

RIADENIE PRUŽENIA AUTOMOBILU V PROGRAME MATLAB & SIMULINK

Monika Zuščíková, Cyril Belavý, Milan Lokšík

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava

Abstract

Článok sa venuje riadeniu semi-aktívneho pruženia automobilu tzv. Hybrid stratégiou, čo je kombinácia Skyhooku a Wheel-skyhooku. Na analýzu danej úlohy v programovom prostredí Matlab & Simulink bol vytvorený nelineárny mechanický model celého automobilu, jeho jednotlivé komponenty pruženia ako i dynamický modelu semi-aktívneho tlmiča. Hybrid riadenie je komfrontované s klasickým Skyhook riadením a pasívnym mäkkým a tuhým pružením.

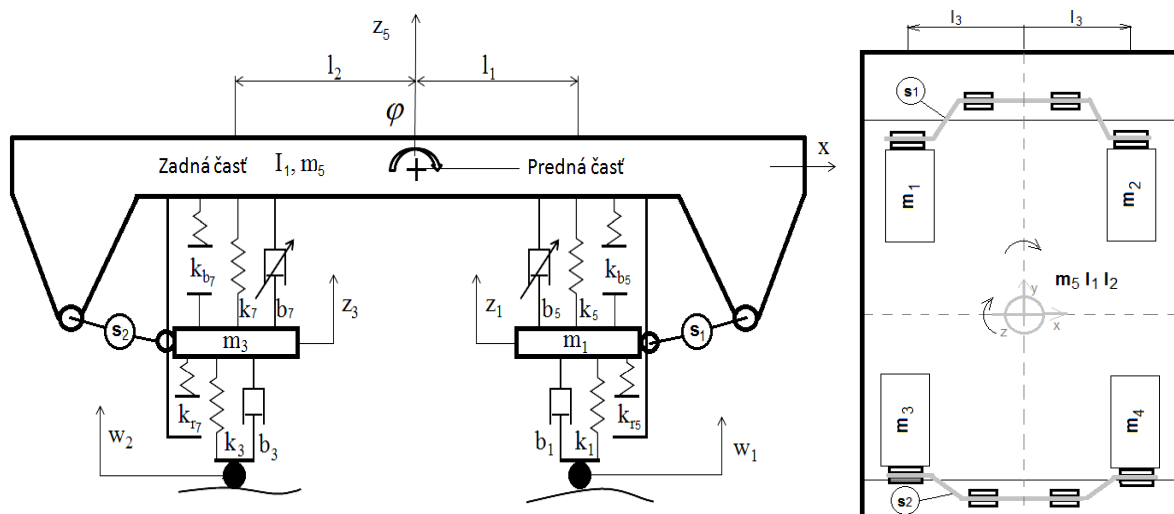
1 Úvod

Na dosiahnutie čo najefektívnejších vlastností pruženia automobilu je potrebné zohľadniť viaceré kritéria, ktoré sú vo všeobecnosti navzájom protichodné. V prvom rade má pruženie zabezpečiť, čo najlepší komfort pre pasažierov pri dobrej jazdnej dynamike vozidla, avšak musí byť navrhnuté tak, aby nedošlo k jeho poškodeniu pri maximálnom prepružení. Pri návrhu pasívneho pruženia nie je možné súčasne vyhovieť všetkým požiadavkám, z tohto dôvodu sa začalo používať semi-aktívne pruženie. Semi-aktívne komponenty dokážu s pomerne nízkymi energetickými nákladmi meniť svoje vlastnosti.

Z hľadiska stratégie riadenia je v praxi zatiaľ najpoužívanejšia Skyhook logika, ktorá sa prednostne zameriava na zabezpečenie lepšieho komfortu počas jazdy. V tomto článku je komfrontované veľmi mäkké a veľmi tuhé pasívne pruženie so semi-aktívnym pružením so Skyhook logikou riadenia odladeného na komfort a so semi-aktívnym pružením s Hybridnou logikou riadenia odladenou tak, aby vozidlo pasažierom poskytovalo súčasne zvýšený komfort a šport.

2 Simulačný model automobilu

Na simuláciu riadenia pruženia automobilu bol použitý nelineárny model vozidla zobrazený na Obr. 1, ktorého hodnoty jednotlivých parametrov sú uvedené v Tab. 1. Model zachytáva kmitanie vo vertikálnom smere a rotačné kmitanie okolo priečnej aj pozdĺžnej osi vozidla [1].



