

ANALÝZA A SYNTÉZA ANTIBLOKOVACIEHO BRZDOVÉHO SYSTÉMU VOZIDLA V PROSTREDÍ MATLAB-SIMULINK

P. Žilák, M. Smeja, C. Belavý

Katedra Automatizácie, informačnej a prístrojovej techniky, Strojnícka fakulta,
Slovenská technická univerzita Bratislava

Abstrakt

Vývoj a zdokonaľovanie systémov aktívnej bezpečnosti motorových vozidiel je na reálnych modeloch finančne a časovo náročné, preto sa pri výbere a optimalizácii navrhnutých riešení využívajú softvérové prostredia, napr. Matlab – Simulink. V článku je pre účely analýzy a syntézy antiblokovacieho systému vozidla zostavený štvrtinový dynamický model vozidla, ktorý umožňuje simulovať brzdný proces. Na vytvorení modelu bola realizovaná syntéza regulátora ABS pre rôzne adhézne podmienky kolesa a vozovky. K modelu bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie pre zadávanie parametrov modelu, sklzových charakteristík a podmienok simulácie. V závere článku sú graficky znázornené výsledky simulácie brzdovania vozidla s ABS.

1 Úvod

Antiblokovací brzdový systém (ABS) v motorových vozidlách zabraňuje blokovaní kolies počas brzdovania. Umožňuje tým vodičovi udržať kontrolu nad riadením vozidla a zároveň prispieva k skráteniu brzdného dráhy. Z hľadiska riadenia je to spätnoväzbový riadiaci systém, ktorý na základe merania decelerácie kolesa reguluje brzdný tlak a tým udržiava sklz kolesa na optimálnej hodnote.

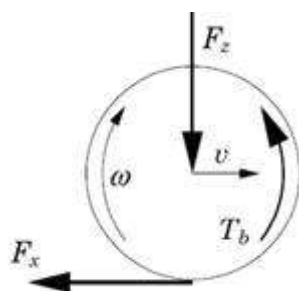
Dynamický rozvoj elektroniky otvára nové možnosti implementácie riadiacich systémov do automobilov, ABS sa stáva súčasťou ďalších stabilizačných systémov, napr. (ESP). Keďže vývoj a zdokonaľovanie týchto bezpečnostných systémov je na reálnych modeloch finančne a časovo náročné, využívajú sa pri výbere a optimalizácii navrhnutých riešení softvérové prostredia, v ktorých je možné zostavením adekvátneho matematického modelu otestovať a optimalizovať dané riešenie. Jedným z týchto softvérových produktov je Matlab - Simulink.

V článku je zostavený štvrtinový model vozidla, ktorý dostatočne opisuje dynamiku vozidla a umožňuje simulovať brzdný proces. Model je zostavený z jednotlivých subsystémov, ktoré vhodným spojením vytvoria celkový model reprezentujúci správanie sa vozidla pri brzdení. Pri vytváraní subsystémov ako aj celkového modelu bolo využité programové vybavenie softvérového prostredia Matlab – Simulink.

Na vytvorení modelu bola realizovaná syntéza regulátora ABS pre rôzne adhézne podmienky kolesa a vozovky. Optimalizácia parametrov PID regulátora bola realizovaná s využitím optimalizačného toolboxu. Na uľahčenie simulácie bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie pre zadávanie parametrov modelu, sklzových charakteristík a podmienok simulácie. V závere článku sú znázornené niektoré výsledky simulácie brzdovania vozidla s ABS: časový priebeh uhlovej rýchlosti kolesa vzhľadom na rýchlosť vozidla a relatívny sklz kolesa.

2 Dynamický model vozidla

Na analýzu a syntézu antiblokovacieho brzdového systému bol zostavený štvrtinový model motorového vozidla, ktorý reprezentuje dynamické správanie vozidla pri plnom brzdení. Východiskovými vzťahmi sú dynamické rovnice pohybu kolesa, obr. 1 a dynamická rovnica pohybu automobilu, (Solyom, 2002). Uvedený model je ďalej implementovaný do softvérového prostredia Matlab – Simulink ako subsystém a pri simulácii sa využíva na určenie rýchlostí.



Obrázok 1: Dynamika kolesa pri brzdení vozidla: F_z – vertikálna sila, F_x – trakčná sila, T_b – brzdový moment, ω – uhlová rýchlosť kolesa, v – rýchlosť vozidla

Dynamické rovnice pohybu kolesa s polomerom r , momentom zotrvačnosti J a štvrtinovej hmotnosti automobilu m sú pri brzdení v tvare:

$$J \dot{\omega} = rF_x - T_b \quad (1)$$

$$m \dot{v} = -F_x \quad (2)$$

Pôsobením hnacieho momentu alebo brzdneho momentu na pneumatiku vzniká trakčná sila v stykovej ploche medzi pneumatikou a vozovkou. Hnací moment spôsobuje deformáciu plášt'a pneumatiky v prednej časti stykovej plochy, takže pneumatika prejde kratšiu dráhu, ako keby sa len voľne odvaľovala. Brzdny moment spôsobuje rozťahnutie plášt'a vo vnútri stykovej plochy a v prednej časti. Výsledkom toho je, že pneumatika prejde dlhšiu dráhu, ako by prešla pri voľnom odvaľovaní. Tento fenomén sa nazýva sklz pneumatiky a je definovaný vzťahom:

