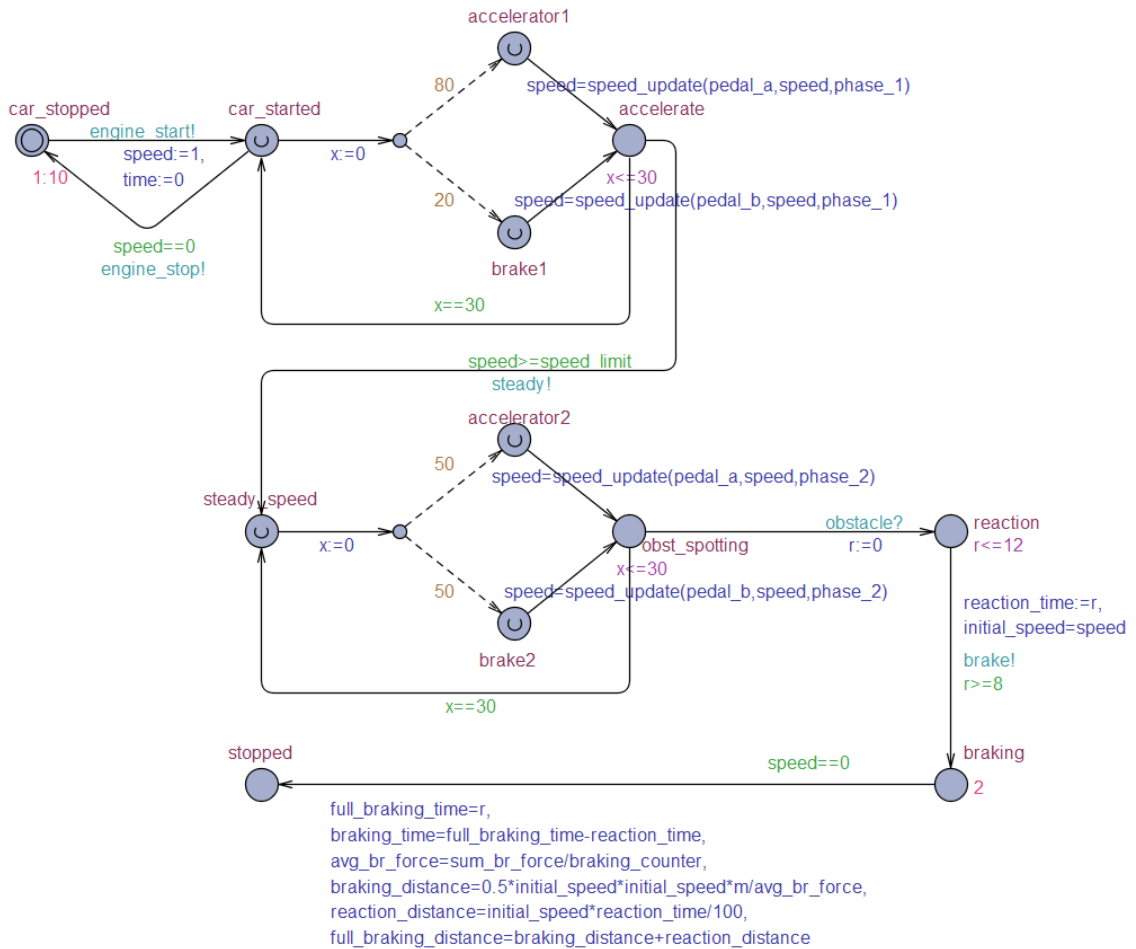
5.1 Model řidiče

Automat modelu řidiče zahajuje svou činnost ve stavu *car_stopped*. Po zahájení činnosti přechází do stavu *car_started*, což simuluje nastartování automobilu. Při přechodu do tohoto stavu vyšle signál *engine_start!*, který zahájí činnost automatů *ABS*, *Control_unit* a *Sensor*. Během tohoto přechodu jsou také spuštěny hodiny *time*, které simulují celkový reálný čas simulace, a proměnná *speed* simulující rychlost je nastavena na hodnotu 1 (při hodnotě 0 by došlo k vypnutí motoru). Rychlost je v metrech za sekundu. Řidič by teoreticky mohl motor vypnout signálem *engine_stop!* a vrátit se zpět do počátečního stavu.

Ze stavu *car_started* pokračuje automat buď do stavu *accelerator1* (šance 80 %), nebo do stavu *brake1* (šance 20 %). Z obou těchto stavů přejde do stavu *accelerate*. Podle výchozího stavu se určí, zda vozidlo zpomalí nebo zrychlí (potřebujeme, aby vozidlo zrychlilo na požadovanou rychlost, ve které dále zahájí nouzové brzdění, avšak při reálné jízdě je řidič nucen někdy zpomalit, i když se zrovna rozjíždí, proto existuje 20% šance, že bude zpomalovat). Změnu rychlosti zajistí funkce *speed_update()*, jejíž vstupní parametr *pedal* určí, zda se rychlost zvýší nebo sníží. Rychlost se může zvýšit/snížit o jednu ze tří hodnot. Řidič totiž nešlape na pedál vždy stejně. Pokud po úpravě rychlosti její hodnota nepřekročila požadovanou mez, automat se ze stavu *accelerate* vrátí zpět do stavu *car_started* a celá smyčka se opakuje. Jedna smyčka trvá třicet časových jednotek. Čas ve smyčce udávají hodiny *x*, které se po zahájení nové smyčky vynulují.

Když hodnota rychlosti (*speed*) dosáhne požadované meze, nebo ji překročí, automat se ze stavu *accelerate* nevrací do *car_started*, ale pokračuje dále do stavu *steady_speed*. Při tomto přechodu vyšle signál *steady!*, který zahájí činnost automatu *Obstacle*, který bude generovat překážku na cestě.

Nyní potřebujeme, aby rychlost zůstala přibližně stejná do té doby, než bude vygenerována překážka a řidič začne nouzově brzdit. Automat tedy v tuto chvíli poběží znovu ve smyčce. Ze stavu *steady_speed* přejde buď do stavu *accelerator2*, nebo *brake2*. Tentokrát je však šance obou těchto přechodů 50 %. Dále přechází do stavu *obst_spotting*, kde zjišťuje, zda na vozovce není překážka. Při tomto přechodu je rychlost opět upravena funkcí *speed_update()*, avšak po úpravě se nesmí lišit od požadovaného limitu o více než 5 %. Toto je ošetřeno parametrem *phase*, který udává, zda se automat nachází v první smyčce (zrych-



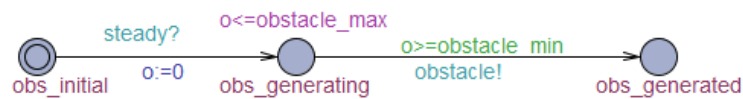
Obrázek 5.1: Automat Driver modelující činnost řidiče

lování na požadovanou rychlost), kdy úprava rychlosti není nijak omezena, nebo v nynější smyčce, kde je omezena tímto limitem. Pokud překážka ještě nebyla vygenerována, automat se vrací zpět do stavu *steady_speed* a zahajuje novou smyčku. Smyčky trvají opět třicet časových jednotek a taktéž jsou řízeny hodinami *x*.

Pokud překážka již byla vygenerována, automat přejde ze stavu *obst_spotting* do stavu *reaction*, který simuluje dobu reakce řidiče na spatření překážky. Z tohoto stavu přechází po uplynutí osmi až dvanácti časových jednotek (reakce trvá 0,08 - 0,12 s) do stavu *braking*. Tímto přechodem je zahájeno nouzové brzdění. Automat brzdění zahajuje signálem *brake!*. Ve stavu *braking* čeká, až bude rychlost (*speed*) nulová, což značí, že vozidlo zabrzdilo, a poté přejde do stavu *stopped*, kde svoji činnost končí. Při přechodu do konečného stavu jsou spočítány hodnoty brzdného času (*full_braking_time*) a brzdné dráhy (*full_braking_distance*). Dále jsou také stanoveny hodnoty brzdného času bez času reakce řidiče (*braking_time*), průměrné brzdné síly (*avg_braking_force*), dráhy ujeté, než řidič zareagoval (*reaction_distance*), a brzdné dráhy pouze od okamžiku reakce (*braking_distance*).