Obrázok 1: Nelineárny mechanický model celého automobilu

Pre syntéru regulátora bolo potrebné popísať model v stavovom priestore v tvare (1)

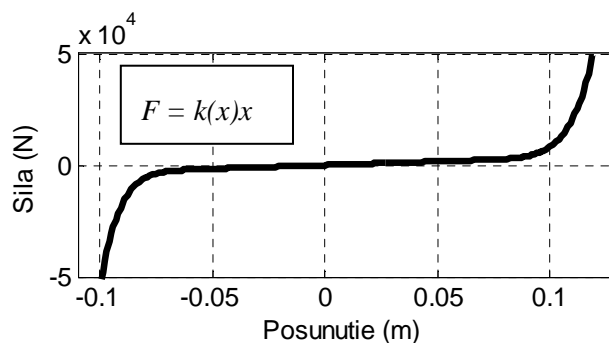
$$\begin{aligned}
 \dot{x}_r(t) &= Ax_r(t) + Bu(t) + Gw(t) \\
 y_c(t) &= C_c x_r(t) + D_c u(t) + H_c w(t) \\
 y_m(t) &= C_m x_r(t) + D_m u(t) + H_m w(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

kde x_r je stavový vektor v relatívnych suradniciach, y_c je výstupný vektor riadených veličín, čiže optimalizovaných kritérií pruženia a y_m je vektor meraných veličín.

TABUĽKA 1: OZNAČENIE A PARAMETRE CELÉHO MODELU AUTOMOBILU

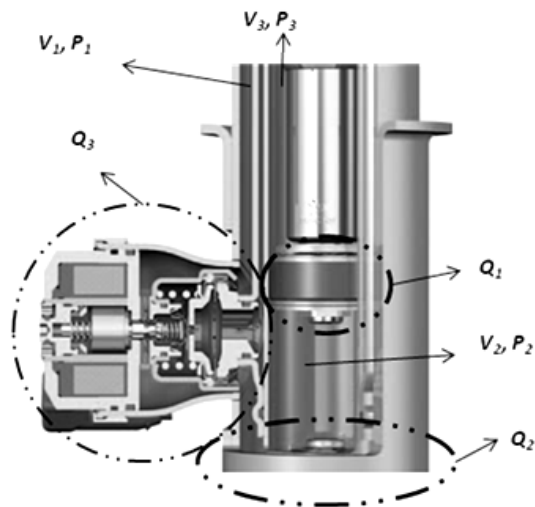
Označ.	Názov	Veľkosť	Jednotka
m_1, m_2	Predná neodpružená hmota	66	(kg)
m_3, m_4	Zadná neodpružená hmota	63	(kg)
m_5	Odpružená hmota	1 750	(kg)
I_1	Moment zotrvačnosti odpruž. hmoty okolo priečnej osi voz.	3 400	(kg m ²)
I_2	Moment zotrvačnosti odpruž. hmoty okolo pozdĺž. osi voz.	740	(kg m ²)
k_1, k_2	Tuhosť prednej pneumatiky	350 000	(N/m)
k_3, k_4	Tuhosť zadnej pneumatiky	330 000	(N/m)
k_5, k_6	Tuhosť hlavnej prednej pružiny	30 000	(N/m)
k_{b5}, k_{b6}	Tuhosť prídavnej prednej pružiny v stláčaní pruženia	Nelin.	(N/m)
k_{r5}, k_{r6}	Tuhosť prídavnej prednej pružiny v naťahovaní pruženia	Nelin.	(N/m)
k_7, k_8	Tuhosť hlavnej zadnej pružiny	28 000	(N/m)
k_{b7}, k_{b8}	Tuhosť prídavnej zadnej pružiny v stláčaní pruženia	Nelin.	(N/m)
k_{r7}, k_{r8}	Tuhosť prídavnej zadnej pružiny v naťahovaní pruženia	Nelin.	(N/m)
b_1, b_2	Tlmenie prednej pneumatiky	1 000	(N s/m)
b_3, b_4	Tlmenie zadnej pneumatiky	1 000	(N s/m)
b_5, b_6	Semi-aktívny predný tlmič	Nelin.	(N s/m)
b_7, b_8	Semi-aktívny zadný tlmič	Nelin.	(N s/m)
l_1	Vzdialenosť prednej nápravy od ťažiska nadstavby	1,4	(m)
l_2	Vzdialenosť zadnej nápravy od ťažiska nadstavby	1,35	(m)
l_3	Vzdialenosť nápravy od ťažiska nadstavby v prieč. smere	0,65	(m)
k_9, k_{10}	Tuhosť torzného stabilizátora vpredu a vzadu (s_1)	10 000	(N/m)
b_9, b_{10}	Tlmenie torzného stabilizátora vpredu a vzadu (s_2)	5	(N s/m)