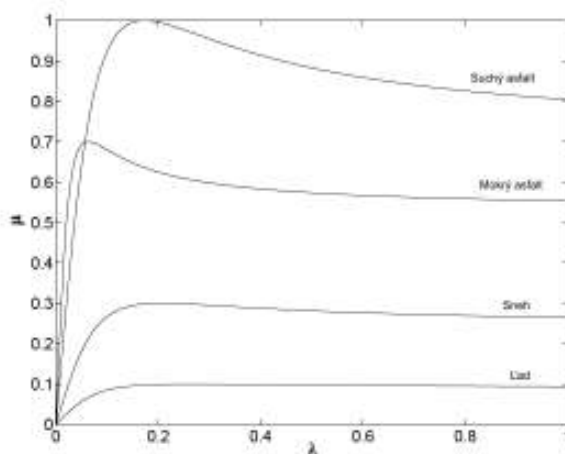
$$\lambda = \frac{(v - \omega r)}{v}, \omega \neq 0 \quad (3)$$

kde $\omega = v/r$ je uhlová rýchlosť pneumatiky vozidla. Hodnota sklzu $\lambda = 0$ ($\omega r = v$) predstavuje voľné valenie kolesa. Ak sklz nadobúda hodnotu $\lambda = 1$, koleso je zablokované ($\omega = 0$).

Trakčná sila (trécia) v styku pneumatiky s vozovkou je definovaná vzťahom:

$$F_x = F_z \cdot \mu(\lambda, \mu_H, \alpha, F_z, v) \quad (4)$$

kde normálna sila závisí od parametrov vozidla ako hmotnosť, polohy ťažiska, dynamiky riadenia a pruženia. Súčiniteľ príľnavosti $\mu(\lambda, \mu_H, \alpha, F_z, v)$ je nelineárnou funkciou sklzu kolesa λ . Pre rôzne jazdné podmienky dané povrchom vozovky majú krivky príľnavosti rôzne priebehy s maximálnou hodnotou μ_H , obr. 2. Súčiniteľ príľnavosti ovplyvňujú parametre ako rýchlosť, zaťaženie, uhol smerovej odchýlky α , povrch vozovky, vlastnosti pneumatiky. Jeho typický rozsah je v rozmedzí 0,1 (ľad) až 1 (suchý asfalt a betón).



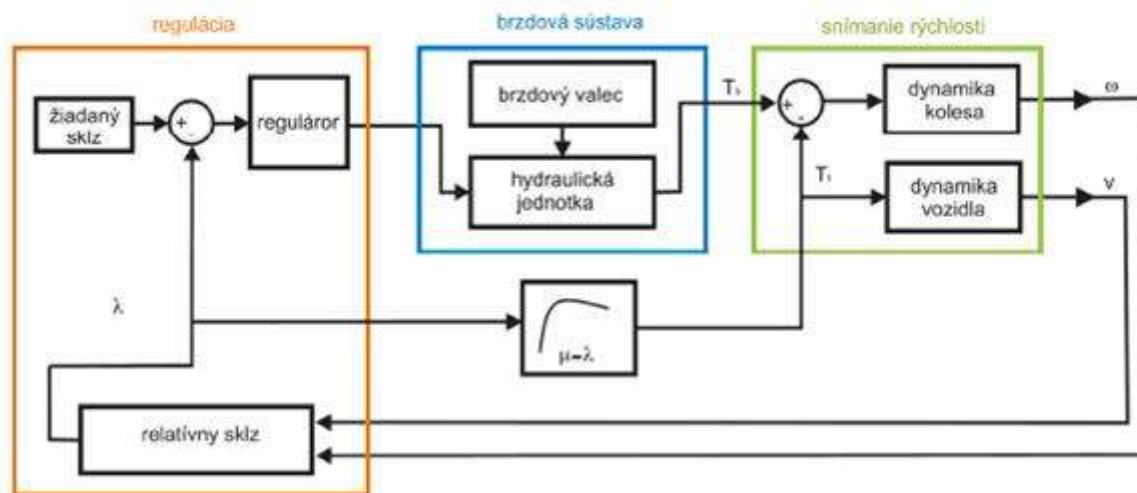
Obrázok 2: Závislosť súčiniteľa príľnavosti od sklzu pre rôzne jazdné podmienky

3 Návrh dynamického modelu brzdového systému s ABS v prostredí Matlab-Simulink

Návrh dynamického modelu brzdového systému s antiblokovacím systémom ABS pre účely simulácie v softvérovom prostredí Matlab – Simulink vychádza z vyššie opísaných zákonitostí dynamiky kolesa a vozidla. Model je zostavený z jednotlivých subsystémov, ktoré vhodným spojením vytvoria celkový model reprezentujúci správanie sa vozidla pri brzdení, obr.3.

