



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

VLIV ESP/ESC NA CHOVÁNÍ VOZIDLA

ESP/ESC IMPACT TO BEHAVIOR OF VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FILIP WEIGEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF STRNADEL, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



21569

Student: **Weigel Filip**
Program: Informační technologie
Název: **Vliv ESP/ESC na chování vozidla**
ESP/ESC Impact to Behavior of Vehicle

Kategorie: Modelování a simulace

Zadání:

1. Zdokumentujte základní pojmy a principy související s činností Electronic Stability Program/Control (ESP/ESC) v automobilech a proveďte rešerši v oblasti prostředků modelování systémů a analýzu jejich vlastností.
2. Navrhněte vhodnou abstrakci automobilu, jeho okolí a komponent klíčových z pohledu ESP/ESC 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 ESP/ESC a poté ii) na bázi ESP/ESC 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 ESP/ESC a vozidla s ESP/ESC.
5. Diskutujte a zhodnoťte možnosti vytvořeného modelu z hlediska sledování dějů a analýzy vlivů zmíněných v bodu 3 a navrhněte možné směry pokračování v projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

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

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: 14. května 2020

Datum schválení: 25. října 2019

Abstrakt

Práce se zabývá aktivním prvkem bezpečnosti vozidel - ESP. Systém ESP velmi významně pomáhá se stabilizací vozidla při zatáčení. Práce rozebírá modelování, princip fungování brzd, popis podřízených systémů - ABS a ASR, fyzikální jevy a síly, vzorový příklad, rozbor problému, návrh modelu, implementaci modelu a vyhodnocení experimentů s modelem v prostředí UPPAAL. Cílem práce je prokázat, že systém ESP pomáhá stabilizovat vozidlo při zatáčení pomocí simulačního modelu vozidla. Výsledky jsou prezentány v přehledných grafech. Z grafů lze analyzovat chování vozidla s ESP a bez ESP.

Abstract

This bachelor thesis focuses on active safety - ESP. System ESP greatly improves stability of vehicle while turning. The thesis analyses modelling, brake functionality, subordinate systems of ESP - ABS and ASR, physical forces and phenomenons, model example, analysis of problem, design of model, implementation of model and experiments evaluation of implemented model in UPPAAL enviroment. The goal of the thesis is to prove that ESP system helps to stabilize vehicle while turning by simulation of vehicle model. Results are presented in well-arranged graphs side-by-side. It is possible to analyze the behaviour of vehicle while turning with ESP or without ESP.

Klíčová slova

akcelerační zrychlení, akcelerace, bezpečnost, brzdy, brzdná dráha, bubnové brzdy, ESC, ESP, fyzika, graf, kotoučové brzdy, model, modelování, nedotáčivost, odstředivé zrychlení, pneumatiky, přetáčivost, stabilita, stabilita při zatáčení, systém ESP, UPPAAL, výsledky, zatáčení, zatáčka

Keywords

acceleration, brakes, brake distance, centrifugal force, drum brakes, disc brake, ESC, ESP, ESP system, evaluation, graph, model, modelling, oversteer, physics, safety, stability, stability while turning, turn, turning, tires, understeer, UPPAAL

Citace

WEIGEL, Filip. *Vliv ESP/ESC na chování vozidla*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Josef Strnadel, Ph.D.

Vliv ESP/ESC 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.

.....
Filip Weigel
28. května 2020

Poděkování

Srdečně bych chtěl poděkovat panu Josefu Strnadelovi za poskytnuté materiály, rady, znalosti a velmi kvalitní vedení při tvorbě bakalářské práce. Taktéž svojí rodině za podporu, trpělivost a přítelkyni Sabíně, která mě psychicky podporovala v této nelehké době.

Obsah

1	Úvod	2
2	Modelování a simulace systémů	3
2.1	Přehled pojmů	3
3	Součásti řešeného systému	6
3.1	Brzdy a brzdové okruhy	6
3.2	Kotoučové brzdy	8
3.3	Bubnové brzdy	9
3.4	Brzdná dráha	10
3.5	ABS	11
3.6	ASR	13
3.7	ESP	15
3.8	Fyzikální jevy a síly důležité pro práci systému ESP	19
3.9	Vzorový příklad	21
4	Návrh a implementace modelu	22
4.1	Prostředí UPPAAL	22
4.2	Návrh řešení a abstrakce systému	22
4.3	Model motoru	24
4.4	Model řídicí jednotky	25
4.5	Model zatáčky	25
4.6	Model ESP	26
4.7	Model kola	26
4.8	Model řidiče	27
4.9	Použité konstanty	28
4.10	Vzorový test	30
5	Zhodnocení vlastností modelu	32
5.1	Test A: Průjezd zatáčkou o poloměru 25 metrů rychlostí $70kmh^{-1}$, sucho	32
5.2	Test B: Průjezd zatáčkou o poloměru 35 metrů rychlostí $60kmh^{-1}$, mokro	34
5.3	Test C: Průjezd zatáčkou o poloměru 35 metrů rychlostí $60kmh^{-1}$, mokro/led	36
5.4	Test D: Porovnání chování vozidel různé hmotnosti	38
5.5	Pravděpodobnostní testy	40
6	Závěr	43
	Bibliografie	45

Kapitola 1

Úvod

Svět bez dopravních prostředků si v dnešní době téměř nelze představit. Setkáváme se s nimi na každém kroku. Neustále zvyšující se produkce tlačí ceny nových automobilů dolů, a proto se stávají dostupnější pro každého z nás. Negativním faktorem se stává přehlcení pozemních komunikací po celém světě, která má za důsledek zvýšenou nehodovost. Výrobci automobilů jsou tedy nuceni neustále modernizovat vozidla a jejich bezpečnost.

Nové automobily jsou ekologičtější k životnímu prostředí z hlediska vyprodukovaných emisí, rovněž jsou i bezpečnější. Z hlediska bezpečnosti se jedná o prvky pasivní a aktivní bezpečnosti. Pasivním prvky bezpečnosti jsou prvky, které se snaží minimalizovat následky havárie. Řadíme mezi ně například bezpečnostní pásy, airbagy, deformační zóny automobilu či tuhost karoserie.

Aktivními prvky bezpečnosti jsou prvky, které se snaží zabránit nebo předejít nehodě. V odvětví aktivních prvků se vyskytují pojmy jako brzdy, správně nastavená geometrie vozidla, ale i pokročilé elektronické systémy. Patří mezi ně například systém ABS, ASR, ESP/ESC, hlídání jízdního pruhu, adaptivní tempomat a mnohé další.

Kapitola 2

Modelování a simulace systémů

V následující kapitole se bude práce zabývat termíny, které jsou důležité pro pochopení modelovaného systému. Bude velmi důležité pochopit, proč vlastně modely vznikají, jaké mají výhody a nevýhody.

2.1 Přehled pojmů

System:

Jedná se o soubor elementárních částí - prvků systému - které mají mezi sebou určité vazby. Systémy se dělí na reálné a nereálné. [23]

Model:

Je to napodobenina systému jiným systémem. Model reprezentuje znalosti o systému. Model si lze představit jako soustavu diferenciálních rovnic popisující let rakety, nebo ekvivalent rakety ve tvaru blokového schématu. [23]

Modelování:

Proces vytváření modelů systému. Modelovat lze jen to, co je známé a popsitelné. Jedná se o náročný proces, který vyžaduje znalosti o modelovaném systému. Kvalita vytvořeného modelu zásadně ovlivní výsledky získané experimentováním. [23]

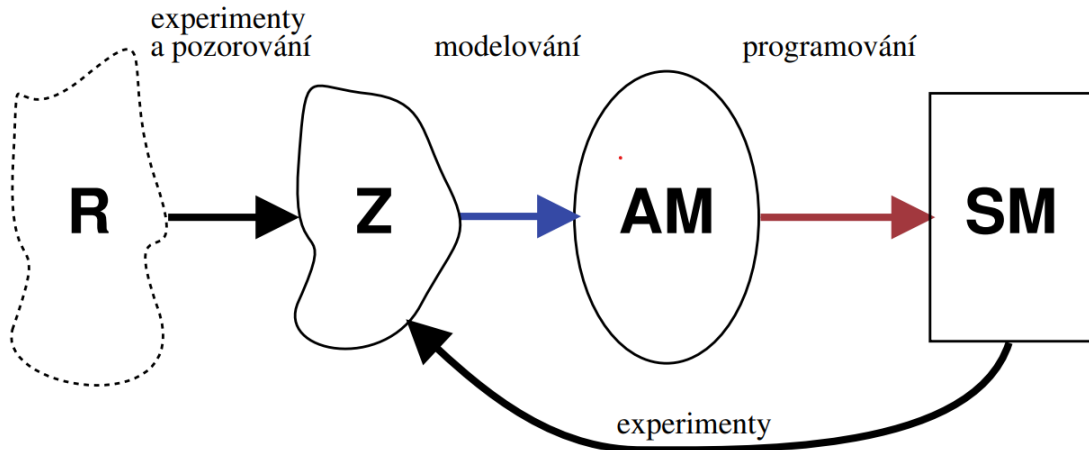
Simulace:

Metoda získávání znalostí o systému experimentováním s jeho modelem. Pro účely simulace musí být model popsán korektním způsobem, a ne každý model je vhodný pro simulaci. Cílem simulace je získat nové znalosti o modelovaném systému z různých vstupních veličin. [23]

Etapy modelování:

Vhodný postup při modelování je následující: [23]

- **Realita**, ze které je zapotřebí zjistit co nejvíce podstatných informací pro modelovaný systém - **znalosti**.
- Vytvoření tzv. **abstraktního modelu**. Tento model nezahrnuje úplně všechny znalosti o modelovaném systému, protože v počítačích je nemožné popsat komplexní chování reálného světa. Zachycuje pouze stěžejní vlastnosti, které jsou pro systém podstatné. Dosáhne se podstatného zjednodušení modelu. Abstraktní model může mít formu matematických rovnic, Petriho sítí, Turingových strojů atd.
- Následuje vytvoření **simulačního modelu**. Ten je vytvořen na základě abstraktního modelu a dále nic nezjednodušuje. Musí obsahovat všechny vlastnosti abstraktního modelu. Rozdíl mezi abstraktním a simulačním modelem je ten, že se simulačním modelem je možné provádět experimenty. Jedná se tedy o spustitelný program, který na základě počátečních stavů, vstupů a parametrů modelu počítá výsledky.
- Se simulačním modelem následuje provádění experimentů. Je nutné systém **verifikovat a validovat**. Tím se zjistí, zda je model správný a odpovídá požadavkům.
- Model je verifikován a validován. Výstupem simulačního modelu je tedy analýza a interpretace výsledků, které vedou k **získání nových informací** o zkoumaném systému.



Obrázek 2.1: Realita → Znalosti → Abstraktní model → Simulační model (viz [23])

Využití modelů v praxi:

- **Věda:** biologie (model člověka), astronomie (modely galaxií), ekologie (koloběh vody), chemie (chemické reakce), jaderná fyzika (model jad. reaktoru)
- **Technika:** strojírenství (dynamika konstrukcí), stavebnictví (model budovy), doprava (model dopravní situace), elektrotechnika (model mikroprocesoru), automobilový průmysl (model auta)
- **Ekonomika:** vývoj cen na burze
- **Film:** vizuální efekty
- **Hry:** simulátor letadla, simulátor tanku
- **A mnoho dalších ...** [23]

Výhody modelů:

- **Cena:** př. crash testy automobilů. Je levnější vyrobit model automobilu a s ním experimentovat, než z důvodu získání nových znalostí ničit nově vyrobené automobily.
- **Rychlost:** reálný čas zrychlit nelze. V modelech je možné čas „urychlit“ a simulovat například pohyb planet, růst rostlin, krystalů.
- **Bezpečnost:** nehrozí žádná katastrofa v případě selhání simulačního modelu. Proto lze bezpečně simulovat např. jaderný výbuch, šíření epidemií.
- **Někdy jediný způsob:** lze simulovat velmi nepravděpodobné jevy, jako srážky galaxií. [23]

Nevýhody modelů:

- Problém **validity modelu**.
- **Někdy vysoká náročnost** na vytváření modelu.
- Náročnost na výkon počítačů.
- Z simulací vystupují konkrétní výsledky a i v případě nepatrné změny v systému je nutné simulaci opakovat.
- Nepřesnost numerických řešení. [23]

Kapitola 3

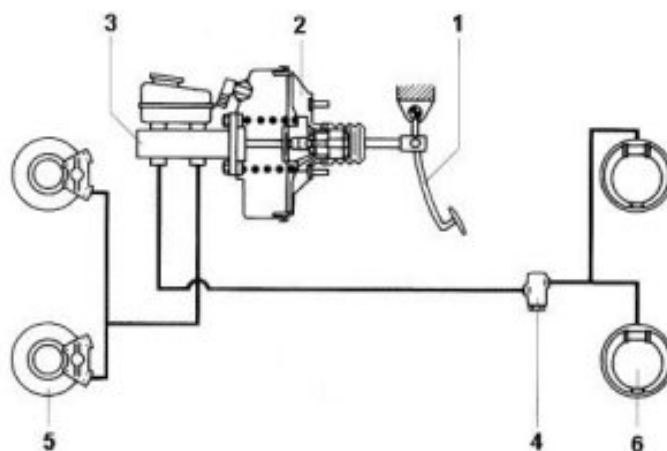
Součásti řešeného systému

V této kapitole budou popsány základní pojmy, které souvisí se samotným systémem ESP. Pro správné pochopení principu systému ESP je nutno se seznámit s pojmy jako brzdy, součásti brzd, brzdná dráha, systém ABS, systém ASR a další.

3.1 Brzdy a brzdové okruhy

Brzdy na motorovém vozidle jsou absolutně nedílnou součástí. Představit bude vhodné pouze bubnové a kotoučové brzdy, jelikož ostatní typy brzd se v automobilech nevyskytují. Jedná se o mechanické zařízení, které vlivem tření mezi rotující částí kola (rotor/buben) a statickou částí brzdy (brzdové destičky/brzdové obložení) připevněnou na nápravě vozidla způsobí zpomalení vozidla. Produktem zvýšeného tření je teplo. Po sešlápnutí brzdového pedálu dochází ke zvýšení tlaku v hydraulickém okruhu brzd a dochází ke zpomalování vozidla. V dřívějších dobách se používaly na vozidla bubnové brzdy, avšak se od jejich používání upouští. Na levnějších a malých autech bývá zpravidla přední náprava brzděna kotoučovými brzdami a náprava zadní bubnovými brzdami. U zmíněných levných aut se kotoučové brzdy montují na přední nápravu z důvodu většího výkonu a zpravidla větší váhy na přední nápravě, vlivem těžkých součástí typu motor, převodovka, diferenciál a podobně. [14]

Na níže uvedeném obrázku jsou popsány základní součásti hydraulického okruhu. Skládá se z brzdového pedálu (1), posilovače (2), dvouokruhového hlavního válce s nádobkou (3), brzdového potrubí, omezovače brzdového tlaku (4), brzd přední (5) a zadní (6) nápravy. [1]

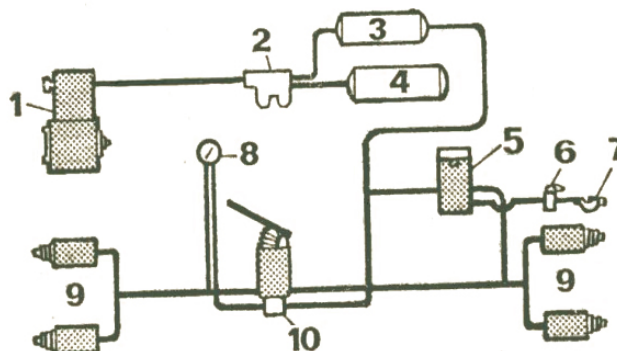


Obrázek 3.1: Součásti hydraulického okruhu (viz [2])

Nákladní automobily najezdí několikanásobně více kilometrů než automobily osobní, a proto je zde kladen důraz na vyšší bezpečnost proti zvýšenému namáhání a opotřebení všech součástí. Taktéž dochází k časté výměně návěsů/přívěsů, a proto se zde nepoužívají pouze hydraulické brzdné okruhy. Využívají se zde tzv. vzduchové brzdné okruhy, které pro vytvoření brzdného tlaku nevyužívají brzdovou kapalinu jako médium, neboť využívají stlačeného vzduchu. U motoru je umístěn kompresor, který je poháněn klínovým řemenem od motoru. Kompresor vytváří tlak až 12 bar a stlačený vzduch se přepouští do tlakových nádob (vzduchojem), kde je stlačený vzduch uskladněn. Při sešlápnutí brzdového pedálu dojde k postupnému zvýšení tlaku v brzdovém okruhu, tlak je aplikován na brzdové válce, které tlačí na brzdíče (brzdová destička/brzdový třmen) způsobující zpomalení vozidla.[26]

Vzduchové okruhy je podstatně jednodušší spřáhnout dohromady na rozdíl od hydraulických obvodů. Hydraulické obvody jsou velmi náchylné na tzv. zavzdušnění, které znamená pokles tlaku v brzdném systému a důsledkem toho může být až fatální selhání brzd, kdy může dojít k úplné ztrátě brzdného účinku. Pro použití vzduchového okruhu v nákladních automobilech existuje ještě jedna velká výhoda, která vychází z konstrukce brzdového okruhu. Téměř v každém nákladním automobilu je minimálně jedna náprava brzděna opačným principem než ostatní nápravy. Pokud je vzduchový okruh zcela vyprázdněn, nebo je přítomen pouze malý tlak náprava zůstane zabrzděna, dokud okruh není natlakován na požadovanou hodnotu.[26]