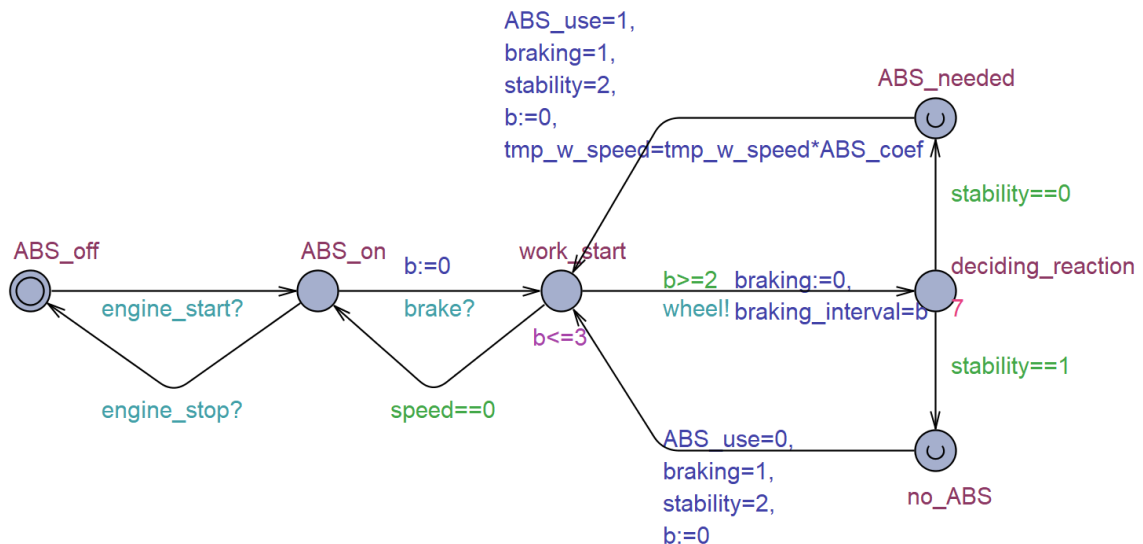
5.2 Model překážky

Překážka je simulována automatem *Obstacle*. Tento automat začíná ve stavu *obs_initial* a čeká na signál *steady*, který vyšle automat *Driver*, když vozidlo dosáhne požadované rychlosti. Po zachycení tohoto signálu přechází automat do stavu *obs_generating*, ve kterém začíná generovat překážku na vozovce. Generování překážky je řízeno hodinami *o*. Překážka se vygeneruje v náhodném okamžiku, když se hodnota *o* pohybuje v intervalu mezi hodnotami *obstacle_min* a *obstacle_max*. Tyto hodnoty jsou konstantní a podrobněji budou popsány na konci této kapitoly. Když je simulovaná překážka vygenerována, automat přejde do stavu *obs_generated* a signálem *obstacle!* dá zprávu automatu *Driver*, že má řidič zahájit nouzové brzdění.



Obrázek 5.2: Automat Obstacle simulující překážku na vozovce

5.3 Model systému ABS



Obrázek 5.3: Automat ABS modelující činnost systému ABS

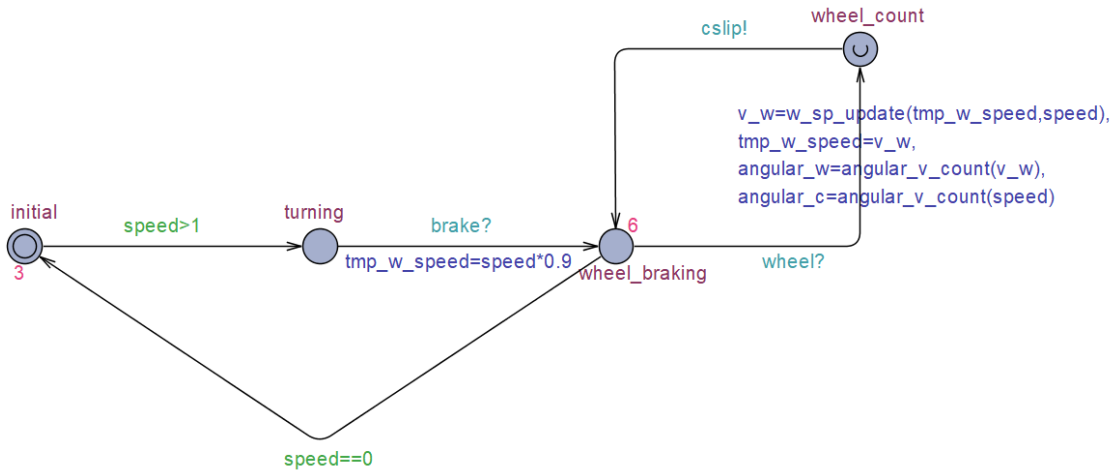
Automat *ABS* simuluje činnost systému ABS. Z počátečního stavu *ABS_off* přejde do následujícího stavu *ABS_on* poté, co obdrží signál *engine_start*. Po obdržení signálu

engine_stop je možné vrátit se zpět do počátečního stavu. Ve stavu *ABS_on* automat vyčkává, dokud neobdrží signál *brake*, kterým automat *Driver* signalizuje počátek nouzového brzdění. Poté přejde do stavu *work_start*.

Dále automat pokračuje svou činností ve smyčce. Po uplynutí dvou až tří časových jednotek přechází do stavu *deciding_reaction* a signálem *wheel!* značí automatu *Wheel*, že má započnout svůj výpočet. Ve stavu *deciding_reaction* čeká, dokud automat *Control_unit* nespočítá hodnotu proměnné *stability* značící, zda je brzdění stabilní, či ne, a podle této hodnoty přechází buď do stavu *ABS_needed*, pokud je potřeba snížit brzdný tlak na kolech vozidla, či do stavu *no_ABS*, pokud se hodnota skluzu (*slip*) pohybuje v oblasti stability. Z těchto dvou stavů přechází znovu do stavu *work_start* a zahajuje další smyčku.

Časový interval, který uplyne před zahájením nové smyčky, je řízen hodinami *b*. Při přechodu zpět do stavu *work_start* je nastavena hodnota proměnné *ABS_use* na 1 nebo 0 podle toho, zda byl/nebyl uvolněn tlak v brzdách vozidla. Dále je proměnná *braking* nastavena na hodnotu 1, čímž je signalizováno automatu *Control_unit*, že může přejít do následujícího stavu. Uvolnění brzděného tlaku na kolech při přechodu ze stavu *ABS_needed* je provedeno zvýšením hodnoty proměnné *tmp_w_speed*, která simuluje okamžitou obvodovou rychlost kol v jednotlivých cyklech.

5.4 Model kola



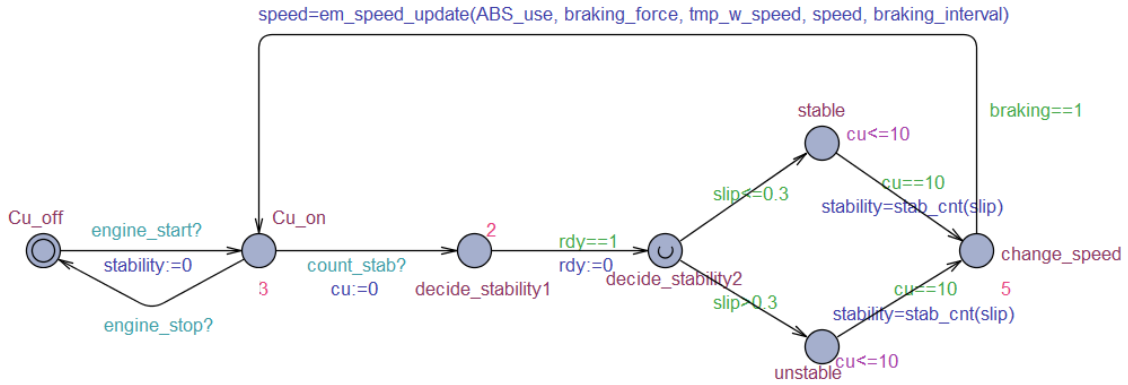
Obrázek 5.4: Automat Wheel simulující činnost kol

Činnost kol simuluje automat *Wheel*. Jeho počáteční stav se nazývá *initial*. Když rychlost (*speed*) přesáhne hodnotu 1, přechází do stavu *turning*. V tomto stavu vyčkává na obdržení signálu *brake*, který vysílá automat *Driver* při zahájení nouzového brzdění, a poté přechází do stavu *wheel_braking*. Zde dále čeká na signál *wheel*, který vyšle automat *ABS* po zahájení nové smyčky, a po obdržení tohoto signálu zahajuje svoji vlastní smyčku.