Celkový model tvoria subsystémy, ktoré sú vo vzájomnej interakcii:

- subsystém brzdovej sústavy
- subsystém snímania rýchlosti
- subsystém riadenia

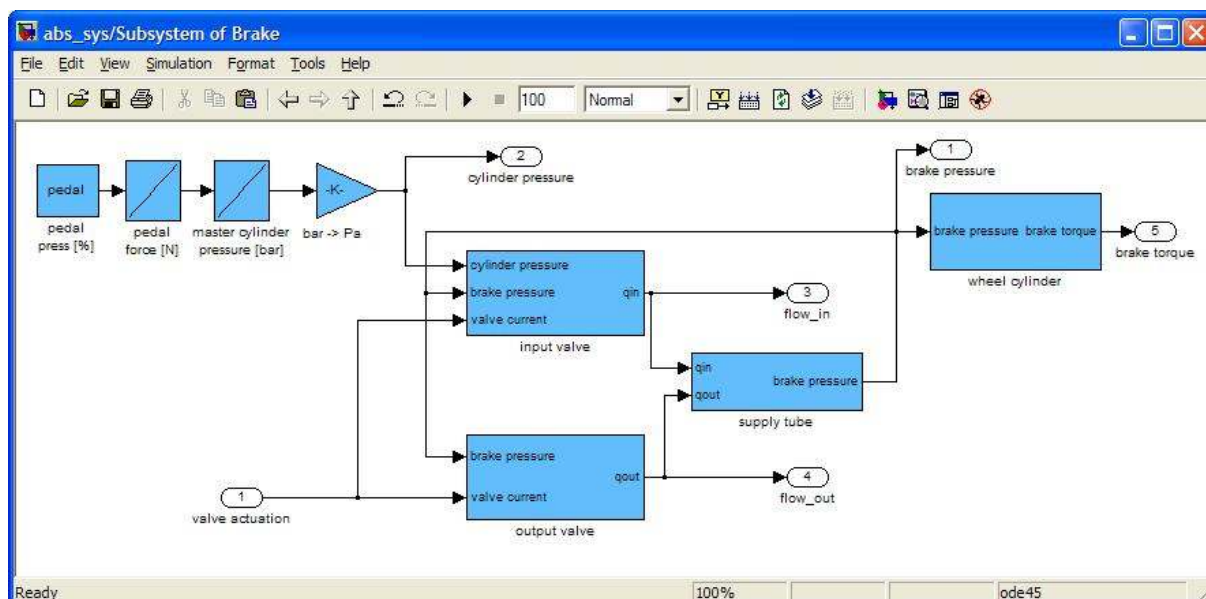


Obrázok 3: Dynamický model vozidla zložený s jednotlivých subsystémov

3.1 Subsystém brzdovej sústavy

V subsystéme brzdovej sústavy, obr. 4 je brzdová sústava modelovaná z nasledujúcich častí:

- hlavný brzdový valec
- elektromagnetické ventily
- brzdové potrubie
- kolesový brzdový valec



Obrázok 4: Subsystém brzdovej sústavy

Hlavný brzdový valec

Pôsobením sily (%) na pedál brzdy sa vyvolá posuv hydraulického piesta hlavného brzdového podľa záťažovej charakteristiky. Brzdny tlak vstupujúci do brzdového systému je úmerný polohe hydraulického piesta hlavného brzdového valca, ktorú reprezentuje záťažová charakteristika.

Elektromagnetické ventily

Elektromagnetické ventily slúžia na moduláciu brzdného tlaku počas činnosti ABS prepínaním sa do dvoch polôh: 1 – otvorený, 2 – zatvorený, čo vyvodzuje tri stavy modulácie tlaku: 1 – zvýšenie tlaku, 2 – udržanie tlaku, 3 – zníženie tlaku. V modeli sú dva oddelené elektromagnetické ventily: vstupný a výstupný.

Modulácia brzdového tlaku nastáva prepínaním polohy (otvorený/zatvorený) vstupného elektromagnetického ventilu. Prepínanie polohy ventilu je riadené regulátorom, ktorý generuje signály na základe odchýlky medzi žiadaným sklzom a relatívnym sklzom. Signály sa prenášajú do vinutia elektromagnetického ventilu vo forme prúdu. Ak vstupným elektromagnetickým ventilom neprechádza žiadny prúd, ventil je otvorený.

Počas činnosti ABS v prípade potreby zníženia tlaku v brzdovom systéme sa otvorí výstupný elektromagnetický ventil. Kvapalina z brzdového potrubia preteká cez výstupný ventilu pokiaľ je otvorený. Zmena tlaku (pokles) v brzdovom potrubí je úmerná množstvu kvapaliny, ktorá pretečie prietokový prierez výstupného ventilu. Prietok je úmerný dobe, za ktorú preteká kvapalina z brzdového potrubia cez prietokový prierez výstupného ventilu.

Brzdové potrubie

Brzdové potrubie spája hlavný brzdový valec s kolesovým brzdovým valcom. Prietok kvapaliny v brzdovom potrubí predstavuje rozdiel vstupného prietoku pretekajúceho vstupným elektromagnetickým ventilom a výstupného prietoku pretekajúceho výstupným elektromagnetickým ventilom. Zmena tlaku pôsobiaceho na piest kolesového brzdového valca zodpovedá čistému prietoku v objeme potrubia. V modeli je zohľadnený modul stlačenia kvapaliny.

Kolesový brzdový valec

Tlak v brzdovom potrubí pôsobí na plochu piesta kolesového brzdového valca. Výsledný brzdny moment na kolese je úmerný polomeru brzdového kotúča.