Opačného chování je docíleno za pomoci velmi silné pružiny umístěné v brzdovém válci, která rozpírá brzdíče a tlačí je proti bubnu brzdy. Tím dochází k aplikaci plné brzdné síly a náprava je tedy zabrzděna. Až se vzduchový okruh natlakuje na požadovanou mez, dojde k přetlačení pružiny tlakem vzduchu a náprava se odbrzdí. K brzdění této nápravy dochází upouštěním tlaku ze systému a částečným roztáhnutím pružiny. Dochází k významnému zlepšení bezpečnosti vozidla. Pokud se stane závada na brzděném systému a začne unikat vzduch, náprava je zabrzděna a vozidlo zastaví. [26]

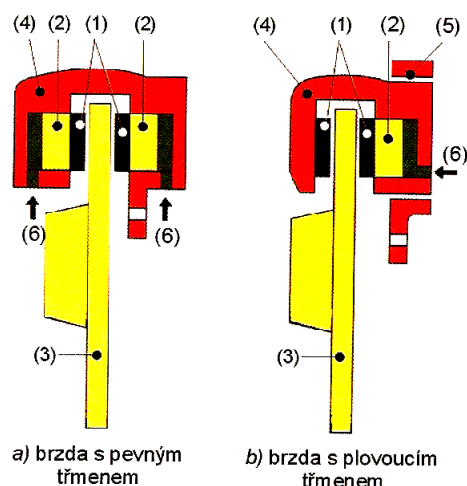


Obrázek 3.2: Schéma vzduchového okruhu: (1) Kompresor, (2) Vyrovnávač tlaku, (3) Pohotovostní vzduchojem, (4) Zásobní vzduchojem, (5) Brzdíč přívěsu/návěsu, (6) Uzavírací kohout, (7) Spojková hlava, (8) Tlakoměr, (9) Brzdové válce, (10) Pedál brzdy (viz [3])

3.2 Kotoučové brzdy

Kotoučová brzda je z konstrukčního hlediska jednodušší na výrobu, přesnější, výkonnější a spolehlivější než brzdy bubnové, a proto brzdy bubnové se v automobilovém průmyslu pomalu stávají historií. Základními součástmi kotoučové brzdy jsou: kotouč, brzdová destička, brzdový třmen a brzdový pístek. Kotouč je část brzdy, která se společně s kolem otáčí. Zbylé součásti jsou připevněny k nápravě a nerotují. Brzdový třmen je statická součást, ve které je uložen pístek a brzdová destička. Dříve se používaly tzv. pevné třmeny, které měly pístky z obou stran, dnes se z důvodu jednodušší výroby používají tzv. plovoucí třmeny. [8]

Stlačením brzdového pedálu vede k zvýšení tlaku na pístek a ten následně vytlačuje brzdové destičky proti otáčejícímu rotoru. Vlivem zvýšeného tření dochází ke zpomalování kotouče. Kinetická energie je přeměněna na nežádoucí teplo, které zahřívá brzdovou destičku i brzdový kotouč. Zvýšená teplota má za následek ztrátu části brzdné síly, která může vést až ke selhání brzdy. Výrobci se snaží předejít nežádoucímu jevu, jež je zahřívání kotouče pomocí přidání legovacích prvků. Brzdový kotouč má ve valné většině případů tvar talíře. Kotouč je rovněž zhotoven ze dvou talířů spojených k sobě. Mezi těmito talíři je vzduchová mezera, která vlivem proudění vzduchu lépe ochlazuje kotouč. [8]



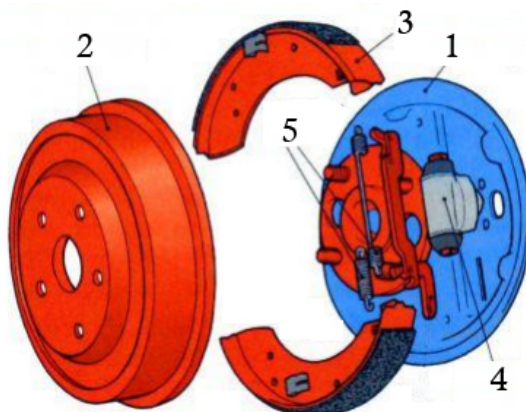
Obrázek 3.3: Schéma kotoučové brzdy: (1) Brzdové destičky, (2) Brzdový pístek, (3) Brzdový kotouč, (4) Brzdový třmen, (5) Držák brzdy, (6) Brzdová kapalina (viz [4])

3.3 Bubnové brzdy

Založena je na stejném principu jako brzdy kotoučové zmíněné v předchozí části. Základními součástmi jsou: štít brzdy, brzdový buben, dvě brzdové čelisti, vratné pružiny a brzdový váleček. Rotuje pouze jedna část brzdy a tou je buben, na kterém je připevněno kolo vozidla. Štít brzdy je staticky přichycen k nápravě. Štít slouží jako ochrana proti nečistotám a zároveň jsou k němu přichyceny i všechny zbylé součásti. Brzdové čelisti mají tvar půlměsíce a je k nim přichyceno brzdové obložení. Na štítu brzdy jsou zpravidla dva čepy, na které se nasunou brzdové čelisti, které jsou tímto uchyceny ke štítu. [8]

Z jedné strany je tedy čelist nasunuta na brzdovém štítu a na druhé straně půlměsíce je tlačena vratnými pružinami proti brzdovému válečku, nebo v dřívějších dobách proti excentrickému válečku. Při sešlápnutí pedálu se brzdový váleček vlivem vysoké nestlačitelnosti brzdové kapaliny vysune na obou stranách a tlačí brzdové čelisti s obložení proti bubnu brzdy. Vlivem zvýšeného tření opět dochází k přeměně kinetické energie na teplo a dochází ke zpomalování kola. Pokud je brzdový pedál povolen, tlačí vratné pružiny brzdové čelisti do původní polohy a brzda přestane brzdit. [8]

Výhoda proti brzdě kotoučové je spočívá hlavně v delší životnosti brzd. Hlavně proto jsou bubnové brzdy hojně využívány například v nákladní dopravě. Tahač, či přední náprava kamionu jsou zpravidla vybaveny kotoučovými brzdami a zbylé nápravy jsou osazeny brzdami bubnovými. Větší životnost je jediná výhoda oproti brzdě kotoučové. I přesto, že je bubnová brzda větší a zároveň těžší neposkytuje tak dobrou výkonnost jako brzda kotoučová. Mnohem náchylnější je k zahřívání, jelikož chladicí schopnosti jsou horší ve srovnání s kotoučovou brzdou. Pokud zahříváme brzdu dlouhodobě může dojít k deformaci bubnu, které způsobí zablokování kola k němu připevněnému.[8]



Obrázek 3.4: Schéma bubnové brzdy: (1) Štít brzdy, (2) Brzdový buben, (3) Brzdová čelist, (4) Brzdový váleček, (5) Vratné pružiny (viz [8])

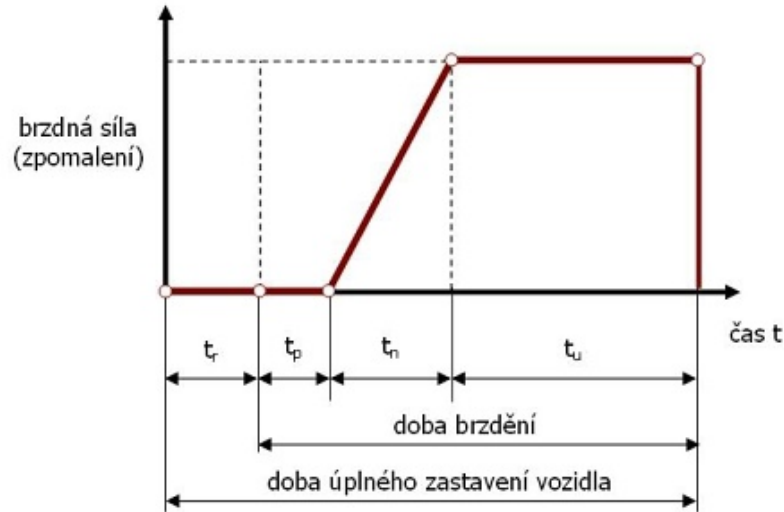
3.4 Brzdná dráha

Je vzdálenost, na které je vozidlo schopnosti zastavit z počáteční rychlosti. Dráha potřebná ke zpomalení vozidla je dána základními faktory: hmotnost vozidla, kvalita brzdného systému a přilnavost pneumatik. Okamžik mezi zpozorováním překážky až k vyvození síly na brzdový pedál se nazývá reakční doba t_r . Skládá se z reakční doby řidiče a z doby, která uplyne při přiložení nohy z plynového pedálu na brzdový pedál. [26]

Příklad reakční doby:[12]

- | | |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. Koncentrovaný a zkušený řidič | 0.2–0.5 sekundy |
| 2. Průměrný řidič | 0.8 sekundy |
| 3. Řidič pod vlivem alkoholu | 1.7 sekundy |

Mezi okamžikem, kdy začne řidič působit na brzdový pedál a časem, kdy se začne projevovat účinek brzdění uplyne doba prodlevy brzdění t_p , během této doby se musí překonat vůle v brzdovém okruhu a brzdové obložení musí dolehnout na třecí plochu brzd. Po dobu $t_r + t_p$ je při zanedbání brzdného účinku vlivem jízdnic odporů rychlost dráhy stálá a rovna počáteční rychlosti. Za danou dobu ujede vozidlo určitou dráhu. Řidič poté zpravidla brzdí plným tlakem na pedál brzdy, než vozidlo uvede do stavu úplného zastavení. [26]



Obrázek 3.5: Časový diagram náběhu brzdění: (t_r) Reakční doba, (t_p) Doba prodlevy brzdění, (t_n) Doba náběhu brzdění, (t_u) Doba maximálního brzdění (viz [26])

3.5 ABS

Motivace

Pokud vozidlo nouzově brzdí (plně stlačený brzdový pedál) a není vybaveno systémem ABS dojde k zablokování kola, nadměrnému zahřívání, které může vést až k explozi pneumatiky a zvýšenému opotřebení v místě skluzu. Materiál, který se obrušuje při zablokování kola má za vliv menší přilnavost k povrchu. Vyšší teplota má za následek rovněž snížení přilnavosti. Zablokované kolo je neřiditelné, pohybuje se setrvačností posledním udaným směrem. To je směr, kterým se kolo pohybovalo v okamžiku zablokování. Vozidlo se tedy stává neřiditelné. Pokud vozidlo brzdí do zatáčky, tak po zablokování kol opustí směr pohybu po tečně. Pokud vozidlo nezastaví, nebo nedojde k odblokování kol, dojde k vyjetí z vozovky.[24]

První historický ABS systém je datován již roku 1920. Gabriel Voisin experimentoval se systémem, který upravoval tlak v brzdovém válci a tím dokázal zamezit skluzu kola. Firma Bosch si nechala patentovat v 1936, "Zařízení k zabránění silného brzdění kol motorového vozidla". [22] Systém byl finančně poměrně nákladný, proto se uplatnil zejména v leteckém a železničním průmyslu.

U nákladních automobilů znamená ztráta kontroly při brzdění velké riziko, jelikož je vůz neovladatelný a havárie s nebezpečným nákladem by mohla znamenat obrovské škody nejen majetkového charakteru. V roce 1978 firma Bosch představila systém ABS 2S. První sériově vyráběné auto se systémem ABS byl Mercedes-Benz W116. Konkurence na sebe nenechala dlouho čekat a odpovědí bylo nasazení systému ABS do BMW řady 7. Jednalo se o luxusní automobily ve kterých si výrobci takto nákladný systém mohli dovolit. [22]

Dnes je systém ABS považován za samozřejmost a je ním vybaveno každé novější auto. ABS se tedy stalo velmi důležitou součástí aktivní bezpečnosti nejen v automobilovém průmyslu.

Princip

Každé kolo má snímač, který vyhodnocuje jeho otáčení a rychlost.[24] Tato hodnota je porovnávána s referenční rychlostí vozidla. Při prudkém brzdění se může stát, že se kolo zablokuje. Snímač detekuje velký rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a rychlostí vozidla. Řídící jednotka situaci vyhodnotí a na krátký okamžik sníží tlak v brzdovém válci, čímž dojde k snížení brzdného účinku. Kolo se po snížení tlaku začne opět otáčet a tlak v brzdovém válci se opět zvýší. Poté se celý proces opakuje a senzor opět snímá kolo, zda nedošlo k blokaci kola. Tento proces se může opakovat 10 - 15x za sekundu. Snahou ABS je tedy udržet vozidlo ovladatelné s maximálním brzdným účinkem. Pokud dojde k aktivaci systému ABS, začne na přístrojovém panelu blikat kontrolka.[15]

Součásti ABS - Řídící jednotka

Má dvě základní funkce. Funkci diagnostickou a funkci řídicí. Řídí správný chod systému ABS porovnáváním obvodové rychlosti kola a referenční rychlosti vozidla, kterou zjistí z řídicí jednotky automobilu. Řídí další součásti systému ABS, aby vykonávali požadovanou funkci (zvýšení brzdného tlaku, snížení a udržování brzdného tlaku). Skládá se z dvou pracovních systémů, které shromažďují ze snímačů totožné údaje, které se vyhodnocují v řídicí jednotce. Očekává se, že oba systémy při totožných vstupech poskytnou i totožné výsledky. Systém nacházející se ve zmíněném stavu pracuje správně. Pokud se vypočítané údaje liší, řídicí jednotka vyhodnotí situaci a zjistí, že vstupní data jsou nesprávná. [18] Chybná data by mohly znamenat špatnou funkci systému ABS. Snímač by mohl například detekovat zablokané kolo i v případě, že by kolo zablokané nebylo a snižovat brzdný efekt. Systém se proto sám vypne a rozsvítí se kontrolka ABS na přístrojové desce indikující závadu na systému ABS.[24]



Obrázek 3.6: Kontrolka systému ABS (viz [5])

Součásti ABS - Elektromagnetický ventil

Je to ventil, který reaguje na změny v napětí. Pokud na je na cívku přivedené dostatečné napětí, přitáhne jádro směrem k cívce. Potrubí se otevře a kapalina může proudit. Ventil přivádí na kola brzdny tlak. Má tři fáze. [22]

- | | |
|--------------------|---|
| 1. Zvýšení tlaku | Brzdny účinek není maximální, a proto dojde ke zvýšení tlaku pro docílení maximálního brzdneho účinku. |
| 2. Udržování tlaku | Tlak je konstantní, dochází k téměř maximálnímu brzdneho účinku a kolo zůstává nezablokované. |
| 3. Snížení tlaku | Brzdova kapalina se odvádí zpět do zásobníku tlaku a dále do brzdového okruhu. Nastává při zablokovaném kole. |

Zhodnocení

Systém ABS je v současné době nepostradatelným pomocníkem v automobilovém průmyslu. V určitých případech může mít vozidlo kratší brzdnu dráhu bez systému ABS. Může se tak stát například na suché vozovce, kdy systém ABS může uměle snižovat tlak v brzdnom okruhu a prodloužit tak mírně brzdnu dráhu. Systém ABS ale umožňuje lépe ovládat vozidlo v kritických situacích, které vyžadují intenzivní brzdění. Zvýšená bezpečnost zejména v nepříznivých situacích jako déšť, sníh, led je nesporná výhoda. Systém v dnešní době nepředstavuje nijak značnou finanční zátěž, a proto jeho klady převáží drobné nevýhody.

3.6 ASR

Motivace

Původ zkratky vychází z německého **A**ntriebs**S**chlupf**R**egelung, či anglického **A**nti **S**kid **R**egulation. Při rozjezdu vozidla, nebo při akceleraci v libovolné rychlosti může dojít ke ztrátě adheze pneumatik, což je velmi nežádoucí jev. Tento jev může znamenat ztrátu kontroly nad vozidlem a tím vést k nehodě. Prokluzující kolo by mohlo vozidlo začít stahovat ke svojí straně, což by mohlo například znamenat sjetí z vozovky, nebo kolizi s protijedoucím vozidlem. Mnoho součástí je společných se systémem ABS, který byl popsán v předchozí sekci. 3.5 [20]

Součásti ASR se tedy vyvíjejí společně se systémem ABS a proto se integrují do systému ABS a vzniká tedy ABS/ASR. První automobilkou, která vyrobila první sériově dodávaný automobil byla automobilka Volvo v roce 1982. Ve vozidle Volvo 760 byl systém ASR označen jako ETC (**E**lectronic **T**raction **C**ontrol) [20].

Princip

Úkolem systému ASR je tedy zabránit prokluzu kol při akceleraci, tím zajistit jeho ovladatelnost a zvýšit bezpečnost vozidla. Každé kolo má své čidlo, kterým snímá počet otáček a vypočítanou hodnotu zasílá řídicí jednotce (jednotka ABS je rozšířena a o systém ASR). Řídicí jednotka následně vyhodnocuje, zda se některé z hnaných kol nachází v nekontrolovatelném skluzu na základě výpočtu skluzu vozidla. V případě závady na systému ASR se systém z bezpečnostních důvodů vypne a nadále nezasahuje do chování vozidla. [20]

Pro zjednodušený výpočet skluzu kola používá systém následující výpočet [20] [25]

$$\begin{aligned} \text{Skluz} \quad S &= 1 - \frac{\omega_v}{\omega_\omega} \\ \text{Úhlová rychlost auta} \quad \omega_v &= \frac{v}{r} \\ \text{Úhlová rychlost kola} \quad \omega_\omega &= \frac{v_\omega}{r} \end{aligned}$$

Tabulka 3.1: Tabulka výpočtu skluzu

S - 0 volně se odvalující kolo, ω_v - úhlová rychlost auta [ms^{-1}], ω_ω - úhlová rychlost kola [ms^{-1}], r - poloměr kola [m]

Příklad situací, kdy má systém ASR zabránit, nebo alespoň zmírnit nekontrolovatelný skluz kol:

- Rozjezd vozidla z klidového stavu.
- Zrychlení vozidla v zatáčce.
- Jízda do kopce (automobil s pohonem na přední nápravu).
- Rozdílné povrchy pod hnanými koly (př. levé - suchý asfalt, pravé - štěrk).
- Snížená přilnavost povětrnostními vlivy (sníh, led...).