Nejprve přejde do stavu *wheel_count*. Při tomto přechodu spočítá pomocí funkce *w_sp_update()* novou hodnotu obvodové rychlosti kol. Z této obvodové rychlosti vypočítá rychlost úhlovou pomocí funkce *angular_v_count()* a taktéž na úhlovou rychlost přepočte rychlost automobilu *speed*. Nakonec přejde zpět do stavu *wheel_braking* a pomocí signálu

cslip! dává pokyn automatu *Sensor*, že z vypočítaných hodnot může vypočítat hodnotu skluzu (*slip*).

5.5 Model řídicí jednotky



Obrázek 5.5: Automat *Control_unit* simulující činnost řídicí jednotky

Automat *Control_unit* simuluje činnost řídicí jednotky. Po obdržení signálu *engine_start* přechází z počátečního stavu *Cu_off* do stavu *Cu_on*. V tomto stavu vyčkává, dokud neobdrží od automatu *Sensor* signál *count_stab* udávající, že může zahájit novou smyčku.

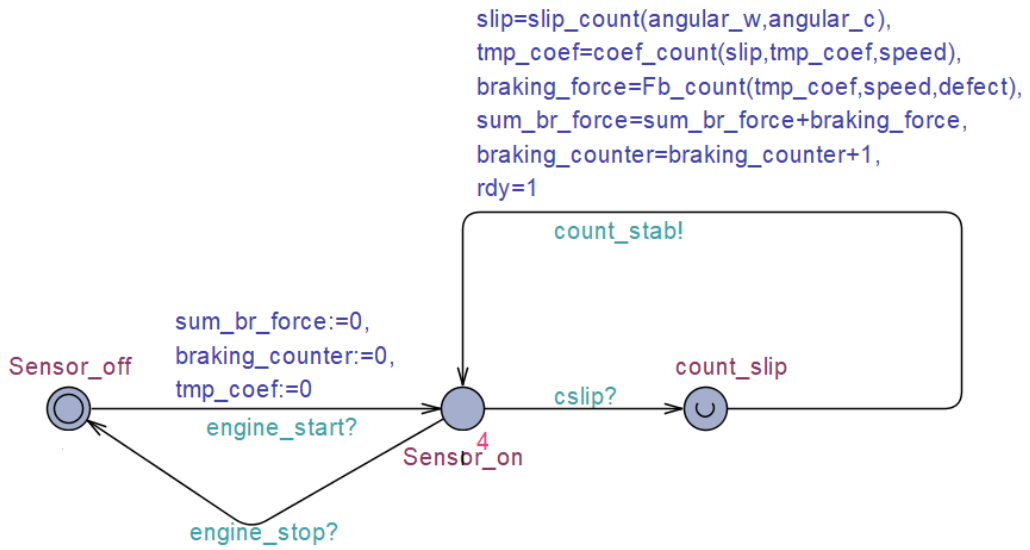
Po obdržení tohoto signálu přechází do stavu *decide_stability1*, kde znovu čeká, než bude hodnota proměnné *rdy* rovna jedné. Hodnota této proměnné je taktéž upravována automatem *Sensor* a nastavením hodnoty této proměnné na hodnotu 1 dává signál automatu *Control_unit*, že hodnoty, se kterými bude dále pracovat, jsou aktuální a ne zastaralé z minulé smyčky. Dále přejde automat do stavu *decide_stability2*, kde si přečte hodnotu proměnné *slip* a podle její velikosti určí, zda bude třeba uvolnit brzdny tlak v kolech, či nikoli. Když je hodnota *slip* v oblasti stability, přejde automat do stavu *stable*. V opačném případě do stavu *unstable*. Z těchto stavů přechází dále do stavu *change_speed*. Při tomto přechodu aktualizuje pomocí funkce *stab_cnt()* hodnotu stability, čímž umožní další přechod v automatu *ABS*.

Poté co automat *ABS* ukončí aktuální smyčku, nastaví hodnotu proměnné *braking* na 1, čímž umožní přechod zpět do stavu *Cu_on*. Při tomto přechodu je upravena hodnota rychlosti *speed* funkcí *em_speed_update()*. Funkce rychlost buď sníží (pokud je hodnota *slip* ve stabilní oblasti), nebo ponechá stejnou, pokud *ABS* uvolní brzdny tlak.

5.6 Model čidla

Činnost čidel je simulována automatem *Sensor*. Jeho počáteční stav se nazývá *Sensor_off*. V tomto stavu čeká stejně jako automaty *ABS* a *Control_unit* na signál *engine_start*. Poté přechází do stavu *Sensor_on*.

Zde dále vyčkává, dokud od automatu *Wheel* neobdrží signál *cslip*. Po obdržení přejde do stavu *count_slip* a dále zpět do stavu *Sensor_on*. Při tomto přechodu vypočítá novou hodnotu proměnné *slip* pomocí funkce *slip_count()*, hodnotu koeficientu tření podle křivky z minulé kapitoly (viz 4.3) pomocí funkce *coef_count()*, hodnotu brzdny síly pomocí funkce *Fb_count()* a inicializuje pomocné proměnné *sum_br_force* (součet velikostí brzdny



Obrázek 5.6: Automat Sensor modelující činnost čidel na kolech

síly od začátku až do konce simulace), *braking_counter* (počet smyček, které automat vykoná, než pomyslné vozidlo zastaví) a *rdy* (signalizace pro automat *Control_unit*, že může pokračovat). Dále znovu vyčkává na signál *cslip*, aby mohl zahájit novou smyčku.

Kapitola 6

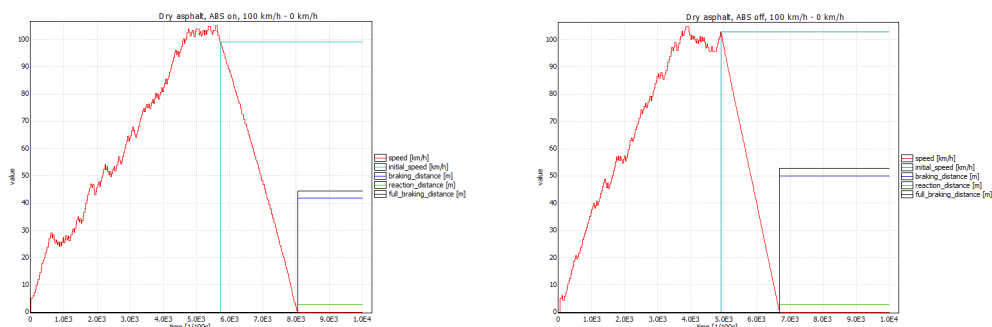
Simulace a výsledky

V této kapitole budou vyobrazeny a porovnány výsledky různých simulací prováděných s modelem. Je zde vybráno pět různých testů.

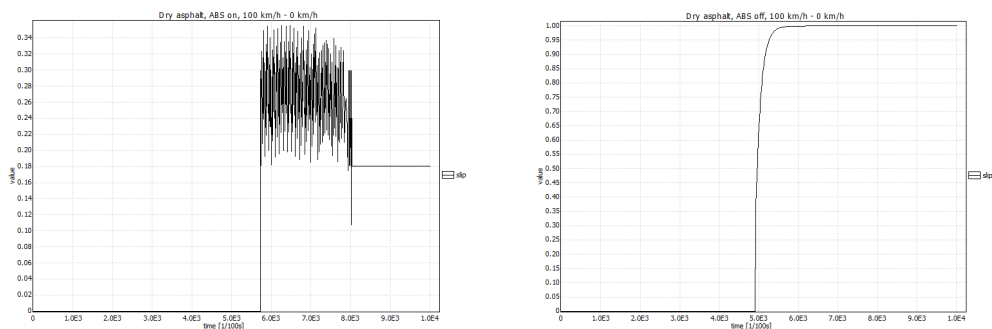
6.1 Test č. 1 - simulace průběhu nejdůležitějších veličin v případech s použitím ABS i bez něj

V tomto testu jsou ilustrace výsledků simulací s použitím ABS a bez něj na *suchém asfaltu*. Výsledky jsou porovnávány mezi sebou, a také s obdobnými simulacemi na ledě v příloze A. Obrázky výsledků simulace s ABS jsou vždy na levé straně, bez ABS na pravé straně. Ve všech případech brzdilo vozidlo z počáteční rychlosti 100 km/h. V první simulaci jsou porovnávány *rychlost* a *brzdná dráha* (obrázky 6.1 a A.1). Dále pak *skluz* (6.2, A.2), *koefficient tření* (6.3, A.3) a *úhlová rychlost* kola vůči referenční úhlové rychlosti vozidla (6.4, A.4). V poslední simulaci byla opět srovnána *rychlost* s *brzdnou dráhou*, bylo však provedeno pět pokusů pro srovnání konzistence testů.