3.2 Subsystem snímania rýchlosti

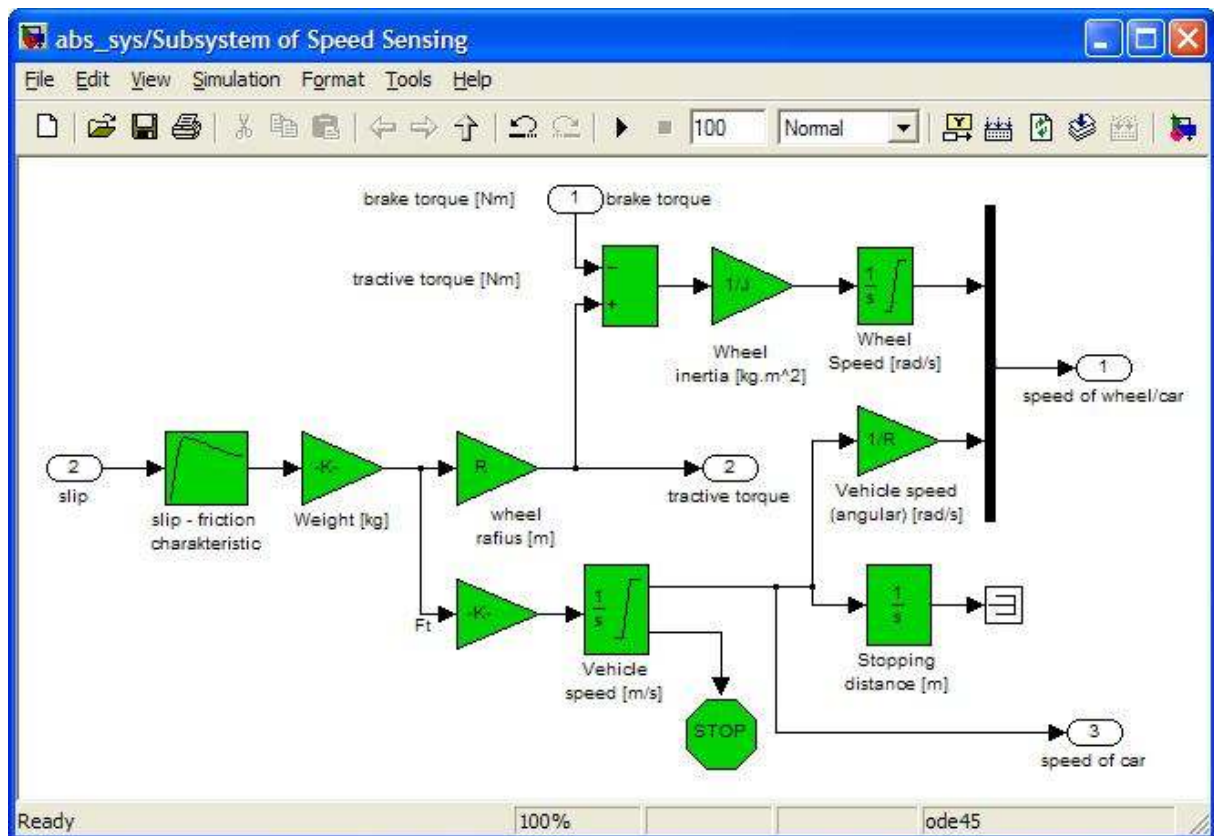
Snímanie rýchlosti predstavuje základný predpoklad pre určenie relatívneho sklzu kolesa. V subsysteme snímania rýchlosti, obr. 5, je snímanie realizované na základe merania uhlovej rýchlosti kolesa ako výstupu dynamiky kolesa a lineárnej rýchlosti vozidla ako výstupu dynamiky vozidla.

Dynamika kolesa je daná rozdielom trakčného a brzdného momentu pôsobiaceho na koleso. Trakčná sila medzi kolesom a vozovkou predstavuje súčin zvislého zaťaženia vozidla a súčiniteľa príľnavosti. Trakčný moment je modelovaný ako súčin trakčnej sily a polomeru kolesa. Zrýchlenie kolesa je vypočítané z podielu výsledného momentu pôsobiaceho na koleso a momentu zotrvačnosti kolesa. Uhlová rýchlosť kolesa sa vypočítava deriváciou zrýchlenia.