Pokud řídicí jednotka vyhodnotí nežádoucí skluz některého z hnaných kol je schopna **omezit výkon motoru**. V moderních automobilech se výkon motoru sníží za pomoci přerušení dodávky paliva. Motor přestane dodávat přebytečný výkon na hnanou nápravu, který způsobuje nežádoucí prokluz vozidla a dojde ke stabilizaci vozidla. Omezení výkonu motoru není jedinou variantou. Další možností je **brzdění kola**, na kterém dochází k nežádoucímu prokluzu. Záleží na implementaci systému ASR jeho výrobcem.[20] V situaci, kdy dojde k aktivaci systému ASR je řidič informován prostřednictvím blikající kontrolky na přístrojovém panelu.



Obrázek 3.7: Kontrolka systému ASR (viz [6])

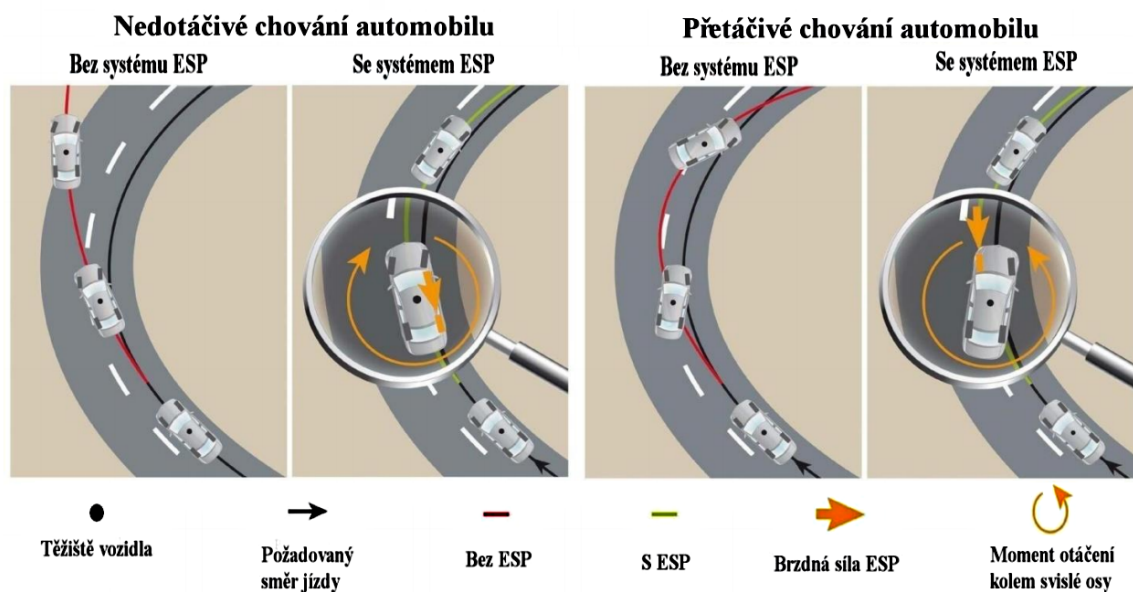
Zhodnocení

Systém ASR je dalším pokrokem v automobilovém průmyslu. Největším přínosem je jednoznačně zvýšená bezpečnost akcelerujícího vozidla. Taktéž se jedná o prvek komfortní výbavy vozidla. I na velmi kluzkém povrchu, jako je štěrk, sníh, či led nedojde ke nekontrolovanému prokluzu kol při prudké akceleraci. Pokud řidič vozidla požaduje zvýšenou nebo maximální akceleraci nemusí dbát zvýšenou pozornost na polohu plynového pedálu (systém ASR zasáhne do řízení vozidla) a může se více soustředit na jízdu.

3.7 ESP

Motivace

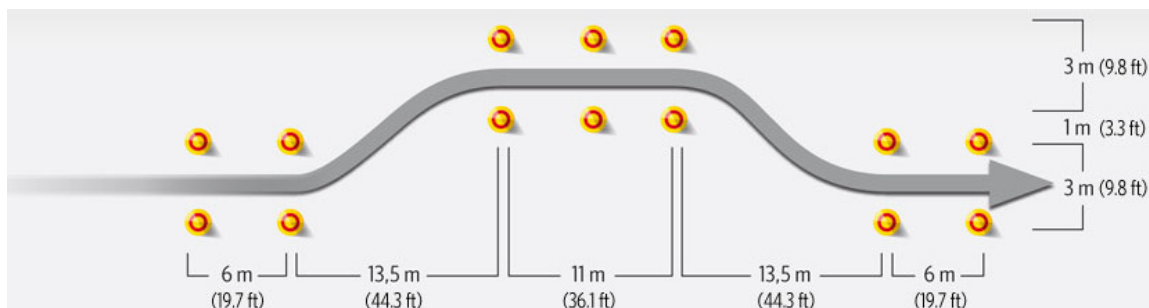
Práce se prozatím zabývala pouze jízdou v přímém směru. I při zatáčení vozidla dochází k situacím, kdy vozidlo není zvládnutelné řidičem. Při průjezdu zatáčkou působí na vozidlo boční síly. Zde je na místě uvést pojmy: nedotáčivost viz 3.8 a přetáčivost viz 3.8. Tyto fyzikální jevy mohou být řidičem špatně odhadnuty a vozidlo se dostane do smyku. Proto vznikl systém ESP, který pomáhá tyto závažné situace zvládnout.



Obrázek 3.8: Porovnání nedotáčivého a přetáčivého smyku bez/s ESP (viz [20])

Systém **E**lektronického **S**tabilizačního **P**rogramu se v literatuře vyskytuje taktéž pod pojmy ESC a DSC. Jedná se totožný pojem. Výrobci automobilů se na jednotném názvu zatím neshodli. Jedná se o elektronický aktivní prvek bezpečnosti vozidla. Pro jeho nezbytnou funkci je třeba mít funkční systém ABS viz 3.5. Dále systém ESP spolupracuje se systémem ASR, který detekuje prokluz kola při akceleraci viz 3.6. [20]

Zkušenosti se systémy ABS a ASR ukázaly dobré výsledky a vedly k dalšímu vývoji. [20] V roce 1989 došlo k představení nového systému ESP automobilkou Mercedes-Benz. Systém byl velmi finančně nákladný, proto se montoval pouze do luxusních vozidel.[16] Do nižších řad svých automobilů začal Mercedes-Benz nasazovat kvůli tzv. „losímu testu“, při kterém se nový automobil řady A převrátil.[20] Pokrokem technologie, zvyšováním výkonu elektroniky a zároveň jejím zlevněním se systém ESP stal dostupným prvkem. Od 1.11.2011 musí obsahovat dle nařízení Evropské komise každý nově homologovaný automobil ESP a od roku 2014 musí ESP obsahovat každý nově prodaný automobil.[19].



Obrázek 3.9: Schéma losího testu (viz [7])

Princip

Jak již bylo řečeno, systémy ABS a ASR stabilizují vozidlo při brzdění a akceleraci. ESP stabilizuje jízdní dynamiku v příčném směru a snaží se zabránit, nebo alespoň minimalizovat smyk vozidla ve příčném směru. Regulace jízdní dynamiky využívá prvky systémů ABS a ASR. Navíc obsahuje senzory pro příčné zrychlení vozidla a senzory stáčení vozidla (úhlová rychlost otáčení vozidla kolem svislé osy). Zmíněná čidla jsou umístěna přímo, nebo co nejbližší těžišti vozidla. Dále obsahuje čidlo, které snímá úhel natočení volantu. Podobně jako systém ASR je schopen systém ESP brzdit jednotlivá kola, či omezit výkon motoru (přerušením dodávky paliva, vynecháním zápalu směsi v motoru, či uzavřít škrtkovací klapku), aby bylo dosaženo požadované stability vozidla. [21]

ESP zvyšuje bezpečnost jízdy v situacích

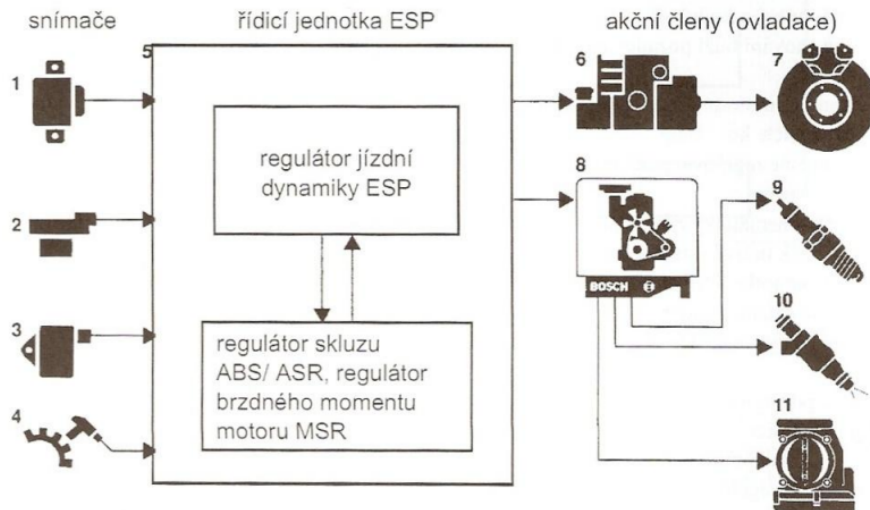
- Působení bočních sil na vozidlo nejen v zatáčce.
- Jízdní stabilita zvýšena ve všech jízdních stavech (popojíždění, akcelerace, brzdění, brzdění motorem, ...).
- Zvýšená stabilita v kritických situacích (strach, panická reakce).
- Lepší využití součinitele přilnavosti.[20]

Brzděním kol má tedy za všech okolností udržet vozidlo stabilní, aby udržovalo požadovaný směr jízdy. Jízdní nestabilitě zabrání systém ESP přibrzděním požadovaného kola, nebo může rovněž zrychlit některé z hnaných kol. Vozidlo s ESP vypadá jako neregulované do doby, než řídicí jednotka vyhodnotí na základě stavu rychlosti, natočení kol, zrychlení vozidla v zatáčce mezní stabilitu vozidla a začne zasahovat do řízení. Moderní automobily jsou již vybaveny elektronickým natáčením volantu. Na další požadavky řidiče, jako sešlápnutí plynového pedálu či zvýšení úhlu natočení volantu nebere zřetel, zasáhne do chování vozidla a snaží se vozidlo udržet ve stabilní oblasti. [27]

Nastavení regulace je dáno tzv. regulační odchylkou. Ta vychází z řídicího chování v mezní situaci a skutečným chováním vozidla. Vozidlo je regulováno, aby se reálné chování vozidla blížilo co nejvíce požadovanému stavu. Požadovaný stav vozidla vychází z polohy akceleračního pedálu, polohy brzdového pedálu a úhlem natočení volantu ve vozidle. Do výpočtu regulace se zahrnují taktéž hodnoty: [27]

- Součinitel přilnavosti vozidla.
- Rychlost vozidla.

Hodnoty jsou vypočítány na základě snímačů otáček kol, bočního zrychlení, brzdných tlaků a stáčivé rychlosti. Cílem regulace je zjistit skutečné chování vozidla na základě dat z signálu stáčivé rychlosti a úhlu směrové úchylky těžiště. Poté se má dynamický jízdní stav blížít co nejvíce normálnímu jízdnímu stavu. [27]



Obrázek 3.10: Regulační soustava ESP od firmy Bosch: (1) Snímač stáčivé rychlosti se snímačem bočního zrychlení, (2) Snímač úhlu natočení volantu, (3) Snímač neregulovaného brzdného tlaku, (4) Snímač otáček motoru, (5) Řídící jednotka ESP, (6) Hydraulická jednotka, (7) Brzdy, (8) Řídící jednotka motoru, (9) Zažehnutí (pouze zážehové motory), (10) Vstřikování paliva, (11) Škrťící klapka (viz [27])

Směrová úchylka není ovlivňována bočními silami, naopak příčný pohyb způsobuje stáčivý moment, který způsobuje otáčení vozidla a vznik úhlu směrové úchylky těžiště vozidla. To je regulováno skluzem kol, při kterém se vytvoří boční síly, které vytvoří opačný stáčivý moment a vozidlo bude stabilní. Řídící jednotka pracuje s veličinami, které měří (boční zrychlení vozidla, stáčivá rychlost, natočení volantu, ...) a s hodnotami, které vypočítává a odhaduje jako podélná rychlost, podélné síly vozidla, skluz pneumatik. Následně vypočítá boční síly na kole, směrové úchylky kol, těžiště a příčnou rychlost vozidla. Do regulace rovněž zahrnuje dynamické vlivy dopravní situace, například různé povrchy pod jednotlivými koly, náklon vozovky a podobně. [27]

Systém ESP vypočítává stáčivý moment, který je nutný pro stabilizaci vozidla do normálního stavu. Program, který tento moment počítá má ve své paměti uloženo maximální možné podélné zrychlení a ostatní důležité veličiny, které byly zjištěny při reálné jízdě v kruhu. Vše je uloženo jako jednostopý model a v případě, že systém dosadí příliš vysokou hodnotu součinitele přilnavosti, tak bude příliš optimistický. Reálná přilnavost pneumatiky může být nižší a vozidlo se může stát nestabilním. [27]

Vstupní veličiny z senzorů [27]

- Poloha klíčku v zapalování.
- Úhel natočení volantu.
- Poloha akcelérátoru, brzdového pedálu a parkovací brzdy.
- Otáčky kol.
- Brzdový tlak.
- Stáčivá rychlost.
- Příčné zrychlení.

Požadované hodnoty se odchyľují od reálných hodnot jízdy. Odchyľku systém ESP zpracovává a následně se snaží o její minimalizaci redukcí rychlosti kol, nebo naopak akcelerováním některým z hnaných kol. Řídící jednotka provádí tyto operace, dokud odchyľka není téměř nulová. Pokud je odchyľka po korekci zanedbatelná, tak systém přestane zasahovat do řízení vozidla. Systém ESP signalizuje svoji funkci řidiči blikající kontrolkou na přístrojovém panelu (zasahuje-li do řízení), která je shodná s kontrolkou systému ASR viz 3.7. [27]

Zhodnocení

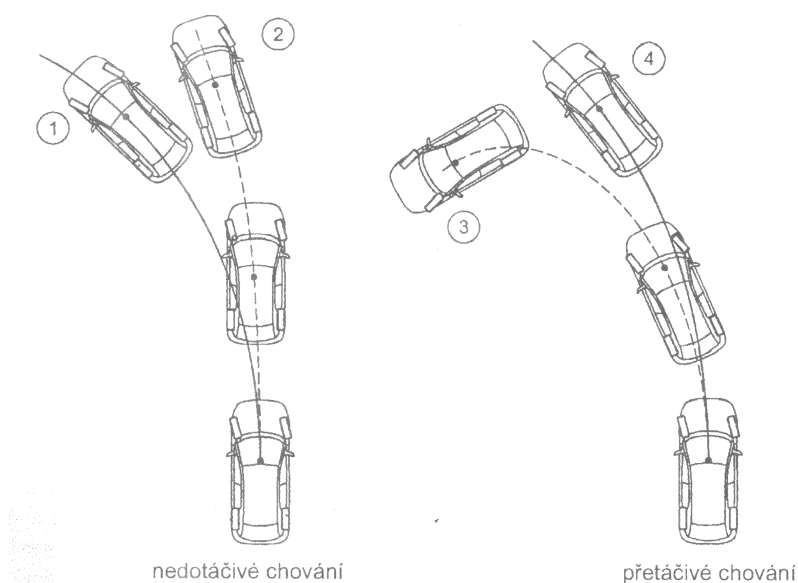
Systém ESP je dalším významným bezpečnostním pokrokem nejen v automobilovém průmyslu. Stal se rovněž nepostradatelným prvkem výbavy v nákladním průmyslu. Vozidla bez ESP jsou méně bezpečná. Zejména v krizových situacích dokáže řidiči vozidla vhodnými korekcemi stabilizovat vozidlo a zabránit nehodě, či vyjetí z vozovky. Taktéž s pokrokem technologií není nákladný pro implementaci do vozidla, a proto je v dnešní době povinnou výbavou každého nově vyrobeného vozidla.