V modeli boli zakomponované nelineárne vlastnosti semi-aktívnych tlmičov, nelineárne meniaci sa tuhosť pruženia vzhľadom na veľkosť stlačenia prídavných pružín (dorazov), ktorých úlohou je chrániť pruženie pred poškodením v prípade, ak by výchylka pracovného pruženia dosiahla maximálnu hodnotu. Ukážka vplyvu nelineárnej charakteristiky prídavných pružín na výslednú silu tuhosti v pružení vznikajúcu počas prepruženia na prednej náprave je zobrazená na Obr. 2.



Obrázok 2: Nelineárna charakteristika sily počas prepruženia na prednej náprave

Ďalším nelineárnym komponentom je tmič. Semi-aktívny tmič dokáže podľa požiadavky regulátora veľmi rýchlo meniť parameter útlmu medzi maximálnou a minimálnou hodnotou. Najkomplikovanejším komponentom tohto tmiča je nepochybne proporcionálny ventil, kde sa elektromagnetickou silou riadi poloha piestika, ktorým sa dá naladiť rôzna tlaková diferencia. Na Obr. 3 sú vyznačené toky cez jednotlivé ventily, ktorých charakteristiky majú rozhodujúci vplyv na výslednú charakteristiku tmiča [3].



Obrázok 3: Toky semi-aktívneho tmiča

Matematický popis pasívneho tmiča sa dá rozdeliť na dve základne časti. V prvej časti sa rieši výpočet hydraulických tokov Q (2) cez jednotlivé ventily, kde sa vyskytuje prevažne turbulентné prúdenie, ďalej rovnica tlakovej diferencie ΔP (3) a rovnica laminárneho prúdenia cez špeciálne medzirúrkové potrubie tmiča, ktoré je špecifické pre viskózne semi-aktívne tmiče s proporcionálnym ventilom Q_r (4)

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \frac{Q^2}{\mu^2 S^2} \quad (3)$$

$$Q_r = R_l \Delta P \quad (4)$$

kde μ je prietokový súčiniteľ na ventile, ktorý dosahuje pri turbulентnom prúdení takmer vždy rovnakú hodnotu 0,65 – 0,7 pre všetky typy ventilov, S prietoková plocha, R_l je veľkosť odporu pri laminárnom prúdení. ρ je hustota kvapaliny a pre olej tmičov má hodnotu 890 – 900kg/m³.

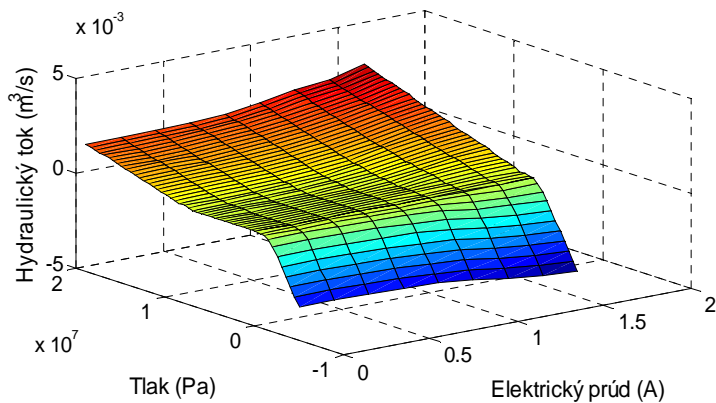
V druhej časti sa ráta zmena tlaku v dôsledku zmeny objemu látky v uvažovanom objeme pri zohľadnení i stlačiteľnosti oleja, z čoho v podstate vyplývajú hysterézne vlastnosti tmiča (5).

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{\beta}{V_i} \frac{dV_i}{dt} \quad (5)$$