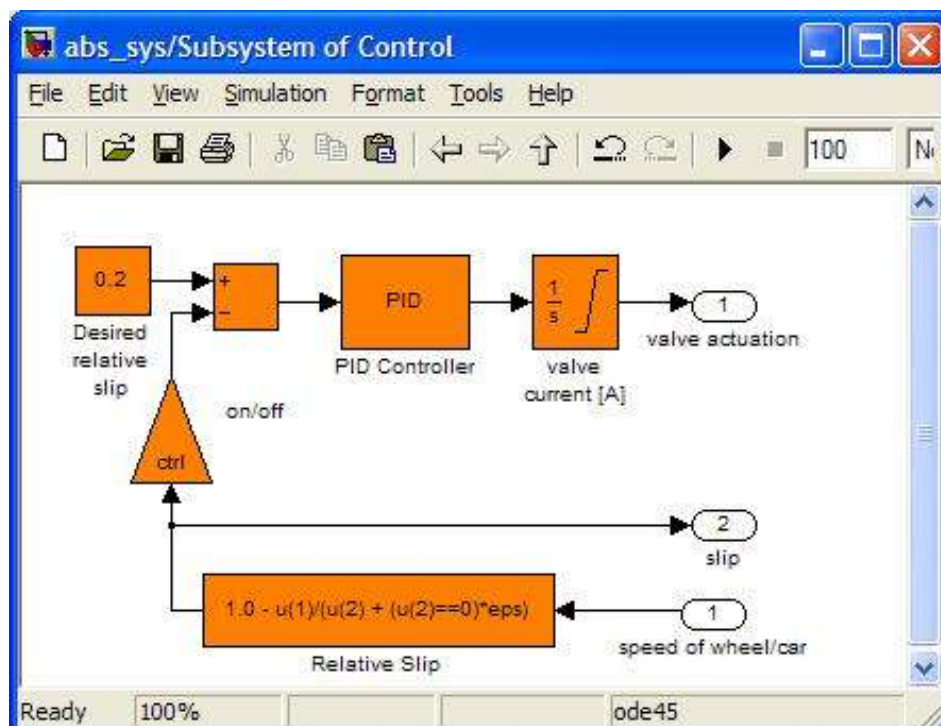
Dynamika vozidla je závislá od veľkosti trakčnej sily medzi kolesom a vozovkou a je daná ako súčin zvislej sily F_z a μ . Zrýchlenie vozidla reprezentuje podiel trakčnej sily a hmotnosti vozidla. Integráciou zrýchlenia sa vypočítava rýchlosť vozidla. Integráciou rýchlosti sa vypočítava brzdná dráha vozidla. Uhlová rýchlosť sa získava z podielu rýchlosti vozidla a polomeru kolesa.

3.3 Subsystem riadenia

Výstupné parametre dynamiky kolesa (uhlová rýchlosť kolesa) a dynamiky vozidla (rýchlosť vozidla) sú vstupnými parametrami pri výpočte relatívneho sklzu kolesa (3). Vypočítaná hodnota sklzu vstupuje do regulátora spolu so žiadanou hodnotou sklzu (vrchol krivky sklzovej charakteristiky). Regulátor na základe regulačnej odchýlky generuje akčnú veličinu, ktorá je cez zosilnenie zavedená do elektromagnetických ventilov vo forme prúdu, čím ovláda ich stav. Cieľom riadenia je dodržať referenčnú hodnotu sklzu, pričom musí byť zabezpečená aplikácia maximálneho brzdného tlaku pre dosiahnutie maximálnej trakčnej (trecej) sily medzi pneumatikou vozovkou.