3.8 Fyzikální jevy a síly důležité pro práci systému ESP

Nedotáčivost a přetáčivost

Název **nedotáčivost** je odvozen od faktu, že osa vozidla při průjezdu zatáčkou opisuje oblouk s větším poloměrem, než má zatáčka a „nedostatečně zatáčí“. Nedotáčivé chování vozidla je fyzikální jev ke kterému dochází v případě vysoké nájezdové rychlosti do zatáčky. Síla působící na pneumatiky je větší než mezní síla, kterou pneumatiky přenesou, a proto dochází ke smyku vozidla. Ve valné většině případů se tento jev objevuje u vozidel s náhonem na přední kola a příčinou je **ztráta přilnavosti** předních pneumatik. Přirozenou reakcí řidiče je zvětšit natočení kol, což paradoxně celou situaci více zhorší, jelikož pneumatiky přenášejí méně síly. Řešením je tedy naopak kola méně vytočit. [10]

Název **přetáčivost** je odvozen od faktu, že vozidlo opisuje oblouk s menším poloměrem, než má zatáčka a „příliš zatáčí“. Příčinou přetáčivého smyku je **ztráta adheze** na zadní nápravě, která vybočí ze směru jízdy. Nejčastěji postihuje automobily se zadním pohonem kol. Přetáčivý smyk může rovněž vzniknout po „vybrání“ nedotáčivého smyku. Pokud je přetáčivý smyk důsledkem nedotáčivého smyku, tak je velmi nebezpečný kvůli náhlé změně na kterou řidič velmi obtížně reaguje. Řešením přetáčivého smyku s vozidlem, které má poháněnou zadní nápravu je vytočením kol proti směru zatáčky a přidáním, či ubráním plynu (akceleratoru). Nedotáčivost i přetáčivost jsou velmi nebezpečnými jevy při průjezdu zatáčkou, které může dále zhoršit stav komunikace (mokra, sníh, led). [11]



Obrázek 3.11: (1,4) Normální chování, (2) Nedotáčivé chování, (3) Přetáčivé chování (viz [27])

Fyzikální síly

Rychlost

$$v = v_0 + a \times t \quad [ms^{-1}]$$

v_0 - poč. rychlost [ms^{-1}], a - zrychlení [ms^{-1}], t - čas [s]

Síla tření kolo na vozovku

$$F_k = u_k \times F_n \quad [N]$$

u_k - kin. koeficient, F_n - normálová síla [N]

Odstředivá síla v zatáčce

$$F_0 = \frac{v^2}{r}$$

v - rychlost [ms^{-1}], r - pol. oblouku zatáčky [m]

Maximální nájezdová rychlost do zatáčky

$$V_{max} = \sqrt{r \times g \times f}$$

V_{max} - max. naj. rychlost [ms^{-1}], r - pol. oblouku zatáčky [m], g - gravitační zrychlení [N],
 f - maximální třecí síla pneumatika - silnice

Limitní síla pneumatiky

$$m \times a = \mu \times F_n$$

m - hmotnost [kg], a - odstředivé zrychlení [ms^{-1}] = μ - koeficient tření, F_n - normálová síla [N]

Hybnost

$$P = m \times v$$

P - hybnost, m - hmotnost [kg], v - rychlost [ms^{-1}]

Odpor vzduchu

$$O_v = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C \times v^2 \quad [N]$$

ρ - hustota vzduchu [kgm^{-3}], S - čelní plocha auta [m^2], C - součinitel vz. odporu, v - rychlost proudění vzduchu (rychlost auta + rychlost vzduchu) [ms^{-1}]

Valivý odpor

$$F_v = (m \times g) \times \left(\frac{\xi}{r}\right)$$

m - hmotnost [kg], g - grav. zrychlení, ξ - rameno val. odporu, r - poloměr kola [m]

3.9 Vzorový příklad

$$\begin{aligned}v &= 60 \text{ kmh}^{-1} = 16.667 \text{ ms}^{-1} & m &= 1000 \text{ kg} & L &= 3 \text{ m (rozvor)} \\R &= 30 \text{ m} & b &= 2 \text{ m} & a &= 1 \text{ m} \\a_y &= 9.26 \text{ ms}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_F &= \frac{m \times b}{L} = 666,7 \text{ kg} && \text{Váha na přední ose} \\m_R &= \frac{m \times a}{L} = 333,3 \text{ kg} && \text{Váha na zadní ose} \\m_{RL} &= \frac{m - m_F}{2} = 166,67 \text{ kg} && \text{Váha na levém zadním kole} \\F_{YFL} &= m_{FL} \times a_y = 333,35 \times 9,26 = 3086,66 \text{ N} && \leftarrow \text{síla pro zatočení} \\F_{YFR} &= F_{YFL}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m \times a &= \mu \times F_n && F_n = m \times g \\ \mu_{sucho} &= 0.8\end{aligned}$$

$$F_y = \mu_{sucho} \times F_n = 0.7 \times 333.35 \times 9.81 = 2289 \text{ N}$$

limitní síla předních pneu < síla pro zatočení

$$F_y = \mu_{sucho} \times F_n = 0.8 \times 166.67 \times 9.81 = 1308 \text{ N}$$

limitní síla zadních pneu

$$\Sigma \text{moment} = 2 \times F_{YFL} \times a - (2 \times F_{YRL} \times b) = -654 \text{ N}$$

auto se chová nedotáčivě (záporný moment)

$$\begin{aligned}\text{moment}_{XRR} &= +654 \text{ N} \\ \text{moment}_{XRR} &= F_{XRR} \times \frac{2}{t} \rightarrow \frac{654 \times 2}{1.5} = 872 \text{ N}\end{aligned}$$

Síla, kterou je nutno brzdít pravé zadní kolo pro úplnou stabilizaci

$$F_{XRR} < F_{RR} \text{ limit} \rightarrow \text{dojde k úplné stabilizaci}$$

Kapitola 4

Návrh a implementace modelu

V následující kapitole bude prezentováno prostředí UPPAAL, konkrétní implementace modelu vozidla v programu UPPAAL. Implementace bude vycházet z sekce návrhu řešení viz. 4.2. Automaty budou popsány s obrázky a rovněž budou přiblíženy důležité proměnné v modelu. 10 časových jednotek v modelu odpovídá 1s reálného času tzn. 1 časová jednotka = 0.1s.

4.1 Prostředí UPPAAL

UPPAAL je nástroj pro modelování, simulaci a verifikaci reálných systémů. Je vhodný pro systémy, které lze modelovat jako nedeterministické procesy s konečnou kontrolou struktury s reálnými hodinami. Komunikují pomocí kanálů, nebo pomocí sdílených proměnných. Sestává se ze tří hlavních součástí: programovací jazyk, simulátor a model-checker. Jsou dostupné datové typy (pole, integery,..) Slouží k modelování chování systému jako sítí automatů rozšířených o hodiny a proměnné. Simulátor je validační nástroj, který umožňuje zkoumání systému v raných stádiích modelování. Model-checker může kontrolovat invarianty a dosažitelnost vlastností prozkoumáváním stavového prostoru systému. UPPAAL má dva hlavní cíle a těmi jsou: zajistit maximální efektivitu a být uživatelsky přívětivý. Program stojí na jazyku C++ a uživatelské rozhraní je implementováno v jazyku Java. [17]

4.2 Návrh řešení a abstrakce systému

Jedoucí automobil a v něm probíhající fyzikální jevy jsou velmi rozsáhlé. Některé z fyzikálních jevů se dají jen velmi složitě popsat a lze je pro model vozidla zanedbat. Některé fyzikální děje bude vhodné zjednodušit. Předpoklad je následující. Vozidlo řídí řidič, který otočí klíčkem zapalování a nastartuje motor. Řidič následně zrychlí pomocí cyklu na určitou rychlost. Dále bude moci šlapat na plynový (akcelerátor) a brzdový pedál. Při příchodu zatáčky otočí volantem dle jejího směru (pravotočivá/levotočivá). V pravotočivé zatáčce otočí volantem po směru hodinových ručiček a v levotočivé naopak. Je nezbytné zmínit, že model neřeší, zda se řidič nachází na vozovce či nikoliv. Systém ESP nedokáže zabránit extrémním situacím. Jeho cílem je pouze zajistit co nejvyšší stabilitu auta. Pokud tedy řidič vjede do zatáčky o poloměru 20 metrů rychlostí 100 kilometrů za hodinu nezabrání vyjetí z vozovky ani nejlepší systém ESP na světě.

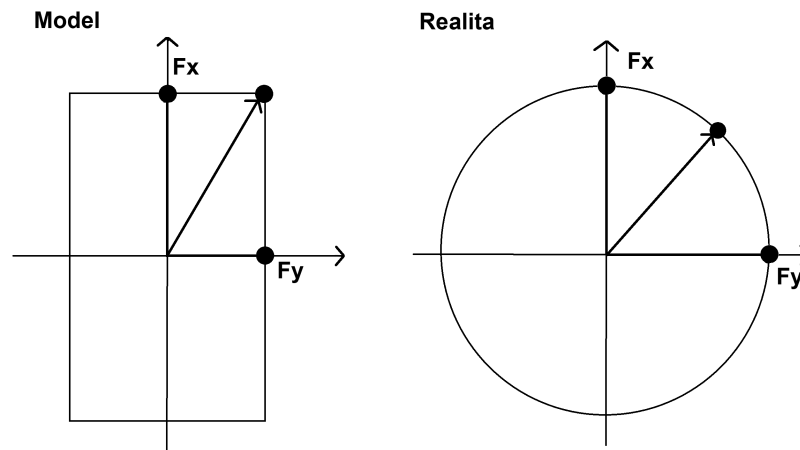
Vozidlo se bude pohybovat po cestě bez jakýchkoliv nerovností a kopců. Model zahrnuje valivý odpor kol vozidla a rovněž odpor vzduchu působící proti vozidlu. Předpokládané je bezvětří a odpor vzduchu, který bude působit proti automobilu bude dán pouze rychlostí automobilu. Řidič dává pokyn k nastartování vozidla, jeho zrychlování/brzdění ovlivněné sešlápnutím pedálu akceleratoru či brzdy. V případě zpozorování zatáčky řidič otočí volantem a pustí pedál akceleratoru i brzdy. Bude tedy pouze držet volant a zatáčet. Při zatáčení bude na vozidlo působit odstředivá síla.

Řídící jednotka dle požadavků řidiče dává příkaz ke startu motoru a ke zhašení motoru. Motor reaguje na příkazy od řídicí jednotky a nachází se ve stavu zhašeném, startujícím nebo nastartovaném. Řídící jednotka ESP čeká na nastartování motoru. Pokud je povolen systém ESP může vykonávat činnost, jinak zůstává ve výchozím stavu. Model kola čeká na start motoru a po startu provádí aktualizaci rychlosti vozidla. Model řidiče se stará o počáteční akceleraci vozidla, poté se rozhodne, zda chce zpomalit, nebo zrychlit. Následně v příchodu zatáčky otočí volantem a pustí pedály. Poslední model je model zatáčky, který generuje informaci o příchozí zatáčce. Testy, při kterých dojde k porovnání se systémem ESP a bez něj budou vycházet ze stejné nájezdové rychlosti do zatáčky, aby bylo možno porovnat výsledky.

Zrychlování a zpomalování vozidla bude vnímáno jako působení síly po směru, či proti směru jízdy vozidla na jednotlivá kola. Vozidlo bude moci být poháněno na obě nápravy (přední a zadní), ale pro testy bude uvažován náhon pouze na jednu nápravu. Při brzdění/zatáčení či akceleraci model zanedbává přenesení váhy. Těžiště vozidla bude předem specifikováno a nebude se v průběhu simulace měnit. Bude určeno pomocí vzdálenosti k přední nápravě, k zadní nápravě a bude uprostřed z pohledu rozchodu kol (vzdálenost mezi středovými liniemi kol). Rovněž je zanedbáno, že při kombinaci příčné a podélné síly působící na pneumatiku dochází ke snížení přenositelné příčné a podélné síly viz. 4.1. Na vozidle bude nutné specifikovat rozložení vah a taktéž bude nutné pod jednou z náprav snížit koeficient dynamického tření, aby se dosáhlo nedotáčivého/přetáčivého chování vozidla v zatáčce.

V práci jsou prezentovány systémy ABS a ASR, které bylo nezbytné zmínit, jelikož ESP je jejich nadstavbou. Avšak v modelu implementované nejsou. Důvodem je, že síly, kterými působí pneumatika na povrch nejsou nikdy překročeny a proto práce počítá s tím, že nedojde k zablokování kol při brzdění, či prokluzu kol při akceleraci.

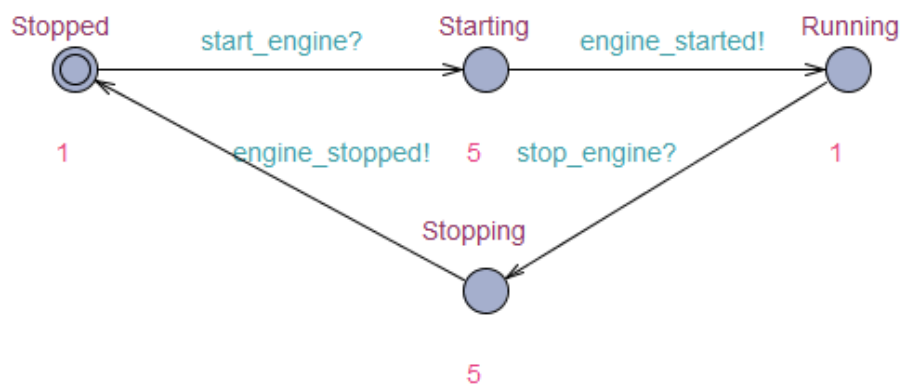
System ESP na základě rozložení váhy vozidla vypočítá, zda se vozidlo chová nedotáčivě/-přetáčivě a na základě směru zatačky se rozhodne, které kolo bude přibrzďovat, aby došlo k úplné, či částečné stabilizaci vozidla 3.9. Pokud je brzdná síla pro stabilizaci menší, než zvládne přenést pneumatika auta dojde k úplné stabilizaci a nebude aplikována plná brzdná síla. V případě, že potřebná brzdná síla je větší, než je limitní síla, kterou pneumatika přenese nedojde k úplné stabilizaci vozidla. Pod nápravami lze upravovat terén pomocí změny koeficientu dynamického tření.



Obrázek 4.1: Porovnání příčných a podélných sil model vs realita

4.3 Model motoru

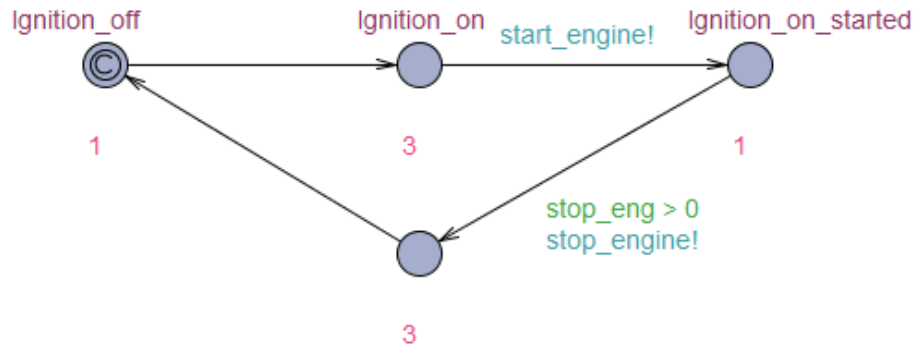
Model je se může nacházet ve čtyřech stavech. Ve stavu stopped je motor zhašen a nepracuje, pokud od řídicí jednotky automobilu dostane příkaz ke startu, dostane se do stavu starting, který zabere asi půl vteřiny a poté se nachází ve stavu running a běží, dokud nepřijde příkaz od ŘJ na zhašení motoru, které opět trvá půl vteřiny a dostane se do stavu stopped.



Obrázek 4.2: Model motoru

4.4 Model řídicí jednotky

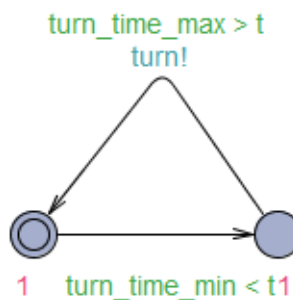
Opět se může nacházet ve čtyřech stavech. Výchozí stav je `ignition_off`, který znamená, že zapalování je vypnuté. Po otočení klíčku následuje stav `ignition_on`, kdy je žhavení zapnuté a čeká se na povel ke startu motoru. Poté probíhá vyslání signálu motoru ke spuštění. V případě nastavení proměnné `stop_eng` na 1 dojde ke zhašení motoru a přechodu do stavu `ignition_off`.



Obrázek 4.3: Model ŘJ

4.5 Model zatáčky

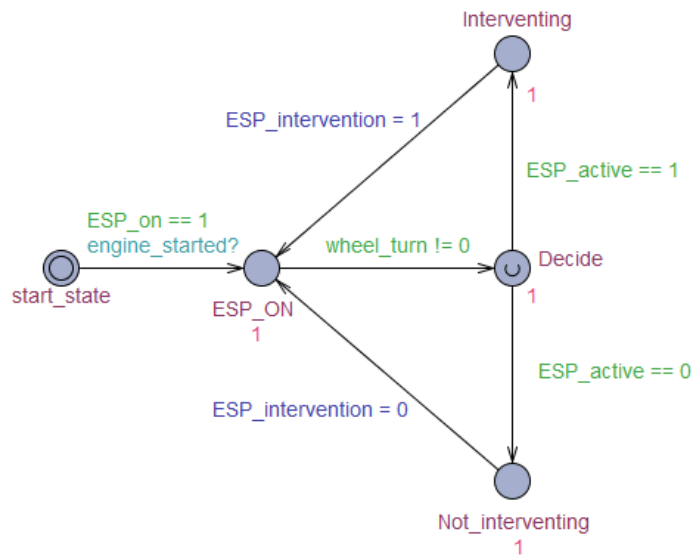
Model je pouze dvoustavový. Jeho cílem je v intervalu od $[turn_time_min, turn_time_max]$ vygenerovat událost `turn`, která oznamuje řidiči příchozí zatáčku. V modelu jsou tyto hodnoty nastaveny na 120 a 130. S hodnotami se dá rozumně hýbat, ale pokud se nastaví příliš nízko, tak to může znamenat chybný chod modelu a nedosáhne se požadované funkcionality, protože automobil pojede příliš pomalu. Taktéž je vhodné zvolit rozumně dlouhý interval, protože v případě krátkého intervalu nemusí řidič zachytit signál o příchozí zatáčce.



Obrázek 4.4: Model zatáčky

4.6 Model ESP

Model ESP je reprezentovaný automatem ESP. Pokud je ESP povoleno a motor se nashutuje, může ESP zasahovat do řízení automobilu (*ESP_on*). Poté vyčkává na příchozí zatáčku, kterou reprezentuje proměnná *wheel_turn*. V případě, že se proměnná *wheel_turn* změní na jinou hodnotu než 0, ESP zjišťuje, zda je třeba zasáhnout do řízení vozidla, či nikoliv. Pokud je třeba zasáhnout do řízení, tak proměnná *ESP_active* získá hodnotu 1 a řídicí jednotka ESP pozná, že zasahuje do řízení *ESP_intervention*. Pokud není nutné zasahovat do řízení, *ESP_active* má hodnotu 0, tak jednotka ESP nezasahuje do řízení vozidla.