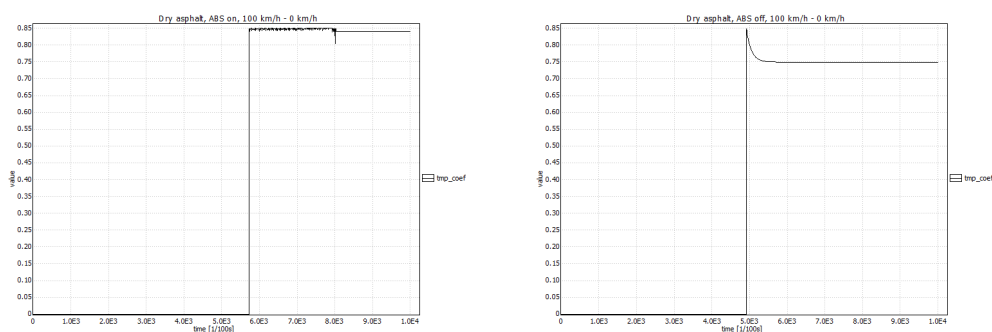
Simulaci je ve verifikátoru možno provést např. příkazem `simulate [≤10000; 1] {speed, full_braking_distance}`. Nejdříve je použito klíčové slovo `simulate`. Hodnoty v hranaté závorce znamenají, že maximální doba simulačního běhu je 10000 časových jednotek (nejedná se o reálný čas, ale o čas v simulaci) a je proveden pouze jeden běh. Ve složených závorkách jsou uvedeny názvy proměnných, jejichž průběh budeme simulovat.



Obrázek 6.1: Test 1.1 - Dry Asphalt, ABS on / ABS off, speed and braking distance



Obrázek 6.2: Test 1.1 - Dry Asphalt, ABS on / ABS off, slip



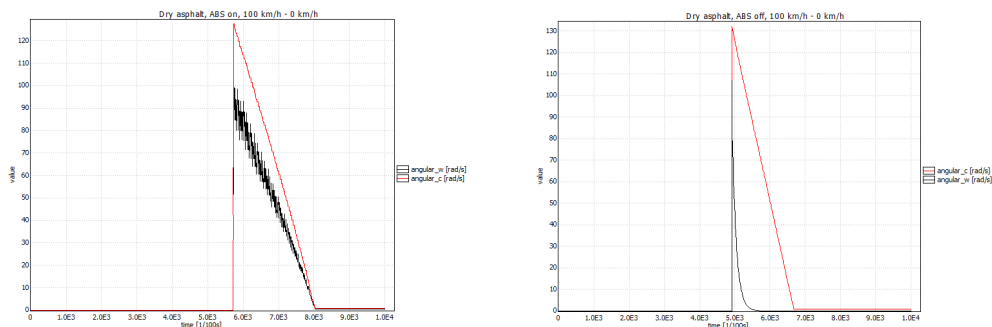
Obrázek 6.3: Test 1.1 - Dry Asphalt, ABS on / ABS off, friction coefficient

Při porovnání výsledků simulací s ABS a bez něj zjistíme, že i když se délka brzdné dráhy liší (na ledě přibližně o 50 metrů), křivka průběhu rychlosti vypadá skoro stejně. U ostatních veličin jsou však průběhy simulací velice rozdílné.

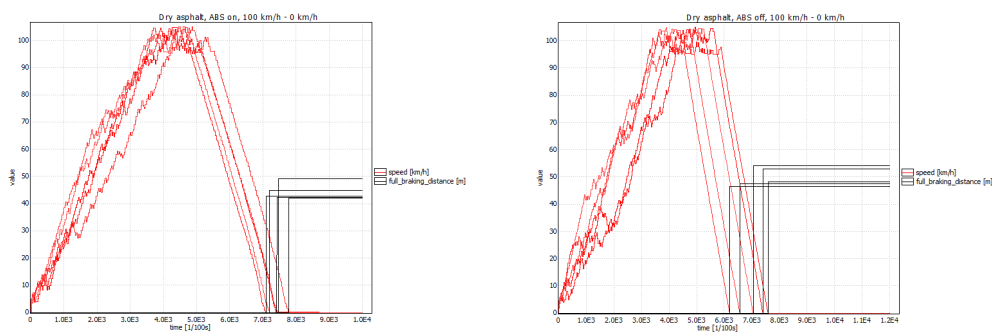
Pokud ABS průběžně neuvolňuje brzdný tlak, hodnota skluzu se nedrží v oblasti stability, nýbrž se zvýší až na hodnotu 1, kdy je skluz maximální.

Hodnota koeficientu tření, která by měla ve stabilní oblasti odpovídat hodnotě koeficientu statického tření pro daný povrch (viz 2.1), u simulací s vypnutým ABS rychle klesne na hodnotu koeficientu kinetického tření. Tím se prodlužuje délka brzdné dráhy, jak můžeme vidět ve výsledcích.

Se skluzem souvisí také rychlost kol vozidla. Na obrázcích 6.4 a A.4 vidíme, že ač referenční úhlová rychlost automobilu má stejný průběh se systémem ABS i bez něj, úhlová rychlost kola s vypnutým ABS rychle klesne na nulu, což značí, že kolo se vůbec neotáčí.



Obrázek 6.4: Test 1.1 - Dry Asphalt, ABS on / ABS off, angular speed



Obrázek 6.5: Test 1.1 - Dry Asphalt, ABS on / ABS off, speed and braking distance, 5 simulations

6.2 Test č. 2 - pravděpodobnost zastavení na určité vzdálenosti ze 100 km/h s použitím ABS i bez něj pro různé povrchy

V testu č. 1 jsme sledovali různé simulace a srovnávali průběh hodnot jednotlivých proměnných. Pokud však chceme přesnější porovnávání simulací prováděných v různých podmínkách, potřebujeme spíše číselné údaje. Srovnávání grafů je totiž mnohem obtížnější. Navíc nejsou žádné dvě simulace úplně totožné. Aby údaje co nejvíce vypovídaly o skutečném chování modelu, je třeba provést více průchodů systémem a porovnat mezi sebou i tyto výsledky. V testu č. 2 budeme tedy porovnávat pravděpodobnost daných jevů, ne grafy samotné.

Měření pravděpodobnosti provedeme ve verifikátoru např. příkazem **Pr [≤ 15000]($\langle \rangle$ time) $\langle 14900 \rangle$ && full_braking_distance $\langle 62 \rangle$** . Klíčové slovo *Pr* udává, že se jedná o výpočet pravděpodobnosti, hodnota v hranaté závorce pak značí maximální dobu jednoho běhu. Tuto hodnotu je třeba zadat o něco větší než maximální předpokládanou dobu, proměnná *full_braking_distance* (délka brzdné dráhy) totiž nabývá výsledné hodnoty až po úplném zastavení vozidla. Pokud není v hranaté závorce uveden počet běhů, je jich provedeno tolik, aby bylo dosaženo požadované přesnosti (ta je zadána v nastavení). Obsah kulaté závorky dále značí, že chceme zjistit pravděpodobnost jevu, kdy v čase větším než 14900 časových jednotek bude délka brzdné dráhy menší než 62 metrů.

V tabulkách 6.1, 6.2 (a také B.1 a B.2 v příloze B) můžeme vidět porovnání pravděpodobnosti, že vozidlo zastaví na určité vzdálenosti na *suchém asfaltu*, na *ledě* (v příloze B na *mokrém asfaltu* a *sněhu*). V každé z tabulek jsou také mezi sebou porovnány výsledky s použitím systému ABS a bez něj.

Brzdná dráha	Dry Asphalt, ABS on	Dry Asphalt, ABS off
<41 m	0-2 %	
<42 m	14-16 %	
<43 m	25-27 %	
<44 m	42-44 %	
<45 m	53-55 %	0-2 %
<46 m	65-67 %	8-10 %
<47 m	79-81 %	19-21 %
<48 m	89-91 %	32-34 %
<49 m	93-95 %	41-43 %
<50 m	98-100 %	52-54 %
<51 m		67-69 %
<52 m		72-74 %
<53 m		85-87 %
<54 m		91-93 %
<55 m		98-100 %

Tabulka 6.1: Test 2 - Suchý asfalt: pravděpodobnost zastavení za určitou vzdálenost

Délka brzdné dráhy přímo souvisí s koeficienty statického/kinetického tření pro jednotlivé povrchy. Čím větší mají hodnotu, tím větší třecí síla vzniká mezi pneumatikou a povrchem a tím rychleji vozidlo zabrzdí. Jak bylo již zmíněno u minulého testu, hodnoty koeficientů můžeme vidět v tabulce 2.1.