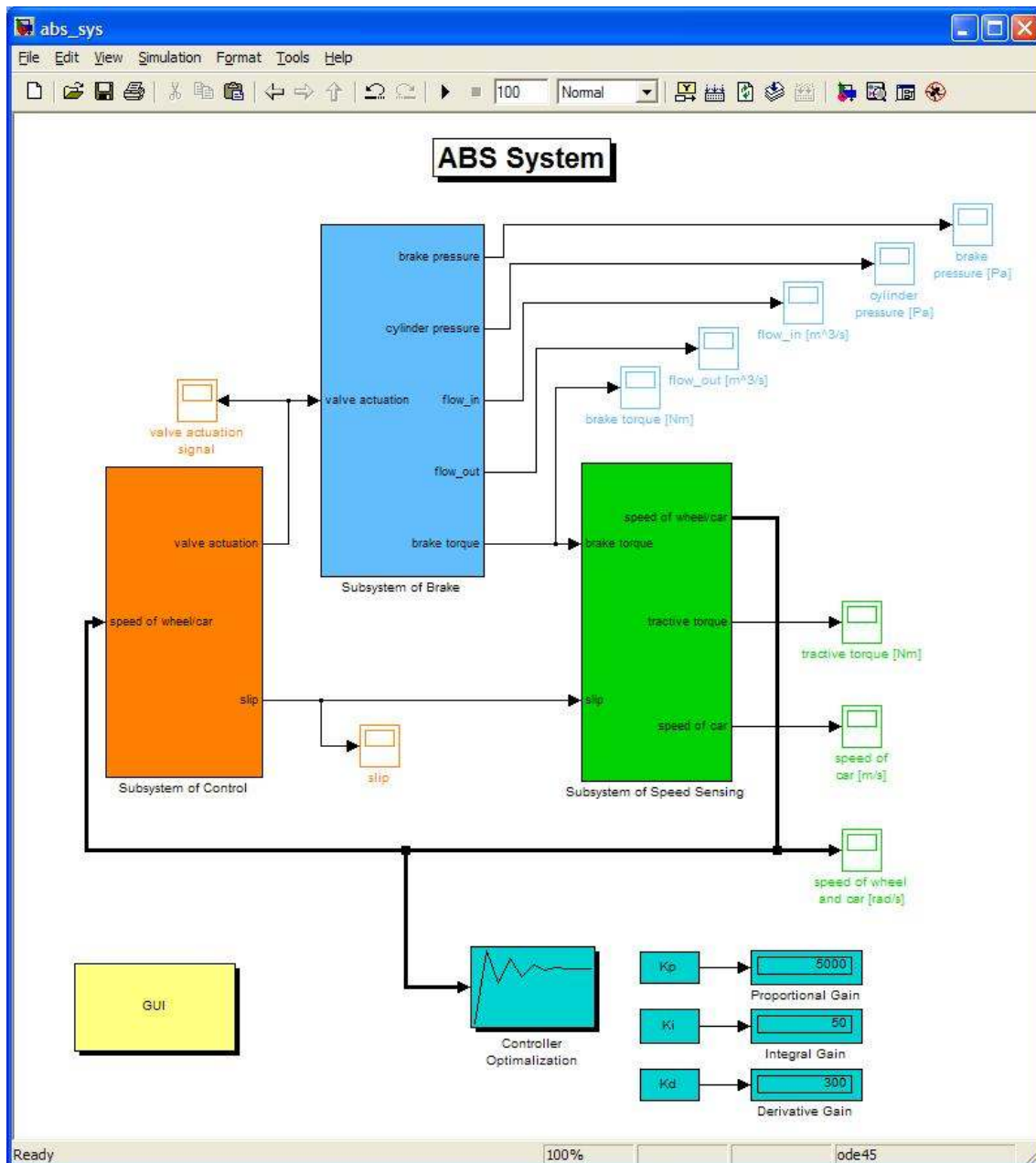


Obrázok 5: Subsystem snímání rychlosti



Obrázok 6: Subsystem riadenia

Celková štruktúra štvrtinového dynamického modelu vozidla v prostredí Matlab-Simulink je na obr. 7. Okrem spomenutých troch subsystemov je schéma doplnená blokom na inicializáciu grafického užívateľského rozhrania GUI a blokom na optimalizáciu parametrov PID regulátora.



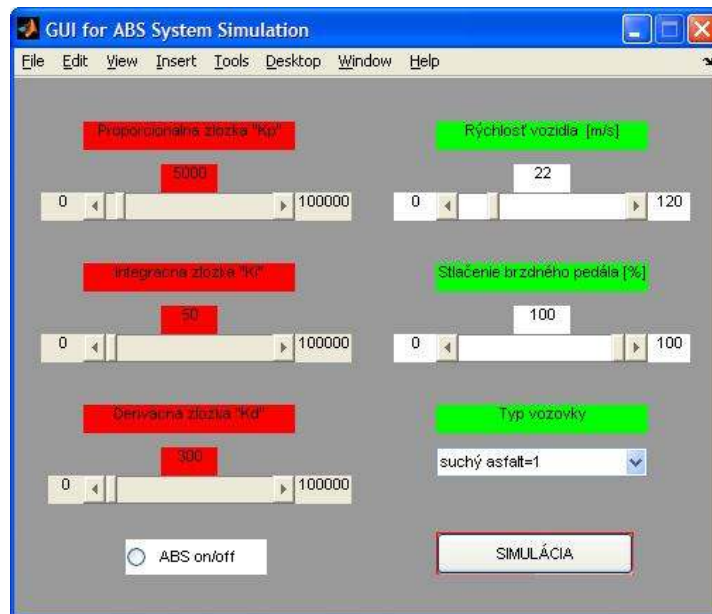
Obrázok 7: Celková štruktúra štvrtinového dynamického modelu vozidla

4 Metodika simulácie a dosiahnuté výsledky

Vytvorený dynamický model umožňuje simuláciu brzdenia vozidla s protiblokovacím systémom ABS. K tomu je potrebné zvoliť vhodné parametre, reprezentujúce vozidlo a podmienky simulácie. Ďalej je potrebné namodelovať sklzové charakteristiky rôznych druhov vozoviek, ktoré simulujú reálne jazdné podmienky, obr. 2. Parametre modelu pre zvolenú triedu vozidla boli:

- hmotnosť vozidla $m = 1300$ kg
- maximálna sila na brzdný pedál 500 N
- maximálny brzdný tlak $p_c = 1.2 \times 10^7$ Pa
- moment zotrvačnosti kolesa $J = 0.65$ kg.m²
- polomer kolesa $r = 0.3$ m
- aerodynamický odpor je zanedbaný

Na pohodlnú obsluhu simulácií je vytvorené grafické užívateľské rozhranie GUI, obr. 8, ktoré umožňuje zadávať parametre regulátora pri manuálnom ladení, ďalej počiatočnú rýchlosť vozidla, rozsah stlačenia brzdového pedála [%], výber povrchu vozovky reprezentujúci určité adhézne podmienky, štart simulácie a vypínanie ABS.