Obrázek 4.5: Automat ESP, který zachycuje jeho práci

4.7 Model kola

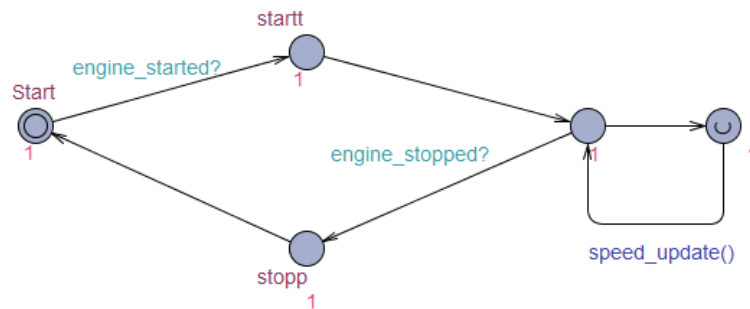
Automat *Wheel* - po startu motoru začne cyklit v nekonečném cyklu. V cyklu volá funkci *speed_update()*, která je nejdůležitější funkcí celého modelu vozidla. Probíhají v ní všechny důležité výpočty a rozhodování systému ESP. Po zavolání funkce se aktualizují nezbytné proměnné. Zavoláním funkce *stability_rate()* zjistí model míru stability vozidla. V případě, že automobil nezatáčí, počítá s tím, že k žádné nestabilitě docházet nemůže. Pokud zjistí, že volant je otočen spočítá míru stability. Míru stability zjišťuje na nápravě, na které dochází k nestabilitě. Vypočítá ji jako poměr mezi potřebnou silou pro zatočení vydělenou silou, kterou přenesou pneumatiky v zatáčce.

Pokud systém ESP zvládá stabilizovat auto (síla potřebná k brzdění < síla, kterou přeneše brzděné kolo viz 3.9) je míra stability téměř rovna 100%. Jelikož model zanedbává přenos váhy a vítr v zatáčce je od míry stability odečteno náhodné číslo *random(0.05)*, které se snaží kompenzovat nízkou nepřesnost modelu. Dále spočítá moment, který bude potřeba vyvinout za jednotku sekundy (*req_moment*) pro úplnou stabilizaci vozidla. Dále spočítá potřebnou sílu pro zatočení na přední a zadní nápravě.

V případě, že vozidlo jede rovně $wheel_turn = 0$ zavolá funkci $velocity()$ ve které dojde k výpočtu rychlosti. Vzorec pro změnu hybnosti tělesa je popsán v 3.8. Pokud vozidlo nezatáčí, je spočítána na základě polohy pedálu a brzdného pedálu síla působící na kolo. Hybnost je dle výpočtu změněna a síly působící na kolo jsou vynulovány.

Pro zatáčející vozidlo počítá funkce fyzikální jevy v zatáčce a případnou reakci systému ESP. Funkce zjistí, že vozidlo zatáčí a vypočítá potřebný moment, kterým bude brzdit vybrané kolo. Pokud je ESP povoleno, funkce ověří, zda je potřeba ovlivňovat řízení. ($stability_rate < 1$) Uloží absolutní hodnotu brzdného momentu (pokud je auto nedotáčivé, je moment záporný a pro přetáčivé je kladný). Nyní znovu ověří, jak se chová auto pomocí funkce req_moment . Teď už se pouze rozhodne na základě směru zatáčky $wheel_turn$ které kolo bude vybráno pro brzdění (pravé/levé kolo). ESP vybralo pro brzdění pravé zadní kolo a zavolá funkci ESP_brake_rr .

Funkce jako první změní stav ESP z neaktivního na aktivní ESP_active , vypočítá potřebný brzdný moment viz 3.9. Zda-li je potřebná brzdná síla menší, než limitní síla pneumatiky za vteřinu, tak aplikuje $\frac{1}{10}$ brzdné síly, zavolá funkci $stability_rate$, která určí stabilitu vozidla dle funkcionality, který je popsána výše. Následně na pravé zadní kolo aplikuje požadovanou brzdnu sílu a zavolá funkci $velocity()$ a dojde k výpočtu nové rychlosti. Pokud je požadovaný moment vyšší, než limitní síla pneumatiky, tak je aplikována $\frac{1}{10}$ maximální brzdné síly za sekundu (náhrada za systém ABS, nedojde k blokaci kol). Funkce $stability_rate$ vrátí vypočítanou stabilitu, která je nižší než 1 a vozidlo není plně stabilizováno. V případě, že je auto přetáčivé systém ESP naopak brzdí přední kola.



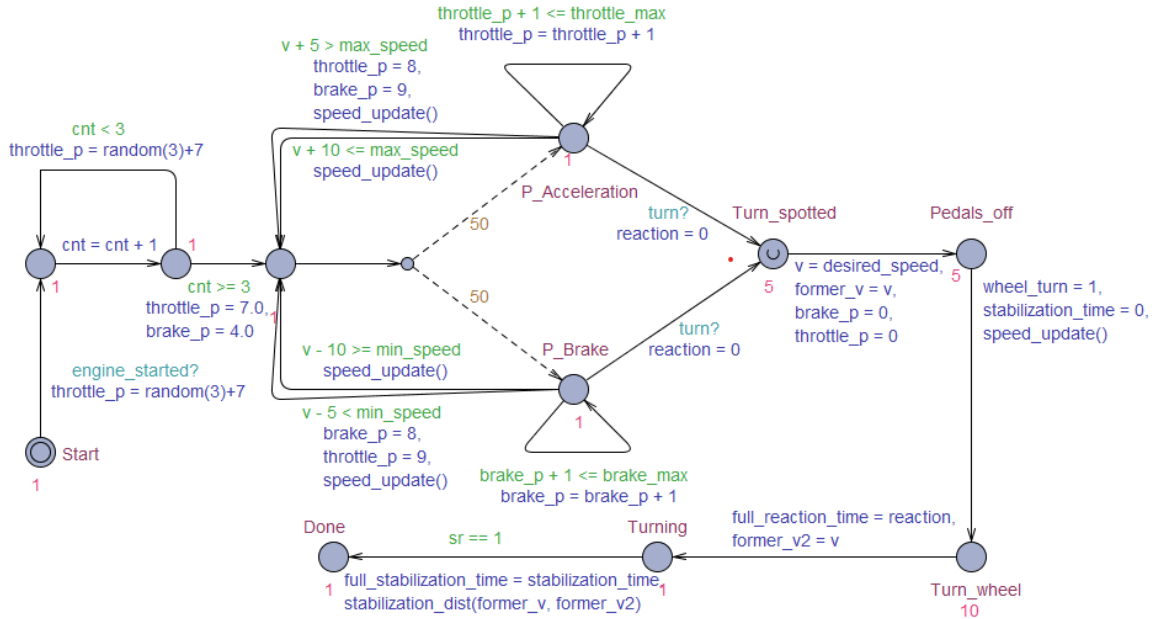
Obrázek 4.6: Automat *wheel* reprezentuje kolo automobilu

4.8 Model řidiče

Model obsahuje několik stavů. Po nastartování motoru jeho model pomocí synchronizace oznámí modelu řidiče, že je připravena k jízdě. Řidič nejprve sešlápně plynový pedál v intervalu $[7, 10]$ čímž dosáhne prvotní akcelerace. Následuje cyklus, při kterém řidič opět volí polohu akcelérátoru ve stejném intervalu. Po třech cyklech je řidiči umožněno šlapat na plynový a brzdový pedál. Vejde do stavu, ve kterém rozhoduje v poměru 50:50, zda chce vozidlo zrychlovat či zpomalovat. Vybere akceleraci a stochasticky se rozhodne, zda chce více přidat plyn, či nikoliv. Pokud se rozhodne, že více akcelérátor sešlapávat nebude je provedena aktualizace rychlosti a řidič má opět na výběr akceleraci, či zpomalování. Zpomalování pracuje na stejném principu jako akcelerace s rozdílem, že řidič zpomaluje vozidlo.

Poté pokračuje v cyklu, dokud model zatáčky pomocí kanálu neoznámí řidiči příchozí nebezpečí.

V případě, že zachytí synchronizaci o příchozí zatáčce model zaznamená nájezdovou rychlost (nájezdová rychlost se dá skokově upravit pomocí proměnné *desired_speed* pro účely testování). Řidiči trvá 5 jednotek modelového času na spatření zatáčky, pustí oba pedály za 5 jednotek a 10 jednotek mu trvá, než otočí volantem. Poté pouze drží volant ve směru zatáčky a čeká než je hodnota *stability_rate* rovna 1. Poté je dokončen test a je spočítána celková doba stabilizace.



Obrázek 4.7: Model *driver* představující model řidiče

4.9 Použité konstanty

V modelu vozidla se nenacházejí pouze modely jeho součástí a fyzikální veličiny ovlivňující chování vozidla. Obsahuje rovněž velmi důležité konstanty, které se dají měnit vzhledem k povaze testovaného vozidla, klimatických podmínek, změnou gravitační síly a podobně. Plní funkci řídicí, nebo ovlivňují přímo chování vozidla. Pro základní technické parametry byla vybrána Škoda Fabia z [13]. Zbylé konstanty byly zvoleny na základě fyzikálních zákonů v ČR.

Tabulka 4.1: Rychlostní konstanty

<i>desired_speed</i>	zvolená nájezdová rychlost do zatáčky [kmh^{-1}]
<i>max_speed</i>	řidič se snaží udržovat rychlost vozidla pod konstantou [kmh^{-1}]
<i>min_speed</i>	řidič se snaží udržovat rychlost vozidla nad konstantou [kmh^{-1}]

Tabulka 4.2: **Parametry vozidla**

<i>car_weight</i>	hmotnost vozidla v $[kg]$
<i>car_widht</i>	šířka vozidla v $[m]$
<i>car_height</i>	výška vozidla v $[m]$
<i>acceleration_force</i>	síla akcelerace vozidla v $[N]$ aplikovaná na hnaná kola
<i>brake_force</i>	brzdná síla aplikovaná na každé kolo v $[N]$
<i>Faxle_to_cog</i>	vzdálenost od přední nápravy k těžišti $[m]$
<i>Raxle_to_cog</i>	vzdálenost od zadní nápravy k těžišti $[m]$
<i>wheelbase</i>	rozvor auta (vzdálenost mezi přední a zadní nápravou) $[m]$
<i>track</i>	rozchod kol (vzdálenost mezi koly na jedné nápravě) $[m]$
<i>car_drag_coef</i>	koeficient odporu vzduchu
<i>frontwheel/rearwheel</i>	povolení pohonu dané nápravy
<i>F_kinetic_coef</i>	koeficient tření pod přední nápravou
<i>R_kinetic_coef</i>	koeficient tření pod zadní nápravou
<i>ESP_on</i>	povolení systému ESP

Tabulka 4.3: **Parametry zatáčky**

<i>turn_time_min/turn_time_max</i>	interval ve kterém je signalizovaná příchozí zatáčka
<i>turn_radius</i>	poloměr zatáčky $[m]$

Tabulka 4.4: **Fyzikální konstanty**

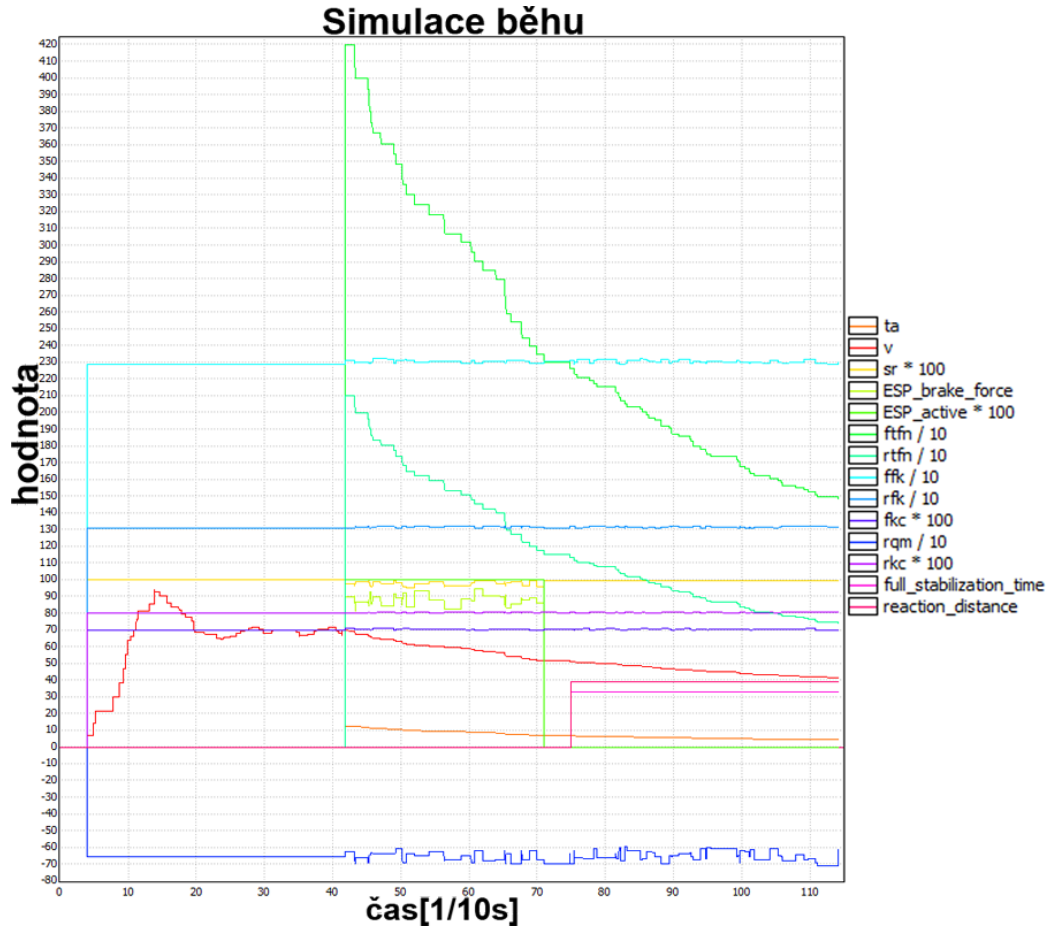
<i>air_ro</i>	hustota vzduchu $[kgm^{-3}]$
<i>gravity</i>	gravitační síla $[N]$

Tabulka 4.5: **Koeficient dynamického tření viz [9]**

povrch	kondice	koeficient μ
asfalt	suchý	0.8
asfalt	mokrý	0.5
sníh	suchý 0°C	0.3
led	čistý 0°C	0.2

4.10 Vzorový test

V následujícím ukázkovém testu jsou vykresleny všechny podstatné proměnné programu. Signál pro synchronizaci zatáčky je záměrně posunut na hodnotu 40, aby byly hodnoty proměnných čitelnější. Pomocí vykreslených hodnot lze odhadnout chování vozidla při zatáčení. Vzorový test vychází z příkladu 3.9 s rozdílem, že nájezdová rychlost je změněna z 60kmh^{-1} na 70kmh^{-1} . Důvod pro posunutí nájezdové rychlosti byl, že ESP pracuje déle a lze si lépe všimnout, jak zasahuje do chování vozidla.



Obrázek 4.8: Simulace běhu

Na grafu jsou znázorněny proměnné, které popisují zrychlení v zatáčce působící na vozidlo (ta v $[ms^{-1}]$), rychlost vozidla (v v $[ms^{-1}]$), míra stability (sr v %), brzdná síla vyvíjená systémem ESP na požadovaném kole (ESP_brake_force v $[N]$), pravdivostní hodnotu aktivního systému ESP, požadovaná síla na kolech pro zatočení bez smyku ($ftfn / rtfn$ v $[dN]$ deciNewton), limitní síla předních/zadních kol (ffk / rfk v $[dN]$), dynamický koeficient tření na přední nápravě (fkc , bezrozměrná jednotka násobená číslem 100), moment síly tvořící požadované chování auta - nedotáčivé/přetáčivé (rqm v $[dN]$), dynamický koeficient tření na zadní nápravě (rkc , bezrozměrná jednotka násobená číslem 100), potřebný čas pro plnou stabilizaci vozidla ($full_stabilization_time$ v $[s]$) a ujetá vzdálenost po dobu reakce řidiče ($reaction_distance$ v $[ms^{-1}]$).

Výsledkem simulace je graf vývoje proměnných zvolených před během programu. Graf znázorňuje všechny podstatné veličiny, na které se bude vhodné zaměřit v následných experimentech. Zároveň bude zajímavé si povšimnout, jak jsou spolu proměnné provázané a jejich vzájemné reakce. Hodnoty se budou zkoumat na vodorovné ose, kde jednotkou je desetina vteřiny $[1/10s]$. Na horizontální ose jsou hodnoty veličin. Jednotky bylo nutné trochu přizpůsobit, protože pokud jsou všechny fyzikální síly v Newtonech $[N]$, tak graf je špatně čitelný. Proto byly pro některé jednotky zvoleny deciNewtony $[dN]$.