Koeficienty tření pro sníh (B) a led nabývají mnohem menších hodnot než pro asfalt. Brzdná dráha je tedy několikanásobně delší. Také si můžeme všimnout, že ačkoli se hodnota μ_s a μ_k u suchého asfaltu liší o 0,1 a u ledu pouze o 0,03, rozdíly délek brzdných drah s ABS a bez něj jsou na ledě mnohem větší. Nezáleží totiž na absolutní hodnotě rozdílu jednotlivých koeficientů, ale na jejich poměru mezi sebou (u suchého asfaltu je hodnota μ_k přibližně 88 % hodnoty μ_s , u ledu pouze 70 %).

Hodnoty naměřené pro různé povrchy odpovídají očekávání. V tabulce 6.3 vidíme srovnání průměrné délky brzdné dráhy pro všechny čtyři povrchy s ABS i bez něj pro lepší přehlednost.

Brzdná dráha	Ice, ABS on	Ice, ABS off
<210 m	5-7 %	
<220 m	34-36 %	
<230 m	60-62 %	
<240 m	78-80 %	
<250 m	96-98 %	
<255 m	98-100 %	11-13 %
<260 m		27-29 %
<270 m		49-51 %
<280 m		67-69 %
<290 m		80-82 %
<300 m		96-98 %
<305 m		98-100 %

Tabulka 6.2: Test 2 - Led: pravděpodobnost zastavení za určitou vzdálenost

Povrch, stav ABS	Průměrná brzdná dráha
Dry Asphalt, ABS on	44,78 m
Dry Asphalt, ABS off	49,71 m
Wet Asphalt, ABS on	60,78 m
Wet Asphalt, ABS off	67,05 m
Snow, ABS on	144,45 m
Snow, ABS off	174,79 m
Ice, ABS on	226,88 m
Ice, ABS off	272,66 m

Tabulka 6.3: Test 2 - Srovnání průměrné délky brzdné dráhy

6.3 Test č. 3 - porovnání pravděpodobnosti zastavení na určité vzdálenosti na stejném povrchu pro počáteční rychlost 100 km/h a 50 km/h

V testu č. 3 srovnáváme stejně jako u testu č. 2 pravděpodobnost zastavení na určité vzdálenosti. Neporovnáváme však mezi sebou různé povrchy nebo výsledky s ABS a bez něj, nýbrž různou počáteční rychlost. V obou následujících tabulkách jsou naměřené hodnoty na suchém asfaltu s použitím systému ABS. V tabulce 6.4 jsou však hodnoty změřené u simulací s počáteční rychlostí (než započalo nouzové brzdění) 100 km/h a v tabulce 6.5 50 km/h.

Jak můžeme vidět ve vzorci pro výpočet délky brzdné dráhy, počáteční rychlost je zde ve druhé mocnině (2.8). Pro poloviční počáteční rychlost by měla být délka brzdné dráhy tedy přibližně čtyřikrát menší (poměr nebude přesně čtyřnásobný kvůli tomu, že nelze zajistit konstantní hodnotu koeficientu μ). V tabulce 6.6 vidíme stejně jako u testu č. 2 srovnání průměrné délky brzdné dráhy. Z výsledků můžeme spočítat, že jejich hodnoty jsou v poměru asi 3,7. To přibližně odpovídá našemu předpokladu.

Brzdná dráha	Dry Asphalt, 100 km/h
<41 m	0-2 %
<42 m	14-16 %
<43 m	25-27 %
<44 m	42-44 %
<45 m	53-55 %
<46 m	65-67 %
<47 m	79-81 %
<48 m	89-91 %
<49 m	93-95 %
<50 m	98-100 %

Tabulka 6.4: Test 3 - 100 km/h

Brzdná dráha	Dry Asphalt, 50 km/h
<11 m	0-2 %
<11,5 m	24-26 %
<12 m	43-45 %
<12,5 m	68-70 %
<13 m	87-89 %
<13,5 m	98-100 %

Tabulka 6.5: Test 3 - 50 km/h

	50 km/h	100 km/h
Průměrná brzdná dráha	12,12 m	44,78 m

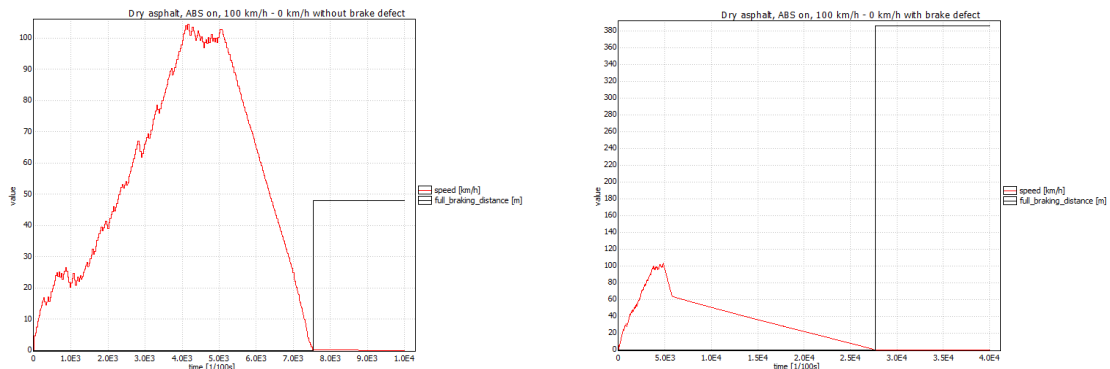
Tabulka 6.6: Test 3 - Porovnání průměrné délky brzdné dráhy

6.4 Test č. 4 - simulace poruchy brzd

V následujících testech můžeme vidět simulace poruch brzdného systému. Pro test č. 4 bylo třeba upravit automat pro simulaci činnosti řídicí jednotky. Jeho novou podobu lze vidět na obázku v příloze C. Pro spuštění simulace s defektem byla přidána nová konstanta *brake_defect*, jejíž nastavení na hodnotu 1 zapříčiní, že automat *Control_unit* přejde ze stavu *Cu_on* do stavu *Cu_on_defect* a dále pokračuje svou činnost ve speciální smyčce pro výpočet hodnot s defektem.

Nová smyčka je téměř totožná se smyčkou v původním automatu. Při každém průchodu smyčkou je však 1% šance, že se vozidlu porouchají brzdy a od této chvíle až do konce simulace se bude jeho rychlost snižovat již pouze díky odporu vzduchu a valivému odporu. Šance poruchy je naimplementována funkcí *count_defect()* a proměnnou *defect*, kam funkce ukládá svou návratovou hodnotu po každém výpočtu. Pokud je hodnota proměnné *defect* nastavena na 1, je tato skutečnost zohledněna ve funkci *Fb_count* pro výpočet velikosti brzdné síly v každém cyklu (proměnná *defect* byla přidána jako jeden ze vstupních parametrů). Funkce od této chvíle zanedbává třecí sílu a vrací upravené hodnoty.

Na obrázku 6.6 můžeme vidět srovnání normálního průběhu simulace s průběhem, kde se vozidlu porouchaly brzdy. Je patrné, že se délka brzdné dráhy mnohonásobně zvýší. Přesný poměr určit nelze, jelikož v této implementaci dojde k poruše brzd pokaždé v jiném okamžiku, který nelze přesně odhadnout.