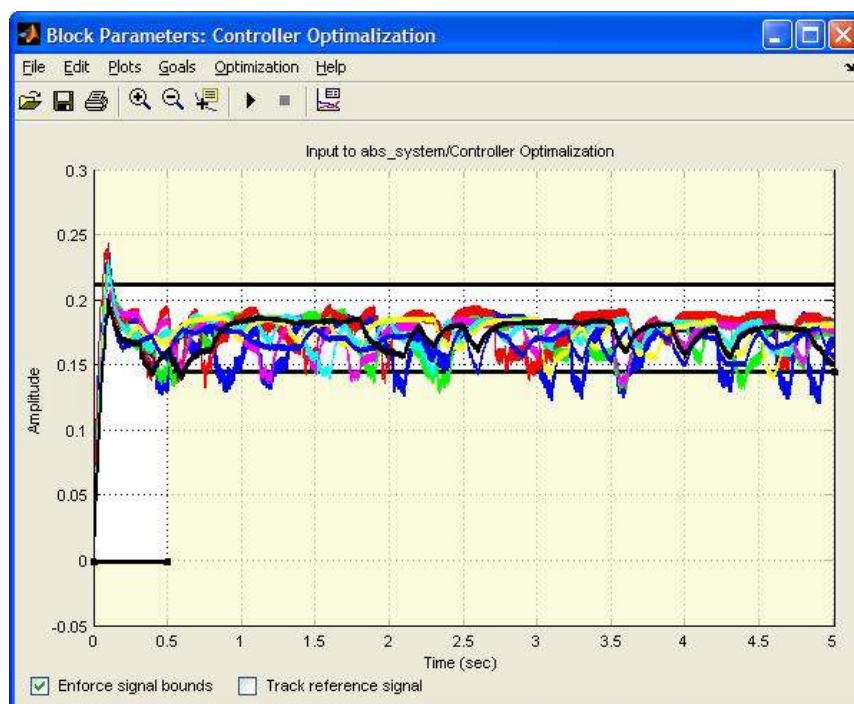


Obrázok 8: Grafické užívateľské rozhranie

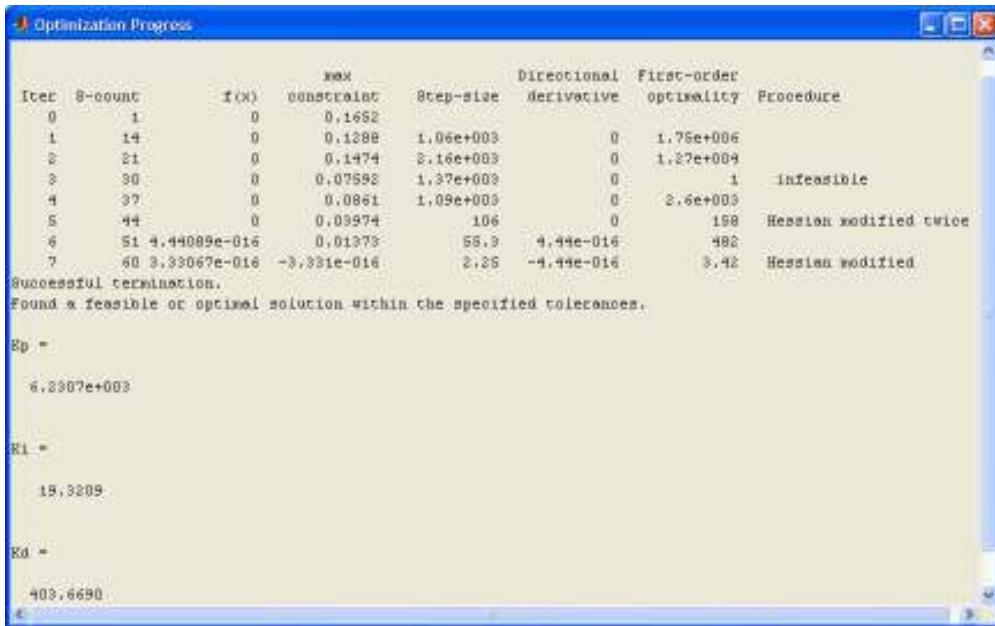
V subsysteme riadenia bol na riadenie ABS použitý PID regulátor. Je to osvedčený typ regulátora s jednoduchou štruktúrou a možnosťou ručného nastavenia parametrov. GUI umožňuje cyklickú zmenu parametrov, pričom je potrebné poznať účinok jednotlivých parametrov na kvalitu riadenia.

Pri optimalizácii konštánt PID regulátora bolo využité programové vybavenie systému Matlab – Simulink, a to toolbox *Simulink Response Optimization*, ktorý umožňuje riešiť úlohu syntézy riadenia metódou optimalizácie parametrov regulátora pri zohľadnení obmedzení na riadenú veličinu *Output Constraint* a akčnú veličinu *Actuator Constraint*.

Optimalizácia parametrov PID regulátora bola riešená pre riadenú veličinu – relatívny sklz pričom boli definované hranice, v ktorých sa má daný signál udržiavať, obr. 9. V ponuke *Optimization* možno nastavovať aj ďalšie podmienky optimalizácie. Protokol o procese optimalizácie parametrov PID regulátora je na obr. 10.

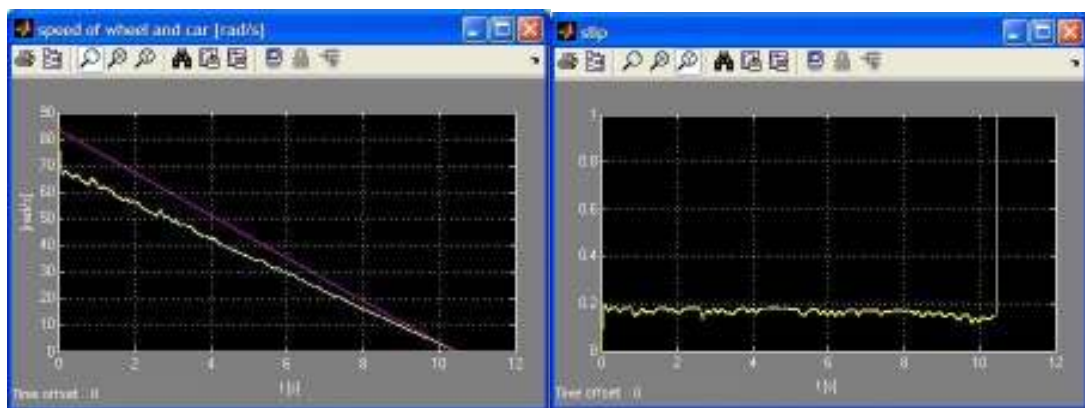


Obrázok 9: Obmedzenia na riadenú veličinu pri optimalizácii parametrov regulátora