Kapitola 5

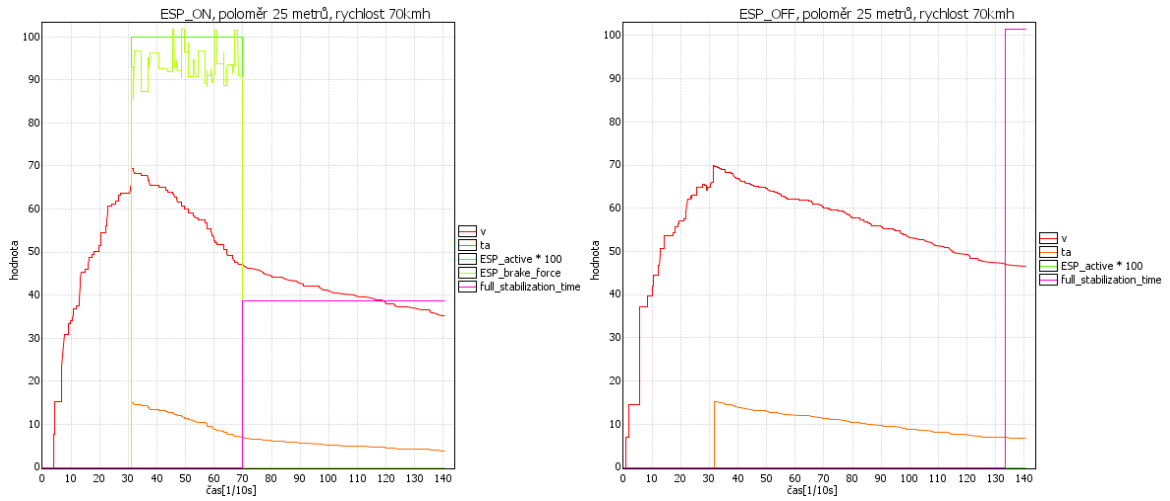
Zhodnocení vlastností modelu

Cílem této kapitoly bude navrhnout vhodné testovací scénáře, použít odpovídající veličiny a konstanty. Z výsledků simulací porovnat vozidlo s aktivním systémem ESP a vozidlo bez systému ESP. Klíčovým ukazatelem testů bude míra stability a čas potřebný k získání plné stability vozidla (síla potřebná pro zatočení $<$ limitní síla pneumatik). Dle míry stability bude možné zjistit nakolik se systému ESP daří stabilizovat vozidlo. V případě vozidla bez ESP bude zajímavé sledovat, jak míra stability postupně narůstá. Jak již bylo popsáno dříve řidič v případě příchozího signálu o zatáčce pouze otočí volantem, pustí pedál akcelérátoru, brzdy a dále nebude zasahovat do řízení. V případě vypnutého systému ESP bude prezentována proměnná *ESP_active*, aby bylo zřejmé, že je systém neaktivní.

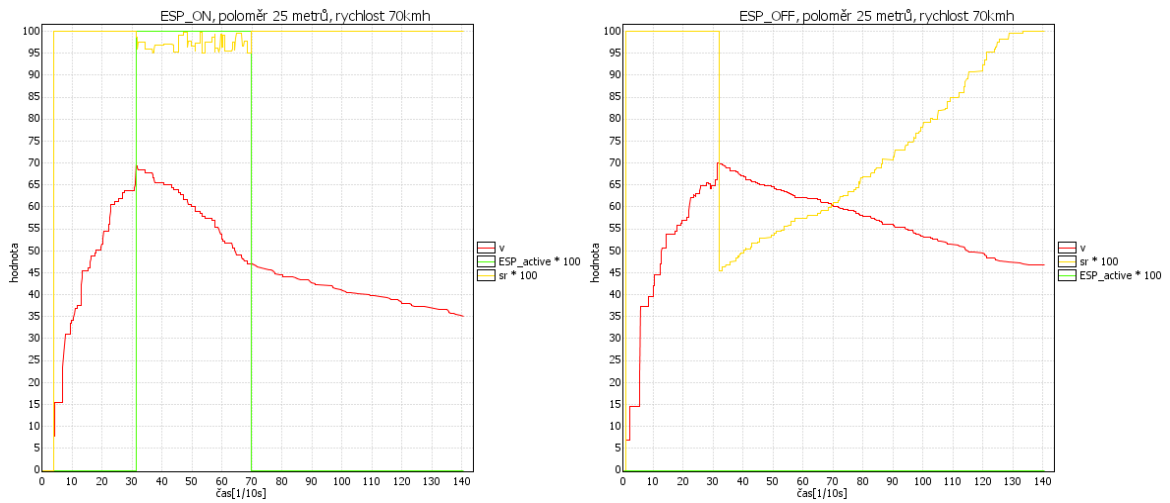
5.1 Test A: Průjezd zatáčkou o poloměru 25 metrů rychlostí 70kmh^{-1} , sucho

V první testu bude model podroben simulaci, která se bude odehrávat na suchém asfaltu. Koeficient tření pod přední nápravou je nastaven na 0.7 a pod zadní nápravou na 0.8, aby bylo vyvoláno nedotáčivé chování vozidla. Rozložení váhy bude v poměru 66:34 (přední/zadní náprava) a vozidlo váží 1078kg. Řidič se bude snažit projet pravotočivou zatáčku o poloměru 25 metrů rychlostí 70kmh^{-1} . Na levé straně budou prezentovány všechny důležité veličiny a proměnné se zapnutým systémem ESP a na straně pravé bude naopak systém ESP vypnut.

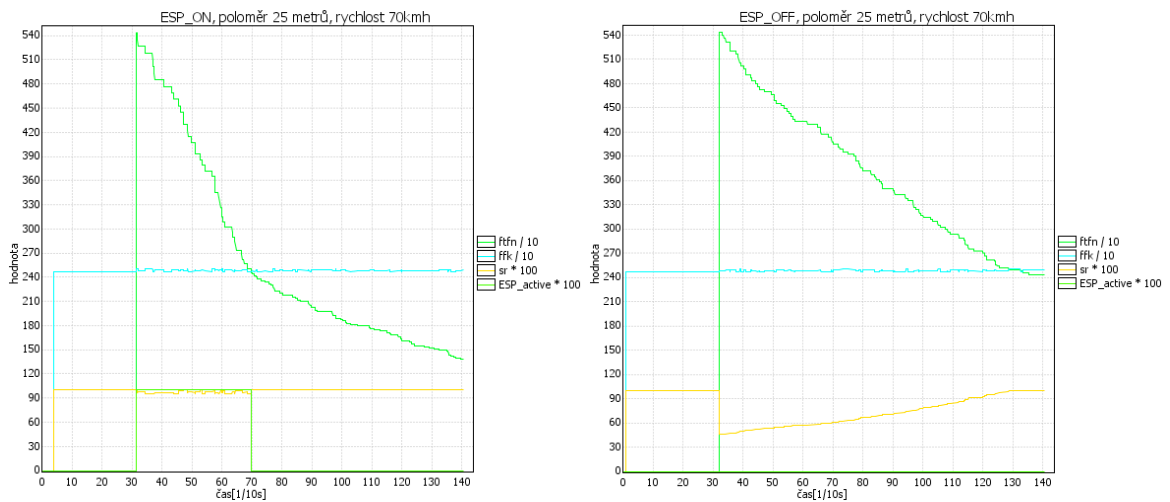
V první sadě grafů lze vidět rychlost vozidla, zrychlení v zatáčce, (ne)aktivní systém ESP a celkovou dobu potřebnou pro úplnou stabilizaci vozidla. Z levého grafu je zřejmé, že rychlost je regulována systémem ESP, který přibrzdí pravé zadní kolo silou *ESP_brake_force* a plné stability je dosaženo za 3.8 sekundy. V pravé část grafu bez systému ESP rychlost reguluje pouze odpor vzduchu a valivý odpor kol a proto lze vidět, že stabilizace je dosaženo až za 10.2 vteřiny, což znamená rozdíl 6.4 sekundy mezi vozidlem s ESP a vozidlem bez ESP. V druhé sadě grafů je popsána *stability_rate*, která ukazuje míru stability vozidla. Se systémem ESP je hodnota v rozmezí 94% – 99%, což znamená téměř plnou stabilitu. Bez systému ESP stabilita postupně narůstá, ale vozidlo je poměrně nestabilní. Míra stability je zpočátku na hodnotě 47% a poté postupně narůstá až do hodnoty 100% v čase 13,5 sekundy. Třetí sada grafů obsahuje vývoj potřebné síly pro zatočení a limitní síly pneumatik na přední nápravě. Pokud je vozidlo regulované systémem ESP je vidět podstatně strmější pád síly potřebné pro zatočení bez smyku. V případě, že vozidlo je stabilní na obou nápravách, tak systém ESP se deaktivuje.



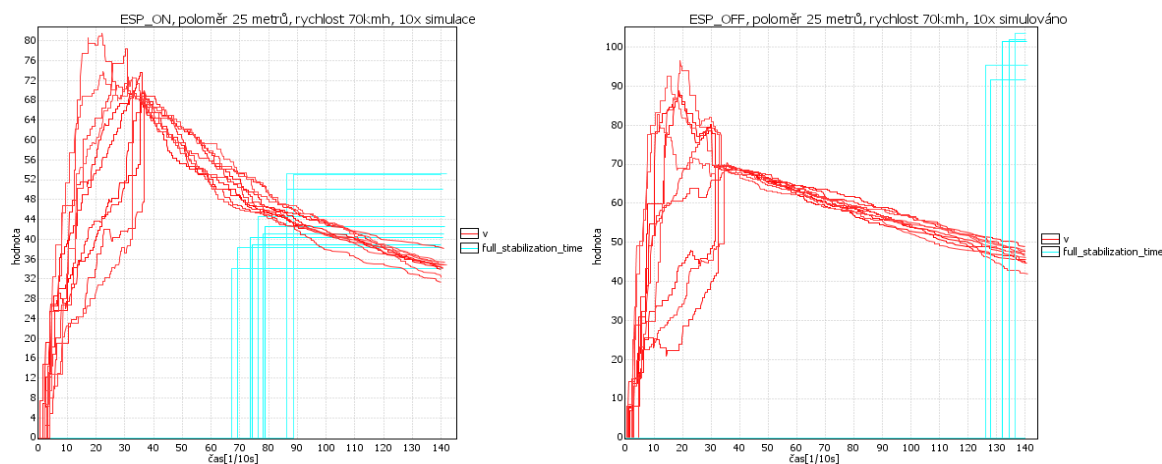
Obrázek 5.1: Graf závislosti rychlosti, akceleračního zrychlení, brzdné síly ESP a času pro stabilizaci, vlevo ESP_on vpravo ESP_off



Obrázek 5.2: Srovnání rychlosti a míry stability pro ESP_on a ESP_off



Obrázek 5.3: Porovnání síly potřebné pro zatočení a limitní síly pneumatik na přední nápravě



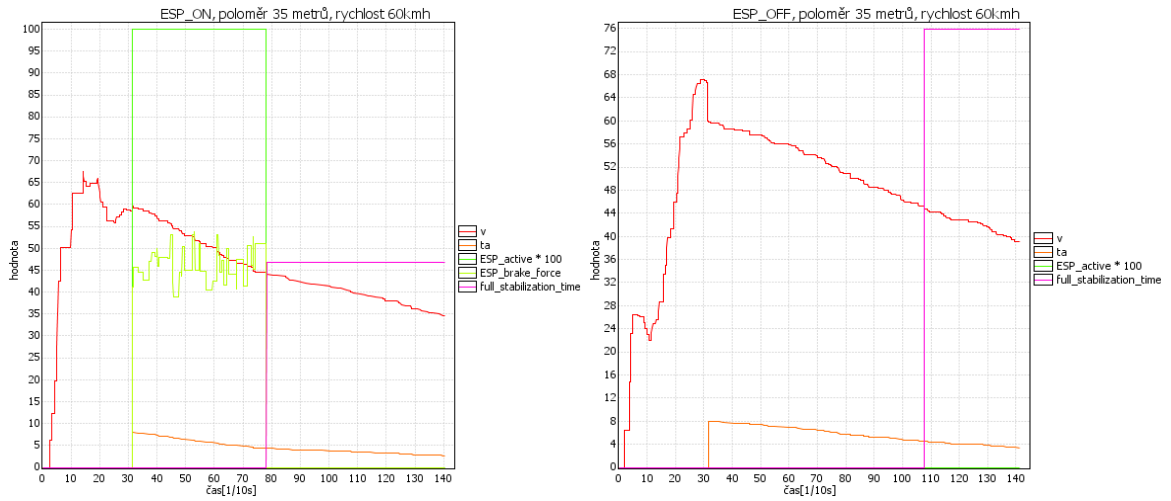
Obrázek 5.4: Vlevo: 10x simulace pro ESP_on
Vpravo: 10x simulace pro ESP_off

Na výše uvedeném obrázku je prezentováno 10 simulací se stejnými podmínkami, aby byla zřejmá variabilita výsledků. Nalevo je opět vozidlo s ESP a vpravo bez ESP. Pro porovnání výsledků bude vhodné použít proměnnou *full_stabilization_time*. Se systémem ESP tato hodnota je průměrně 4.41 sekundy a pro simulace bez ESP je průměr hodnoty 9.42 vteřiny.

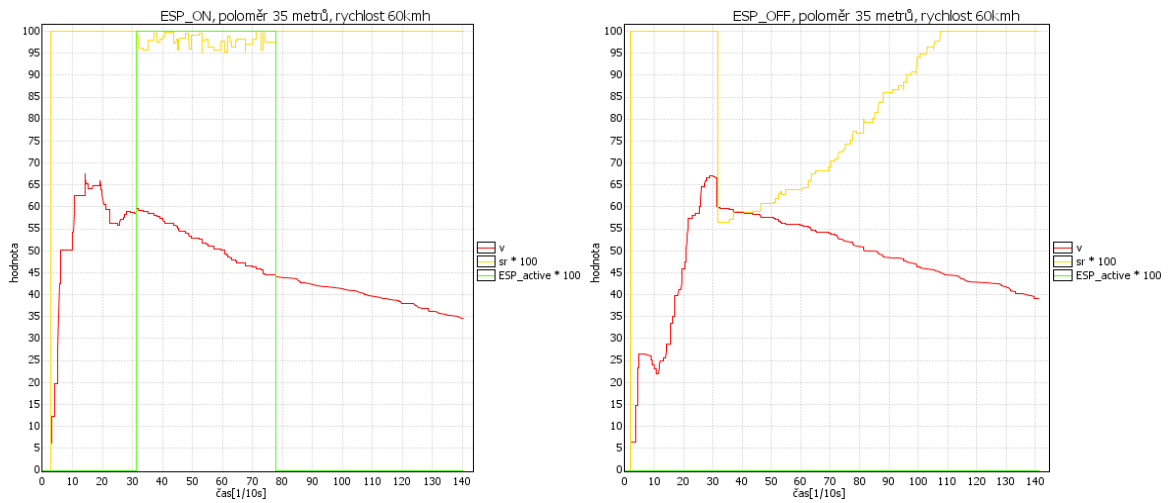
5.2 Test B: Průjezd zatáčkou o poloměru 35 metrů rychlostí 60kmh^{-1} , mokro

V testu druhém bude možno zkoumat vozidlo projíždějící pravotočivou zatáčkou na mokrém povrchu. Opět bude simulováno nedotáčivé chování vozidla s koeficientem dynamického tření nastaveným na 0.45 pod přední nápravou a 0.5 pod zadní nápravou. Rozdíl mezi jednotlivými koeficienty není velký, a proto brzdná síla, kterou bude muset systém ESP brzdit pravé zadní kolo nebude značná jako v 1. testu. Struktura grafů bude stejná jako předchozím případě 5.1.

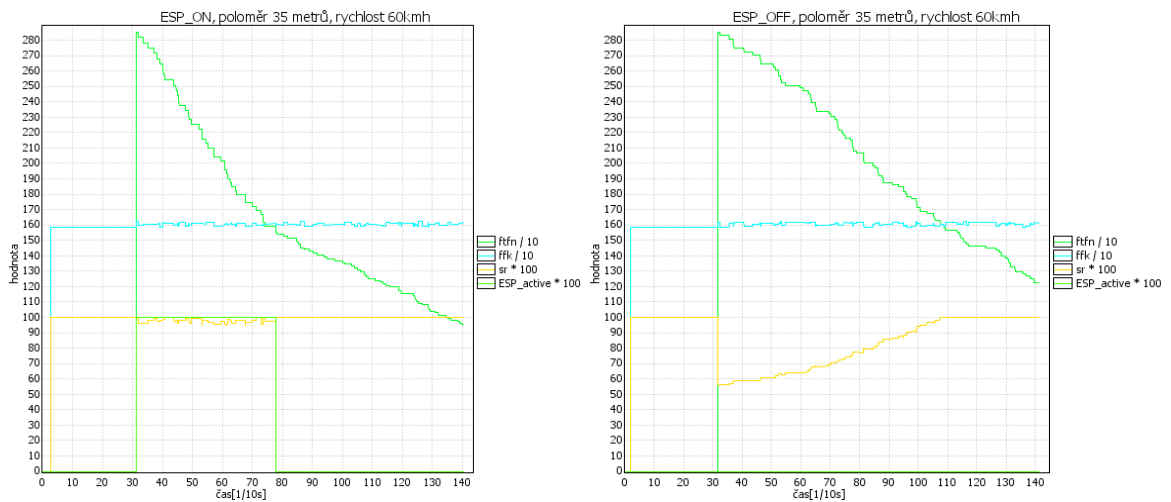
Z první sady je zřejmé, že systém ESP opět pomáhá řidiči se stabilizací vozidla. Brzdná síla je v průměru jen kolem $46[N]$ za jednotku času, ale i v tomto případě dosahuje ESP lepších výsledků než bez ESP. doba nutná pro plnou stabilizaci bez ESP 7.5 vteřiny a s ESP 4.7 sekundy. V druhé sadě lze opět vidět vývoj míry stability. S regulací se míra stability drží kolem 97%, zatímco bez regulace míra stability opět narůstá postupně se snižující se rychlostí. V poslední sadě grafu je prezentována síla pro zatočení na přední nápravě a limitní síla předních pneumatik.