Obrázek 6.6: Test 4 - Rychlost: normal vs. brake defect

6.5 Test č. 5 - simulace poruchy čidel

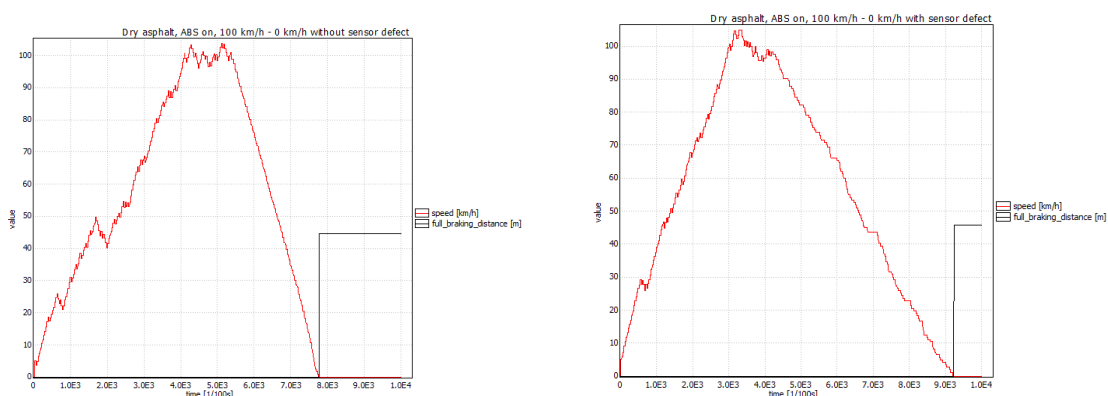
V testu č. 5 můžeme opět pozorovat poruchu. Tentokrát však čidel, která snímají rychlost otáčení kol a z ní počítají aktuální hodnotu skluzu. Zjistíme, co by se stalo, kdyby čidla místo skutečné hodnoty vygenerovala náhodnou hodnotu mezi 0 a 1 a všechny ostatní komponenty brzdového systému by dále pracovaly s touto falešnou hodnotou.

Pro tuto simulaci byl upraven automat *Sensor*. Jeho novou podobu můžeme vidět na obrázku v příloze D. Podobně jako u poruchy v testu č. 4 byla do automatu přidána nová alternativní smyčka. Automat přejde ze stavu *Sensor_on* do stavu *S_on_def*, pokud je pomocná konstanta *sensor_defect* nastavena na hodnotu 1. Dále pokračuje v nové smyčce podobně jako původní automat, hodnotu proměnné *slip* však počítá nově vytvořenou funkcí *fake_slip_count()*, která vygeneruje náhodné číslo od 0 a 1. S touto hodnotou dále pracují i ostatní funkce, projeví se to tedy i na výsledcích simulací.

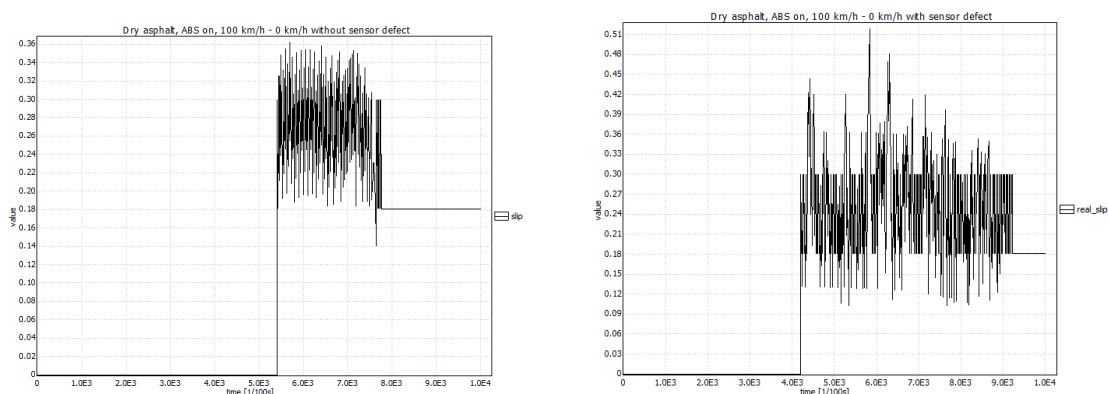
Na obrázku 6.7 vidíme porovnání průběhu rychlosti bez defektu (vlevo) a s defektem (vpravo). Ačkoli je délka výsledné brzdné dráhy skoro totožná, můžeme vliv poruchy pozorovat na zvlnění křivky rychlosti během nouzového brzdění.

Průběh velikosti proměnné *slip* nemá cenu v simulaci s poruchou zkoumat (jsou generovány náhodné hodnoty). V automatu je tedy ponechán i původní výpočet správné hodnoty, která sice není dále používána ostatními funkcemi, můžeme si však zobrazit její průběh. Tato proměnná je pojmenována *real_slip*. Jak její jméno napovídá, nabývá opravdové hodnoty skluzu kol automobilu po vozovce.

Na obrázku 6.8 vlevo lze vidět, že v simulaci bez defektu, pokud hodnota skluzu přesáhne mez 0,3, tlak v brzdách je uvolněn a hodnota opět klesne a vrátí se do oblasti stability. V simulaci s defektem (pravá strana obrázku) však toto neplatí, jelikož systém pracuje s nesprávnými hodnotami.



Obrázek 6.7: Test 5 - Rychlost: normal vs. sensor defect



Obrázek 6.8: Test 5 - Skluz: normal vs. sensor defect

V tomto testu lze narozdíl od testu č. 4 porovnávat pravděpodobnost, jelikož jsou výsledky simulací této poruchy konzistentní. Pokud porovnáme délku brzdné dráhy pro systém bez poruchy s použitím systému ABS, bez něj, a délku brzdné dráhy systému s poruchou (s použitím ABS), můžeme předpokládat, že průměrná délka brzdné dráhy u systému s poruchou bude delší než u systému bez poruchy s ABS. Systém s poruchou totiž nemůže udržo-

vat hodnotu skluzu ve stabilní oblasti, hodnota koeficientu tření je tedy menší než u systému bez poruchy.

Systém bez poruchy, který však nepoužívá ABS, by měl dle předpokladu mít průměrnou délku brzdě dráhy ještě o něco větší než systém s poruchou, jelikož hodnota skluzu je téměř po celý průběh simulace rovna jedné, hodnota koeficientu tření je tedy nejnižší. Náš předpoklad potvrzuje tabulka 6.7.

	ABS on	ABS on with defect	ABS off
Průměrná brzdě dráha	44,78 m	46,75 m	49,71 m

Tabulka 6.7: Test 5 - Porovnání průměrné délky brzdě dráhy

Kapitola 7

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala systémem ABS, jedním z nejdůležitějších bezpečnostních prvků vozidla. Nejdříve byly popsány nejdůležitější součásti brzdného systému. Dále potom historie vývoje ABS a motivace pro jeho uplatnění. Hlavními důvody jeho použití jsou zkrácení brzdné dráhy a ovladatelnost vozidla po celou dobu brzdění.

Aby bylo možné simulovat a zkoumat efekt, který má ABS na brzdění, bylo nejprve nutno narhnout model. Ten simuluje reálnou situaci, kdy řidič v automobilu jede po vozovce, před ním se objeví překážka, a on musí co nejrychleji vozidlo zastavit. Simulace musí být proveditelná s použitím systému ABS i bez něj, aby se daly výsledky srovnávat.

Model byl implementován v modelovacím nástroji UPPAAL. Výsledné grafy a tabulky byly porovnávány a analyzovány. Nejkratší délka brzdné dráhy byla dosažena na suchém asfaltu s použitím ABS.

Na závěr byl model upraven, aby mohl simulovat i určité poruchy komponent brzdné soustavy. Výsledky simulací s poruchou byly poté srovnány s výsledky bez poruchy.