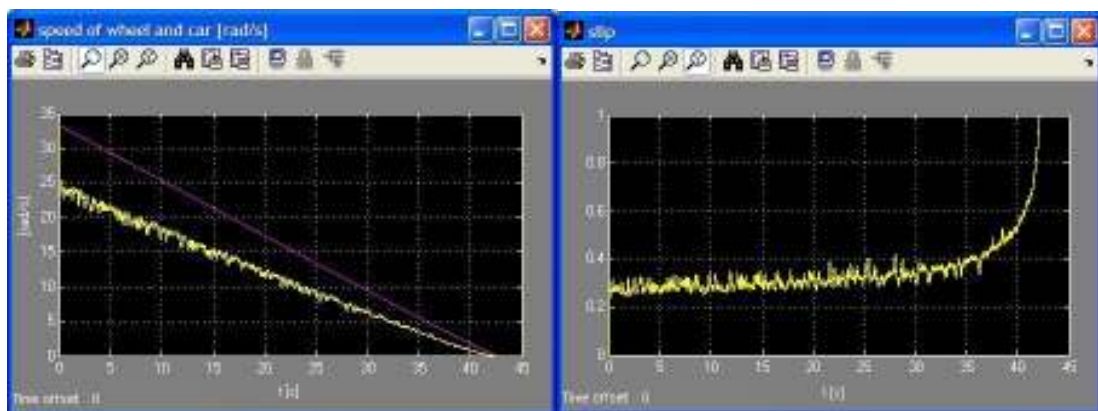


Obrázok 10: Optimalizácia parametrov PID regulátora

S optimalizovanými parametrami regulátora bola vykonaná simulácia brzdenia vozidla s ABS. Časové priebehy uhlovej rýchlosti kolesa vzhľadom na rýchlosť vozidla a dosiahnutý relatívny sklz sú na obr. 11, kde na obr. 11 a) je brzdenie zo začiatočnej rýchlosti 25 m/s na suchej vozovke a na obr. 11 b) je brzdenie zo začiatočnej rýchlosti 10 m/s na ľade.



a) suchá vozovka



b) ľad

Obrázok 11: Uhlová rýchlosť kolesa vzhľadom na rýchlosť vozidla a sklz

5 Záver

Z dosiahnutých výsledkov simulácie brzdenie motorového vozidla s antiblokovacím brzdovým systémom ABS vyplýva, že vhodným výberom štruktúry regulátora a optimalizáciou jeho parametrov je možné dosiahnuť požadovanú kvalitu riadenia sklzu pre rôzne adhézne podmienky. Rozvoj elektroniky otvára nové možnosti pre implementáciu sofistikovaných algoritmov riadenia do riadiacich systémov aktívnej bezpečnosti motorových vozidiel.

Softvérové prostredie Matlab-Simulink so svojimi rozsiahlymi knižnicami sa ukazuje ako vhodné vývojové prostredie pre vývoj a zdokonaľovanie systémov aktívnej bezpečnosti motorových vozidiel. Prehľadná bloková štruktúra s možnosťou vytvárania subsystémov umožňuje analyzovať správanie sa skúmaného systému z rôznych hľadísk a navrhovať syntézu riadenia. Pomocou grafického užívateľského rozhrania možno pohodlne zadávať parametre modelu, rôzne konfigurácie riadiacich systémov, podmienky simulácie a pod. Pri vývoji spomenutých systémov je možné použiť tiež metódu *hardware-in-the-loop*, kde sú niektoré bloky v schéme nahradené prvkami skutočných systémov a simulácia prebieha v reálnom čase.

References

- [1] F. Vlk. *Elektronické systémy motorových vozidel 2*. vlk, nakladatelství a vydavatelství, Brno, 2002.
- [2] S. Solyom. *Synthesis of a Model-based Tire Slip Controller*, Lund, Sweden, 2003.
- [3] M. Gäfvert M. *Topics in Modeling, Control, and Implementation in Automotive Systems*, Lund, Sweden, 2003.
- [4] P. Žilák. *Analýza a syntéza brzdového systému vozidla s ABS v prostredí Matlab-Simulink*, Diplomová práca, STU, Bratislava, 2006.
- [5] M. Smeja. *Modelovanie a riadenie antiblokovacieho brzdového systému motorového vozidla*. Diplomová práca, STU, Bratislava, 2006.
- [6] <http://www.mathworks.com>

Contact information

Doc. Ing. Cyril Belavý, PhD.

Department of Automation, Informatics and Instrumentation Technology

Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology Bratislava

Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava , Slovak Republic

Tel. +421 2 5249 7193, fax +421 2 5249 5315

e-mail: cyril.belavy@stuba.sk