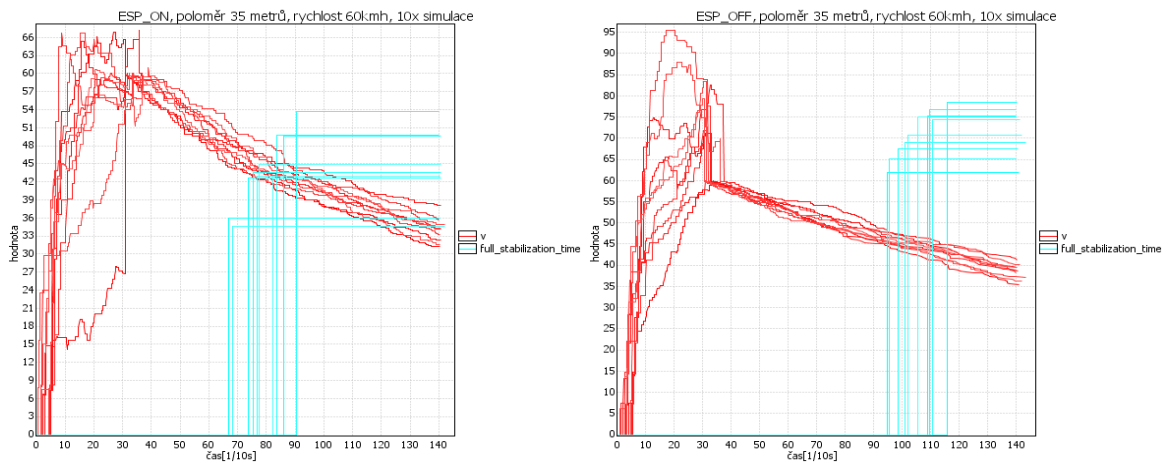
Obrázek 5.5: Graf závislosti rychlosti, akceleračního zrychlení, brzdné síly ESP a času pro stabilizaci, vlevo ESP_on vpravo ESP_off



Obrázek 5.6: Srovnání rychlosti a míry stability pro ESP_on a ESP_off



Obrázek 5.7: Porovnání síly potřebné pro zatočení a limitní síly pneumatik na přední nápravě



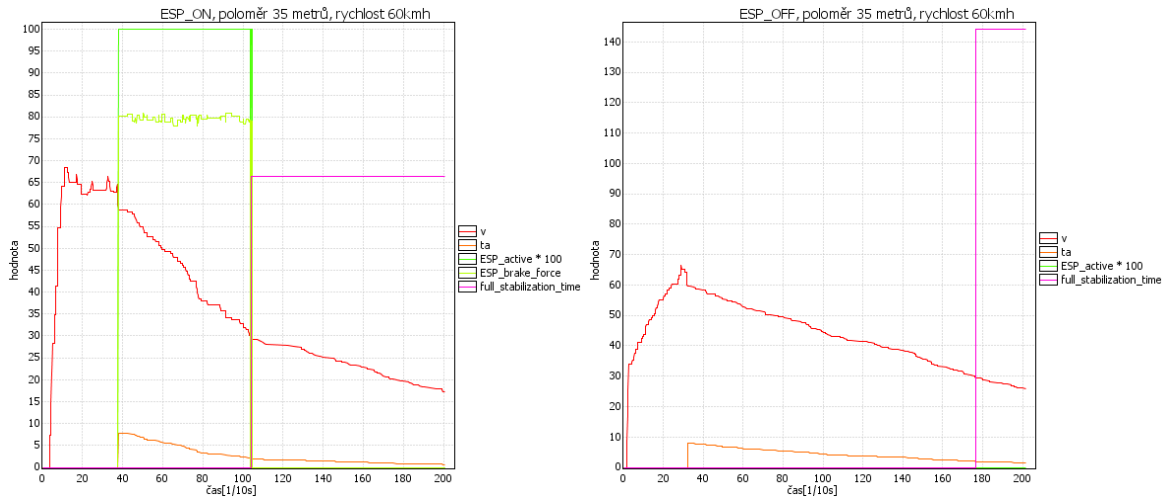
Obrázek 5.8: Vlevo: 10x simulace pro ESP_on
Vpravo: 10x simulace pro ESP_off

Opět je vhodné prezentovat i srovnání 10 simulací, aby bylo dokázáno, že se nejedná pouze o dílo náhody. Zde není rozdíl natolik markantní jako v 1. testu, ale i tak ESP dosahuje lepších výsledků s průměrnou dobou pro plnou stabilizaci 4.46s versus 7.05s.

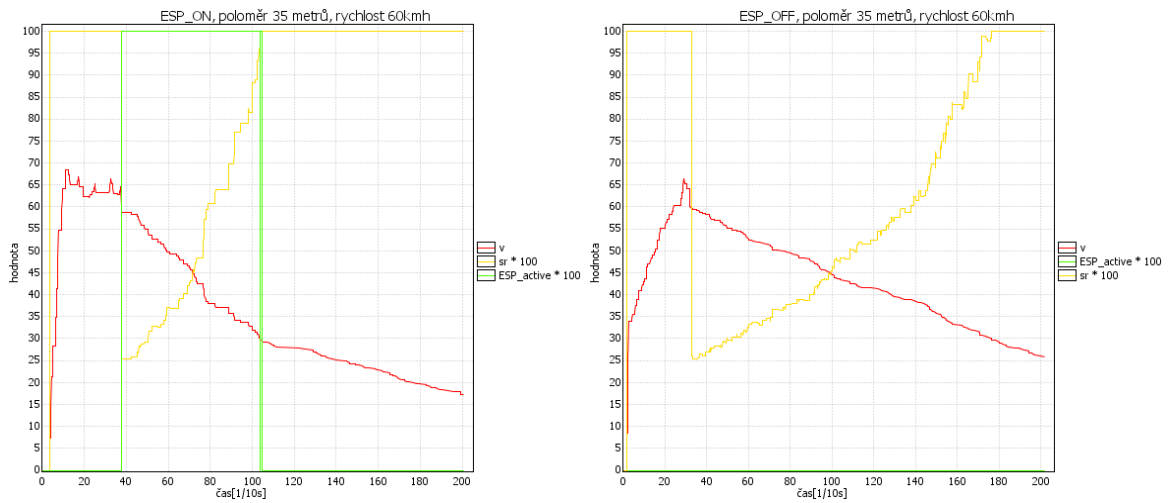
5.3 Test C: Průjezd zatáčkou o poloměru 35 metrů rychlostí 60kmh^{-1} , mokro/led

Třetí test bude prezentovat vozidlo přetáčivé projíždějící levotočivou zatáčku. Zatáčka bude mít poloměr 35 metrů a nájezdová rychlost bude 60kmh^{-1} . V zatáčce bude panovat poměrně nehostinné prostředí. Přední náprava pojedje po přijatelném povrchu, kterým bude mokrá asfalt (koeficient = 0.45). Zadní kola se ovšem budou pohybovat po čistém ledu (koeficient = 0.2), což je jeden z nejméně vhodných povrchů pro jízdu automobilu.

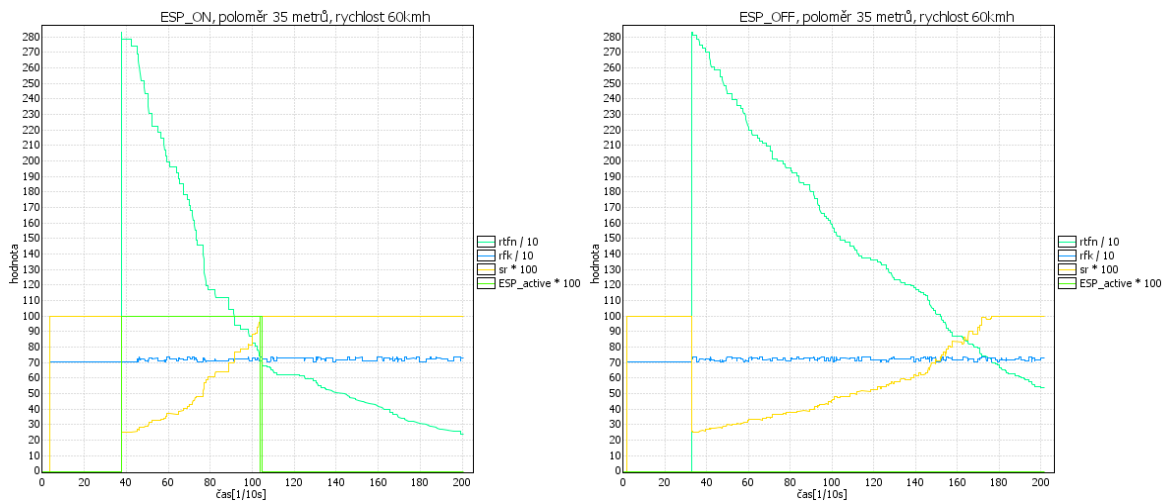
Struktura grafů bude shodná jako v předchozích dvou případech s rozdílem délky simulace. Ten je nutné prodloužit z 140 jednotek času na 200 jednotek. V první sadě grafů lze vidět absolutně propastný rozdíl mezi vozidlem s aktivním ESP a vozidla bez ESP. Systém ESP pracuje déle, než v předcházejících případech ale stále velmi efektivně. Brzdná síla se drží kolem hodnoty $80[N]$. V druhé sadě lze vidět, že ani systém ESP nezvládne vozidlo plně stabilizovat. Je to dáno skutečností, že brzdná síla vyžadována pro plnou stabilizaci je větší než limitní brzdná síla pneumatik. Systém ESP vyvíjí maximální možnou brzdnou sílu, ale nepřekročí limitní sílu pneumatik. V případě, že by ji překročil, došlo by k blokaci pneumatik a snížení efektivity brzdění. Je však vidět markantní rozdíl v rychlosti růstu míry stability. V následujících dvou grafech je prezentována limitní síla zadních pneumatik versus síla potřebná pro zatočení na zadní nápravě. Vozidlo se nyní chová přetáčivě, a proto se plné stability vozidla dosáhne až v případě, že není překonána limitní síla zadních pneumatik.



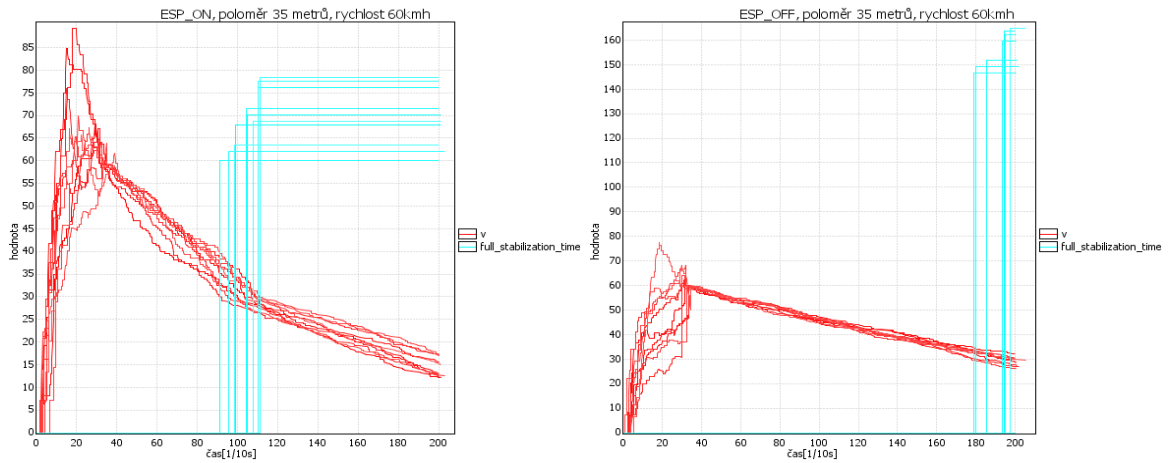
Obrázek 5.9: Graf závislosti rychlosti, akceleračního zrychlení, brzdné síly ESP a času pro stabilizaci, vlevo ESP_on vpravo ESP_off



Obrázek 5.10: Srovnání rychlosti a míry stability pro ESP_on a ESP_off



Obrázek 5.11: Porovnání síly potřebné pro zatočení a limitní síly pneumatik na zadní nápravě

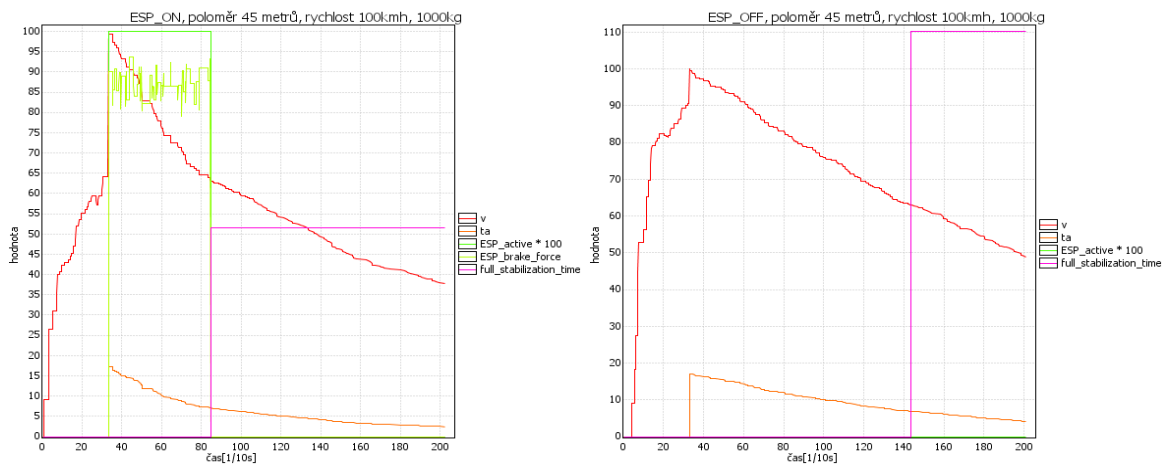


Obrázek 5.12: Vlevo: 10x simulace pro ESP_on
Vpravo: 10x simulace pro ESP_off

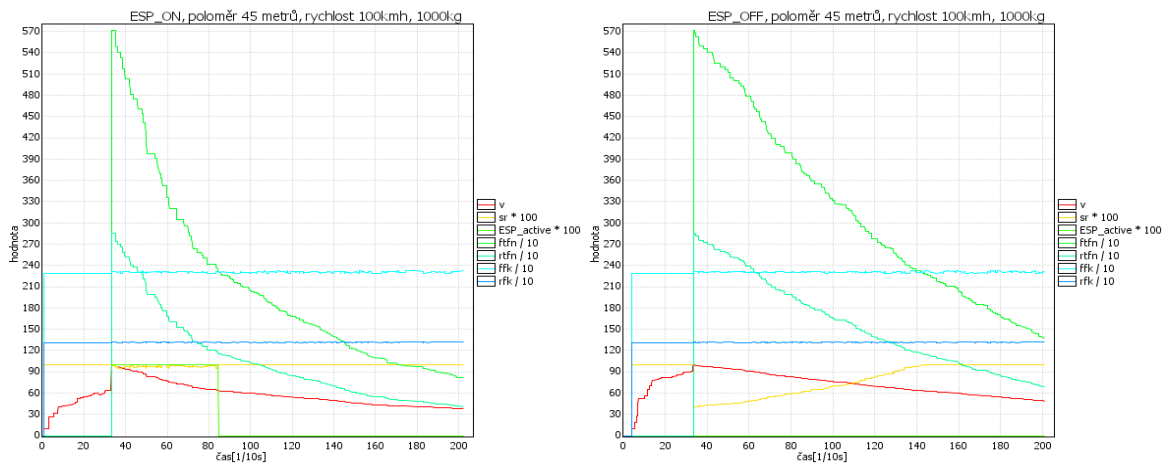
V předchozích dvou obrázcích lze opět porovnat vícenásobné simulace. Křivka rychlosti klesá podstatně rychleji se systémem ESP než bez něj. Lze si povšimnout absolutně propastného rozdílu v čase potřebném pro stabilizaci vozidla. Pro systém ESP je průměrná hodnota rovna 6,91 sekundy a pro vozidlo bez ESP 15,5 sekundy. Z vícenásobných simulací tedy není pochyb o velkém přínosu systému ESP pro stabilitu.

5.4 Test D: Porovnání chování vozidel různé hmotnosti

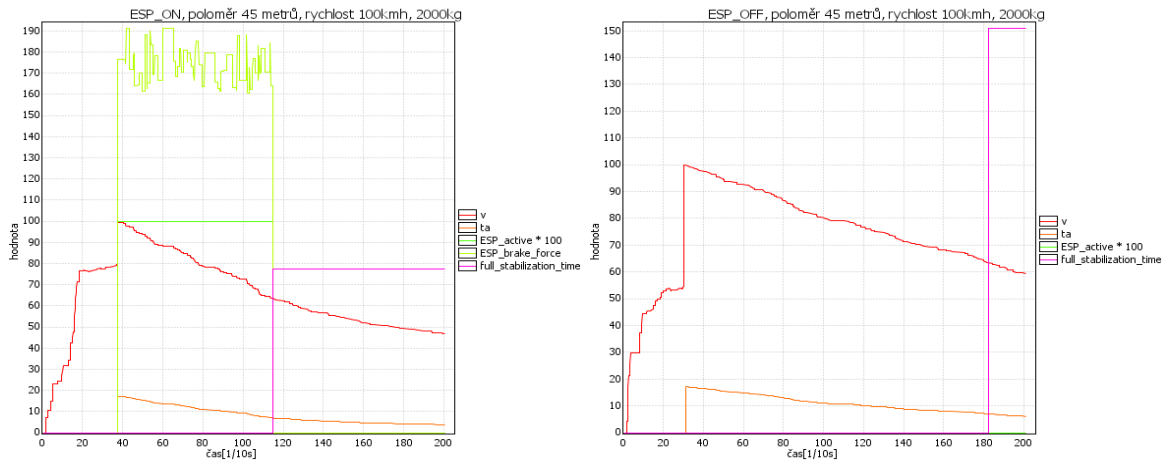
V testu čtvrtém se bude vozidlo pohybovat po suchém povrchu a bude mít nedotáčivé chování. Porovnávat se bude vliv hmotnosti při průjezdu zatáčkou. Koeficienty dynamického tření budou stejné jako v prvním testu 5.1. Nájezdová rychlost bude 100kmh^{-1} a poloměr zatáčky bude 45 metrů. Hmotnost bude v první sadě testů 1000kg a v druhé sadě 2000kg. Těžší vozidlo bude brzdít pomaleji než lehčí vozidlo, protože odpor vzduchu je pro obě vozidla shodný. Rozdíl bude pouze ve valivém odporu. Těžší vozidlo bude mít podstatně větší valivý odpor než lehčí vozidlo. Předpoklad je, že těžší vozidlo se bude stabilizovat déle než vozidlo lehčí nehledě na stav systému ESP. V první sadě lze vidět vývoj rychlosti, odstředivé síly v zatáčce, času potřebného pro stabilizaci a v případě ESP i brzdnu sílu. Čas pro stabilizaci dle předpokladu je lepší pro vozidlo s ESP 5,1 sekundy versus 10,8 sekundy bez ESP. Druhá sada grafů obsahuje vývoj limitních sil pneumatik a síly potřebné pro zatočení bez smyku. Další sada grafů je již s aplikovanou hmotností 2 tuny. ESP si opět počíná lépe. Vlivem vyšší váhy využije větší brzdnu sílu. Systém ESP zvládne auto stabilizovat 2x rychleji než bez systému ESP. V další sadě lze opět vidět vývoj limitních sil a sil potřebných pro zatočení bez smyku. Předpoklad byl tedy splněn. Vozidlo s ESP si v obou případech počínalo lépe. Stabilizace těžšího vozidla trvala pro (ne)aktivní ESP déle, než v případě lehčího vozidla.