Literatura

- [1] ADAC.DE. *ADAC autotest*. Listopad 2013 [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5050_Skoda_Rapid_Spaceback_1_2_TSI_Elegance/Skoda_Rapid_Spaceback_1_2_TSI_Elegance.pdf.
- [2] AGGARWAL, S. *What Are Brake Pads Made of?* Listopad 2015 [cit. 2020-1-16]. Dostupné z: <https://www.yourmechanic.com/article/what-are-brake-pads-made-of>.
- [3] ALEXANDRE DAVID, KIM GULDSTRAND LARSEN, AXEL LEGAY, MARIUS MIKUIONIS, DANNY BØGSTED POULSEN. *Uppaal SMC tutorial* [online]. Aalborg: [b.n.], 2015 [cit. 2020-5-4]. Dostupné z: <https://vbn.aau.dk/ws/files/207763747/main.pdf>.
- [4] AUTOBIBLE.EURO.CZ. *Škoda Rapid 2017 - technické údaje vznětových motorů*. Květen 2017 [cit. 2020-1-17]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/wp-content/uploads/2017/05/%C5%A0koda-Rapid-2017-%E2%80%93-technick%C3%A9-%C3%BA-daje-vzn%C4%9Btov%C3%BDch-motor%C5%AF.pdf>.
- [5] AUTO.CZ. *Škoda Rapid technické údaje*. Červen 2012 [cit. 2020-1-15]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/skoda-rapid-motory-a-technicke-udaje-67807>.
- [6] AUTOMONTI.CZ. *Brzdy a brzdový systém automobilu*. [cit. 2020-1-16]. Dostupné z: <https://www.automonti.cz/pdf/brzdy-brzdovy-system.pdf>.
- [7] BIDLINGMEYER, B. *Science Garage - Cars down to the atom*. Duben 2019 [cit. 2020-1-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLF1907chpCa7R39129VY5DyG48RgBQZBf>.
- [8] CANPOLAT, E. B. *Anti-lock Braking System (ABS)*. Famagusta, CY, 2018. Term project. Eastern Mediterranean University, Department of Mechanical Engineering.
- [9] CONVERTER.CZ. *Fyzikální vlastnosti vzduchu*. 2002 [cit. 2020-1-17]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>.
- [10] CONVERTER.CZ. *Valivé tření (valivý odpor)*. 2002 [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/valive-treni.htm>.
- [11] E-PNEUMATIKY.CZ. *Pneumatiky pro Škoda RAPID (NH) 1.2 TSI 77kW 1197ccm 5x100 11/2012 - 11/2019*. 2019 [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: <https://www.e-pneumatiky.cz/Pneumatiky/skoda/rapid-nh/1.2-tsi-77kw-1197ccm>.
- [12] FEEC VUT BRNO. *Stavový automat - UAMT*. 2017 [cit. 2020-5-21]. Dostupné z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/PC2A/prednasky/10_stavac.pdf.

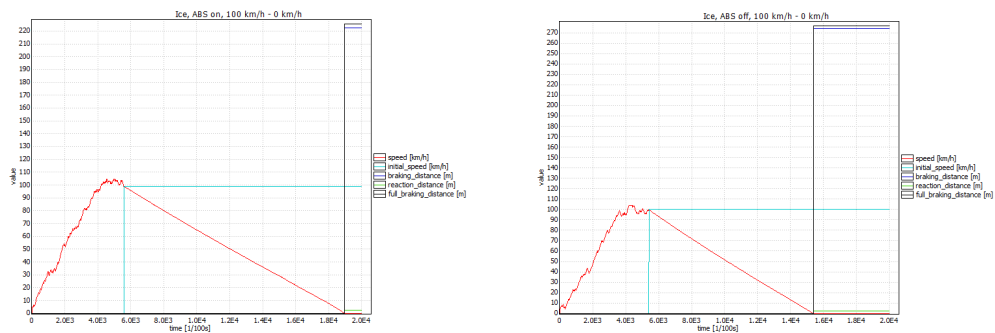
- [13] FENSKE, J. *Engineering explained - Brakes, safety and control systems*. Říjen 2015 [cit. 2020-1-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLB85E2FB44D430CDE>.
- [14] GERD BEHRMANN, ALEXANDRE DAVID, KIM GULDSTRAND LARSEN. *A Tutorial on Uppaal 4.0* [online]. Aalborg: [b.n.], 2006 [cit. 2020-5-4]. Dostupné z: <https://www.it.uu.se/research/group/darts/papers/texts/new-tutorial.pdf>.
- [15] HOLEC, D. *Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla*. Brno, CZ, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií.
- [16] HOLZNER, S. *Physics for Dummies*. 1. vyd. For Dummies, 2004. ISBN 978-0-764-55433-9.
- [17] HOUCQUE, D. *Introduction to MATLAB for engineering students*. Srpen 2005 [cit. 2020-5-19]. Dostupné z: <https://www.mccormick.northwestern.edu/documents/students/undergraduate/introduction-to-matlab.pdf>.
- [18] HPWIZARD.COM. *Tire friction and rolling resistance coefficients*. [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: <http://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html>.
- [19] JANTAČ, M. *Současný stav a vývojová tendence v konstrukci brzdových zařízení*. Brno, CZ, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [20] JURÁČEK, P. *Jízdní odpory vozidel*. Brno, CZ, 2007. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta.
- [21] KRALMOTORU.CZ. *Škoda Rapid: Technické parametry a údaje*. Červen 2017 [cit. 2020-5-6]. Dostupné z: <https://kralmotoru.cz/media/skoda-rapid-technicke-parametry-a-udaje>.
- [22] KŘENEK, A., ŠIROKÝ, A. *Návrh real-time operačního systému - řízení ABS a ESP*. Brno: [b.n.], 2013 [cit. 2020-5-26].
- [23] LAWES, J. *Car Brakes: A Guide to Upgrading, Repair and Maintenance*. 1. vyd. The Crowood Press, 2014. ISBN 978-1-847-97674-1.
- [24] MUSIL, J. *Elektronické stabilizační systémy osobních automobilů*. Brno, CZ, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [25] PERINGER, P. *Popis simulační knihovny SIMLIB*. Prosinec 1997 [cit. 2020-5-19]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>.
- [26] PERINGER, P. *Modelování a simulace (IMS) - studijní opora* [online]. Brno: [b.n.], 2012 [cit. 2020-5-4].
- [27] STRANDEL, J. *Představení možností nástroje UPPAAL* [online]. Brno: [b.n.], 2019 [cit. 2020-5-4].
- [28] TOWNSEND, B. *Static and Kinetic Friction*. [cit. 2020-1-17]. Dostupné z: http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/ben_townsend/staticandkineticfriction.htm.

- [29] UNIVERZITA KARLOVA - MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA. *Skripta - kurz fyziky pro DS* [online]. Praha: [b.n.] [cit. 2020-1-17]. Dostupné z:
https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/www/fyzika.html.
- [30] UPPAAL.ORG. *UPPAAL Stratego*. 2015 [cit. 2020-5-24]. Dostupné z:
<https://people.cs.aau.dk/~marius/stratego/intro.html>.
- [31] WONG, J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 2. vyd. Wiley-Interscience, 1993. ISBN 978-0-471-52496-0.
- [32] ZEMÁNEK, F., MIKULČÁK, J., MACHÁČEK, M. a CHARVÁT, J. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Prometheus, 2005. ISBN 80-7196-264-3.

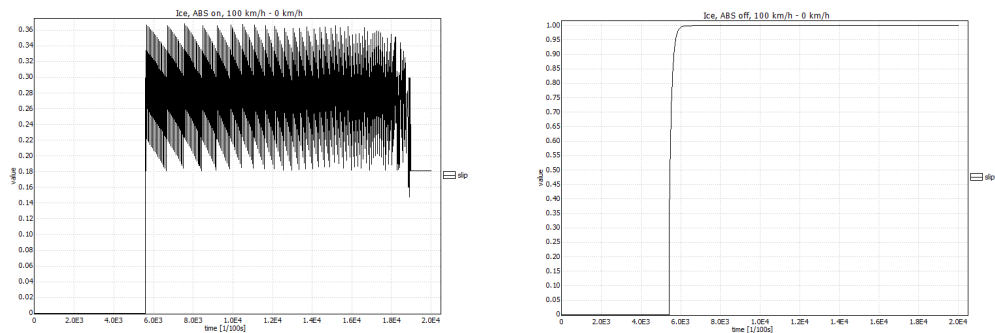
Příloha A

Test č. 1 - ilustrace k testům na ledě

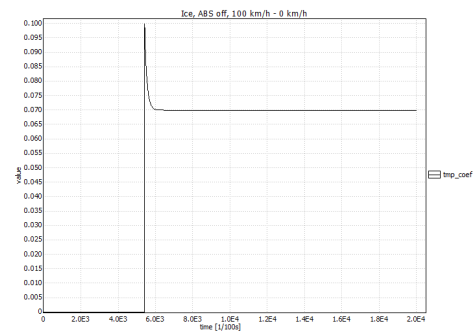
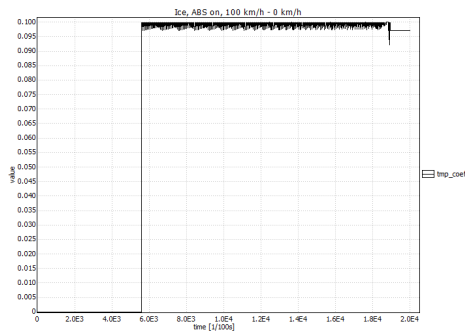
U simulací na ledě vidíme, že jejich průběh odpovídá průběhu simulací na suchém asfaltu (sekce 6.1). Kvůli výrazně nižším hodnotám koeficientů statického/kinetického tření je však brzdná dráha mnohonásobně delší.



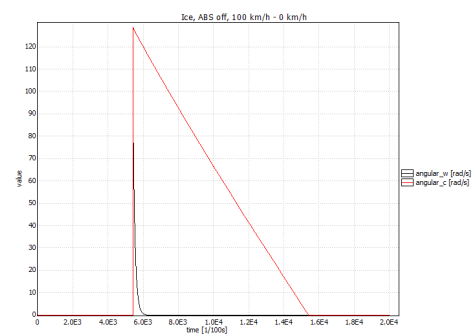
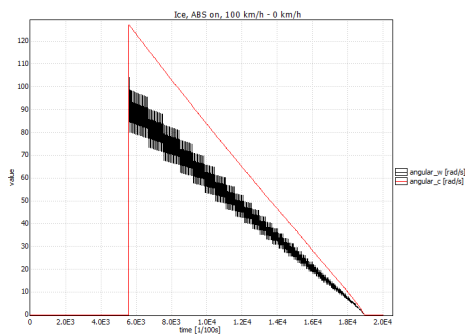
Obrázek A.1: Test 1.2 - Ice, ABS on / ABS off, speed and braking distance



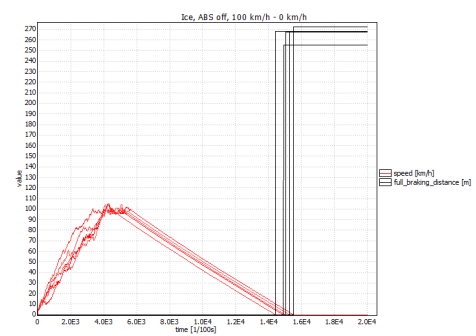
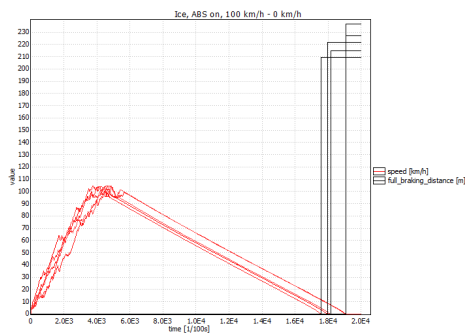
Obrázek A.2: Test 1.2 - Ice, ABS on / ABS off, slip



Obrázek A.3: Test 1.2 - Ice, ABS on / ABS off, friction coefficient



Obrázek A.4: Test 1.2 - Ice, ABS on / ABS off, angular speed



Obrázek A.5: Test 1.2 - Ice, ABS on / ABS off, speed and braking distance, 5 simulations

Příloha B

Test č. 2 - další tabulky

Brzdná dráha	Wet Asphalt, ABS on	Wet Asphalt, ABS off
<56 m	0-2 %	
<58 m	27-29 %	
<60 m	42-44 %	
<62 m	59-61 %	6-8 %
<64 m	78-80 %	33-35 %
<66 m	93-95 %	46-48 %
<68 m	98-100 %	62-64 %
<70 m		70-72 %
<72 m		80-82 %
<74 m		94-96 %
<75 m		98-100 %

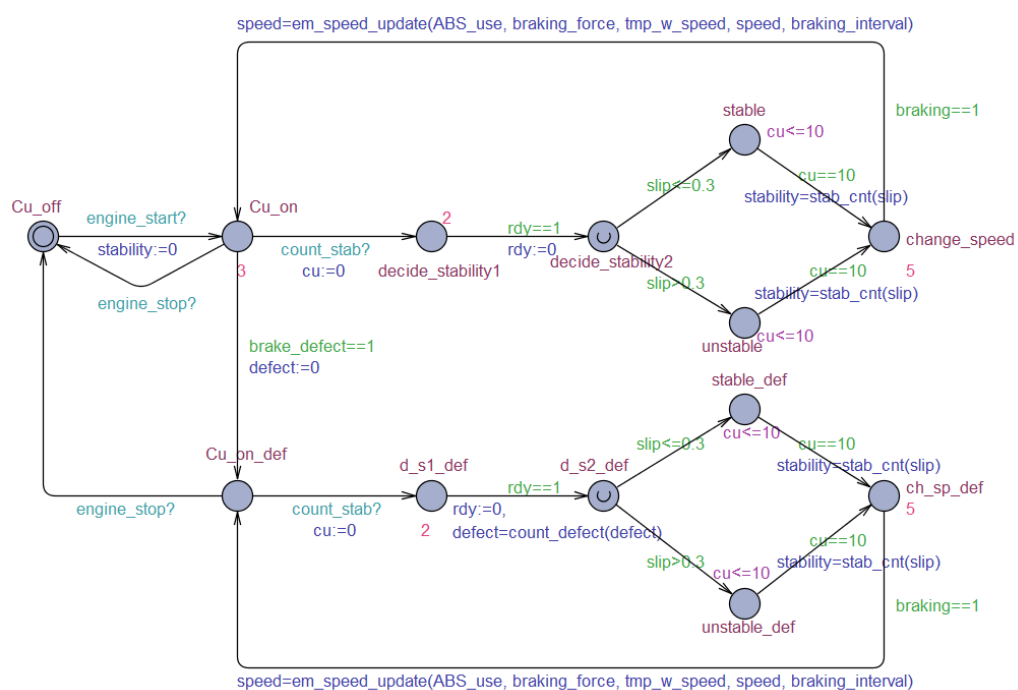
Tabulka B.1: Test 2 - Mokrý asfalt: pravděpodobnost zastavení za určitou vzdálenost

Brzdná dráha	Snow, ABS on	Snow, ABS off
<135 m	9-11 %	
<140 m	37-39 %	
<145 m	54-56 %	
<150 m	73-75 %	
<155 m	83-85 %	
<160 m	98-100 %	
<165 m		12-14 %
<170 m		37-39 %
<175 m		58-60 %
<180 m		70-72 %
<185 m		82-84 %
<190 m		92-94 %
<195 m		98-100 %

Tabulka B.2: Test 2 - Sníh: pravděpodobnost zastavení za určitou vzdálenost

Příloha C

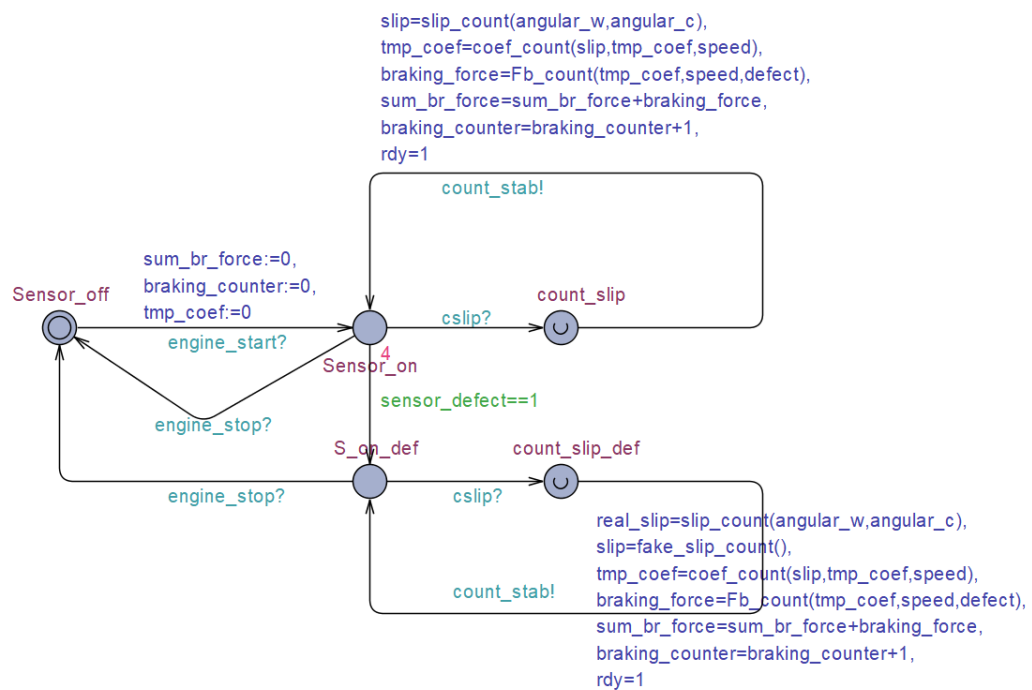
Test č. 4 - upravený automat Control_unit



Obrázek C.1: Upravený automat řídicí jednotky pro simulaci defektu brzd

Příloha D

Test č. 5 - upravený automat Sensor



Obrázek D.1: Upravený automat čidla pro simulaci jeho defektu