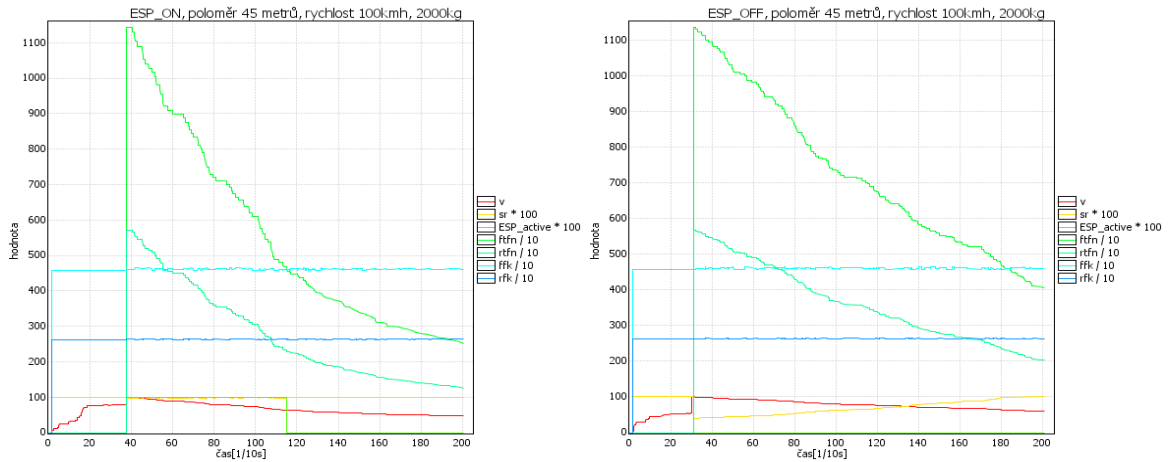
Obrázek 5.13: Graf závislosti rychlosti, akceleračního zrychlení, brzdné síly ESP a času pro stabilizaci, vlevo ESP_on vpravo ESP_off



Obrázek 5.14: Srovnání rychlosti, míry stability, vývoj limitních sil pneumatik a síly potřebné pro zatočení na obou nápravách pro ESP_on a ESP_off



Obrázek 5.15: Graf závislosti rychlosti, akceleračního zrychlení, brzdné síly ESP a času pro stabilizaci, vlevo ESP_on vpravo ESP_off



Obrázek 5.16: Srovnání rychlosti, míry stability, vývoj limitních sil pneumatik a síly potřebné pro zatočení na obou nápravách pro ESP_on a ESP_off

5.5 Pravděpodobnostní testy

Následující dva testy budou odlišné. Nebudou prezentované grafy, ale hodnoty pravděpodobnosti v tabulkách. Bude tedy zapotřebí určit v jakém intervalu má program hledat potencionální řešení. Dále je zapotřebí uvést jistotu s jakou má program pracovat (σ , *probabilityuncertainty*). Nižší nastavení nejistoty znamená delší běh programu. Pro testy se ověřila hodnota 0.05, která je výchozí hodnotou programu, jelikož poskytovala nejlepší poměr cena/výkon. UPPAAL poté simuluje běh programu potřebným počtem cyklů, aby splnil tuto podmínku. Test má v prostředí UPPAAL následující syntaxi:

$$Pr[<= 300](<> t > 290 \text{ and full_stabilization_time} < 140)$$

Simulace bude trvat 300 jednotek času. Délku simulace bylo potřeba nastavit větší, aby pokryla všechny možné běhy modelu. Čas t je vhodné zvolit ke konci simulace, aby bylo jisté, že zná požadovanou hodnotu. *Full_stabilization_time* je hodnota času potřebného pro stabilizaci. Tato hodnota se bude pro jednotlivé běhy pravděpodobnosti měnit.

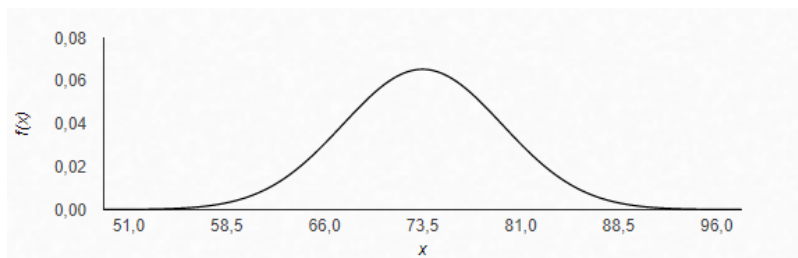
V následujícím testu bude opět porovnáváno vozidlo s ESP a bez systému ESP. Vozidlo bude nedotáčivé, na suchém povrchu, zatáčka o poloměru 35 metrů a nájezdová rychlost $100kmh^{-1}$. Cílem bude zjistit v jakém čase bude vozidlo stabilizováno.

V prvním sloupečku bude prezentován čas nutný pro plnou stabilizaci vozidla. Ve druhém bude pravděpodobnost na plnou stabilizaci v daném čase s ESP. V posledním sloupečku bude opět pravděpodobnost na plnou stabilizaci bez systému ESP.

t [1/10s]	ESP_ON, 35m radius, 100kmh	ESP_OFF, 35m radius, 100kmh
58	0 - 9.8%	
65	<16%	
70	<36%	
75	<57%	
80	<76%	
85	<93%	
90	<98%	
95	<100%	
137		0 - 9.8%
140		<11%
145		<18%
150		<31%
155		<45%
160		<58%
170		<83%
180		<100%

Tabulka 5.1: Porovnání pravděpodobnosti na plnou stabilizaci auta na suché vozovce

Jako příklad lze uvést třetí řádek tabulky. Pro čas 7.0 vteřiny je 36% pravděpodobnost na získání plné stability nad vozidlem. Z toho vyplývá, že ve více než třetině případů se podaří vozidlo systému ESP stabilizovat za méně než 7 vteřin při daných podmínkách. Oproti tomu bez systému ESP je pro čas 15.0 sekund pravděpodobnost na získání plné stability pouze 31%. Z tabulky je tedy zřejmé, že systém ESP je obrovskou výhodou.



Obrázek 5.17: Graf hustoty rozdělení pravděpodobnosti pro ESP_on

V druhém testu bude vozidlo nápravy na různých površích, tak jako v testu č.3 5.3. Přední náprava bude mít koeficient dynamického tření roven 0.3, což představuje suchý sníh. Pod zadními koly bude mokřý asfalt s koeficientem 0.5. Vozidlo tedy opět bude nedotáčivé. Zatáčka bude mít poloměr 35 metrů a nájezdová rychlost bude 60kmh^{-1} . Struktura tabulky bude stejná jako v předchozím případě 5.5.

t [1/10s]	ESP_ON, 35m radius, 60kmh	ESP_OFF, 35m radius, 60kmh
37	0 - 11%	
40	<15%	
45	<36%	
50	<60%	
55	<84%	
60	<98%	
65	<100%	
102		0 - 13%
105		<20%
115		<45%
120		<61%
130		<92%
140		<100%

Tabulka 5.2: Porovnání pravděpodobnosti na plnou stabilizaci auta na vozovce pokryté sněhem a mokřým asfaltem

Z testů pravděpodobnosti je opět zřejmé, že systém ESP výrazně pomáhá při řízení nestabilního vozidla. V čase 6.5 vteřiny mělo vozidlo 100% šanci na získání plné stability, zatímco bez systému ESP v čase 6.5 sekundy byla pravděpodobnost rovna nule. Až v čase 10.2 sekundy byla malá šance (< 13%) na získání plné stability. Stoprocentní šance na plně stabilní vozidlo bez systému ESP nastala až v čase 14 vteřin. Graf hustoty rozdělení pravděpodobnosti by měl být velmi podobný tvar jako v předchozím případě. Vyskytoval by se však na intervalu [37,65] pro aktivní systém ESP.

Kapitola 6

Závěr

Bakalářská práce potvrdila předpoklad, že systém ESP má pozitivní vliv na chování vozidla při zatáčení. Pomocí modelu bylo možné srovnat identické vozidlo se zapnutým systémem ESP a bez něj. Všechny testovací scénáře potvrdili fakt, že vozidlo ESP pozitivně ovlivňuje chování vozidla v zatáčce. Pomocí nástroje UPPAAL a jeho model-checkingu bylo možné systém ESP jednoduše vypnout, provádět simulace a experimenty, potom systém ESP zapnout a sledovat změny. V kapitole páté jsou tyto výsledky shrnuty do přehledných grafů vedle sebe a výsledky lze snadno analyzovat. Model se pro zvolené vstupy choval vždy dle předpokladů a dle vstupů a výstupů lze model prohlásit za validní.

Systém ESP je nadstavbou systémů ABS a ASR, ale ty se zpravidla uplatňují pouze v podélném směru jízdy a jelikož se práce zabývala chováním vozidla při zatáčení nebylo nezbytné tyto systémy modelovat. Jejich funkcionalita byla dosažena tím, že aplikované brzdné a akcelerační síly nikdy nepřesáhly limitní síly pneumatik. Automobil je velmi komplexní stroj a pokrytí většího množství fyzikálních sil a jevů při zatáčení, akceleraci a brzdění by přesáhlo rozsah této bakalářské práce. Práce by se přesto dala rozšířit o několik zajímavých rozšíření, které by mohly přesněji reflektovat reálnou podobu automobilu.

Plnohodnotné systémy ABS a ASR. Jak bylo řečeno v předchozím odstavci, plnohodnotné systémy ABS a ASR nejsou v modelu implementovány. Jejich implementací by tedy model nebyl nucen kontrolovat, zda síly působící po nebo proti směru pneumatik nejsou překročeny. Brzdná síla by tedy mohla být větší, než je limitní síla pneumatik. Pneumatika by se zablokovala, došlo by ke snížení přenosu síly a systém ABS by zareagoval snížením brzdné síly. V případě akcelerace by síly mohly být rovněž překročeny, jelikož by systém ASR uměl detekovat prokluzující kolo a přibrzdit jej. Vozidlo by se tedy více přiblížilo reálnému stavu.

Přesun těžiště. Stacionární vozidlo, které se nehýbe nebo udržuje konstantní rychlost má těžiště ve stejném bodu. Pokud však vozidlo akceleruje, brzdí, nebo zatáčí vlivem působících sil se těžiště přesouvá. V modelu je těžiště určeno staticky a po dobu jízdy modelu je neměnné. Do vozidla by se dal implementovat akcelerometr, který by měřil přetížení vozidla a mohl by těžiště vozidla měnit.

Model zanedbává fakt, že při **působení příčné a podélné síly** se efektivní síla, kterou pneumatika přeneše sníží. Viz obrázek frikčního kruhu. 4.1 V modelu by se tedy dala implementovat funkce, která by tyto síly reflektovala k reálnější situaci.

Při zatáčení dochází i k přesunu váhy na vozidle. Při průjezdu zatáčkou se vnitřní kola odlehčují a vnější kola se zatěžují více. Při průjezdu by tedy mohl být dále implementován model či funkce, která by vnitřní pneumatiky odlehčovala a vnější naopak více zatěžovala. Zmíněné rozšíření by vyžadovalo modelovat každé kolo zvlášť a studium přesunu váhy při působení příčných sil na vozidlo.

Kondice pneumatik. V reálném provozu se pneumatiky opotřebovávají působícími vlivy jako jsou jízda, měnící se povětrnostní podmínky, nečistoty, zub času... Tím se může snižovat jejich efektivita a snižovat efektivní síla, kterou přenesou. Dále by se pneumatika postupnými simulacemi mohla opotřebovávat. Po 100 simulacích by její kondice mohla klesnout například o 10% a bylo by zajímavé sledovat postupně se snižující efektivitu pneumatik.

Kondice brzd a brzdná soustava. V části 3 byly popsány odlišné brzdové soustavy. Každý druh brzdové soustavy přináší své výhody a nevýhody. Kotoučové brzdy jsou výkonnější, ale nejsou tak odolné jako bubnové brzdy. Model by tedy mohl pro každou nápravu obsahovat popis brzdné soustavy a její kondici a podobně jako u pneumatik by mohly být brzdy postupně opotřebovávány postupnými simulacemi. Každá z náprav by tedy mohla poskytnout rozdílné vlastnosti v brzdění vozidla.

Časová doména. V modelu by se mohl čas přesunout z řádu desetin vteřiny do řádů milisekund, či mikrosekund. Model byl navržen pro desetiny sekund, jelikož řidič reaguje na podněty v řádů desetin sekundy až sekund. Systém ESP ale dokáže pracovat v řádech milisekund, či mikrosekund. Obsahuje výkonné mikroprocesory a elektroniku všeobecně, která se pohybuje v těchto řádech. Bylo by tedy možné lépe vystihnout odezvu systému ESP, odezvu brzdného systému a odezvu řidiče.

Literatura

- [1] [online]. Dostupné z: <https://saopovrch.files.wordpress.com/2012/12/system11.jpg>.
- [2] [online]. Dostupné z: <https://saopovrch.files.wordpress.com/2012/12/system11.jpg>.
- [3] [online]. Dostupné z:
https://www.sszepreprov.cz/dum/mov/VY_32_INOVACE_MOV_2ROC_07.pdf.
- [4] [online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/docs-images/25/6854319/images/5-0.png>.
- [5] [online]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/86/Antilock_Braking_System.svg/1200px-Antilock_Braking_System.svg.png.
- [6] [online]. Dostupné z: https://autoblink.sk/wp-content/uploads/2019/04/Kontrollleuchte_ESP_2_black.svg_-650x520-650x520-650x520.png.
- [7] [online]. Dostupné z: https://www.autoforum.cz/tmp/magazin/li/Losi_testy_Teknikens_Varld_kombi_schema2.jpg.
- [8] *Brzdy a brzdový systém automobilu* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z:
<https://www.automonti.cz/pdf/brzdy-brzdovy-system.pdf>.
- [9] *Static and Kinetic Friction* [online]. [cit. 2020-5-21]. Dostupné z: http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/ben_townsend/staticandkineticfriction.htm.
- [10] Nedotáčivost. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 2004. [rev. 2018-09-28]. [vid. 2020-05-13]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Nedotáčivost>.
- [11] Přetáčivost. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 2004. [rev. 2018-09-28]. [vid. 2020-05-13]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Přetáčivost>.
- [12] *Reakční doba řidiče* [online]. 2013 [cit. 2020-5-12]. Dostupné z:
<http://www.nehoda.eu/?p=167>.
- [13] BERTOLD. *Odpor vzduchu rôznych kategórií áut* [online]. [cit. 2020-5-18]. Dostupné z:
<https://blog.auto.cz/aktivnyblogger/2017/03/odpor-vzduchu-roznych-kategorii-aut/>.
- [14] HOLÝ, P. *Hydraulické brzdy* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z:
<https://saopovrch.wordpress.com/servis-a-opravy/hydraulicke-brzdy/>.
- [15] HOLEC, D. *Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla*. 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií.

- [16] JEREW, B. *ELECTRONIC STABILITY CONTROL: A SHORT HISTORY* [online]. [cit. 2020-5-12]. Dostupné z: <http://knowhow.napaonline.com/electronic-stability-control-a-short-history/>.
- [17] LARSEN, K. G. *Introduction* [online]. [cit. 2020-5-15]. Dostupné z: <http://www.uppaal.org/>.
- [18] MAŇÁK, R. *Systémy bezpečnosti provozu vozidla*. 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [19] MIHÁLIK, M. *ESP je od listopadu povinné. Bylo to opravdu nutné?* [online]. [cit. 2020-5-12]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/zivot-ridice/esp-je-od-listopadu-povinne-bylo-to-opravdu-nutne/>.
- [20] MUSIL, J. *Elektronické stabilizační systémy osobních automobilů*. Brno, 2011. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [21] ODEHNAL, J. *Stabilizační systémy osobních automobilů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [22] ČÍPEK, R. *Návrh a realizace výukového modelu ABS*. 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [23] PERINGER, P. *Modelování a simulace - Studijní opora*. 2012.
- [24] SLÍŽ, M. *Diagnostika pasivních a aktivních bezpečnostních prvků vozidel*. 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [25] THE MATHWORKS INC. *Modeling an Anti-Lock Braking System* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/modeling-an-anti-lock-braking-system.html;jsessionid=8bd27ed071b4a93a606bda297dcb?w.mathworks.com>.
- [26] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory: hnací charakteristika: brzdění: odpružení: říditelnost, ovladatelnost: stabilita*. 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [27] VLK, F. *Elektronické systémy motorových vozidel*. 2. vyd. 2002. ISBN 80-238-7282-6.