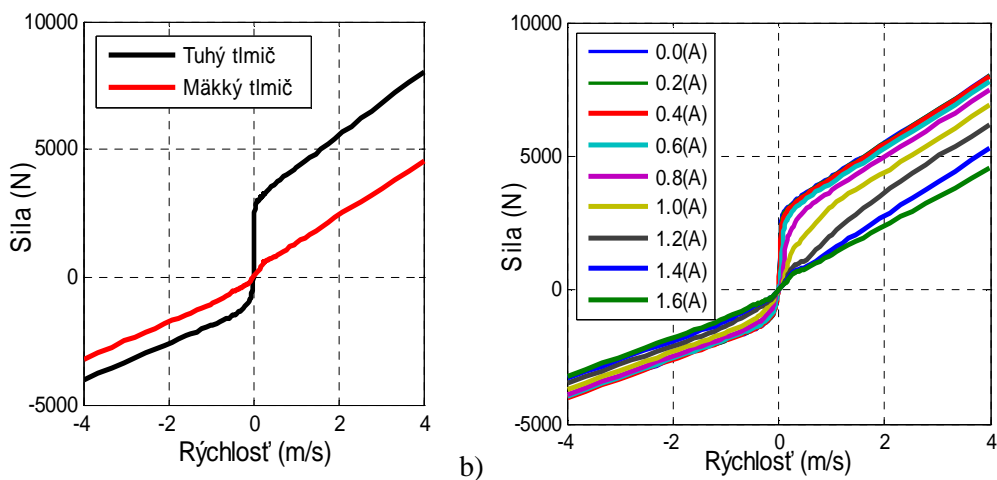
kde $\frac{dV}{dt}$ je zmena objemu v jednotlivých objemoch tmiča spôsobená buď zmenou hydraulických tokov Q , alebo mechanickou zmenou v dôsledku pohybu piestnej tyče tmiča. Koeficient β reprezentuje objemovú stlačiteľnosť oleja v tmiči, ktorá dosahuje hodnotu (0,8-1,4).10⁹ Pa.

Na nasledujúcom Obr. 4 je zobrazená veľkosť hydraulického toku v závislosti od tlakovej diferencie a veľkosti elektrického prúdu pre semi-aktívny tmič. Obrázok 5a zobrazuje statickú charakteristiku pre psívny tmič odladený na mäkké a tvrdé pruženie. Na Obr. 5b je statická charakteristiku dynamického semia-aktívneho tmiča [3].

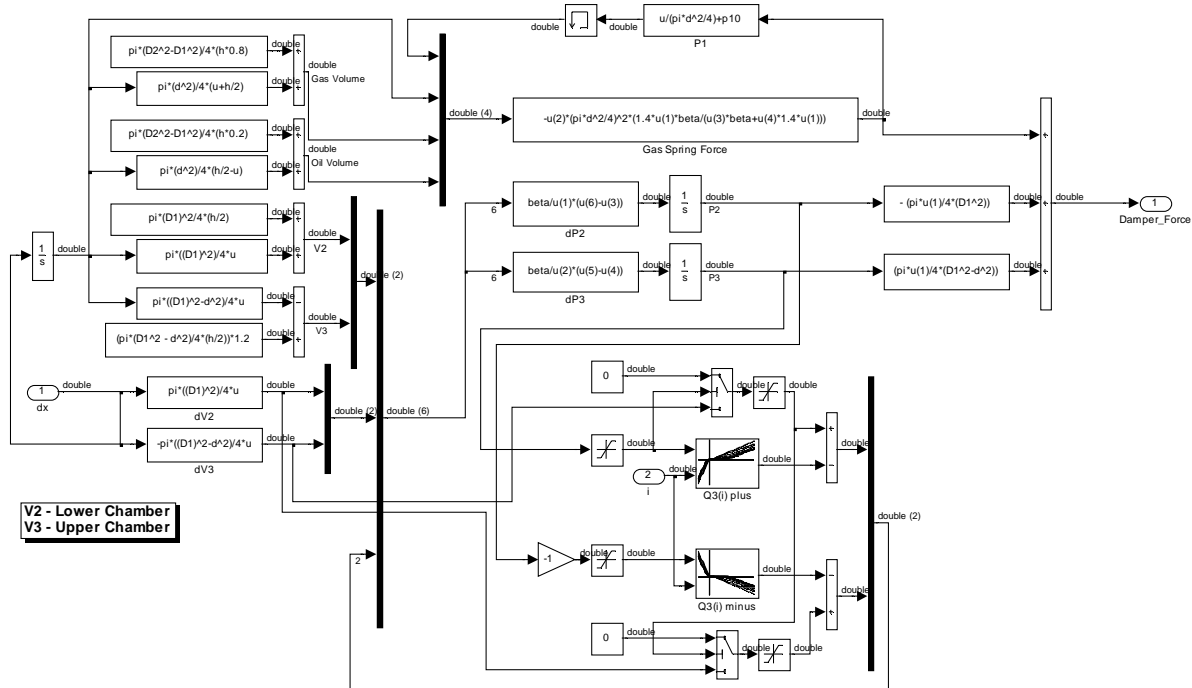
Model semi-aktívneho tmiča bol namodelovaný v prostredí programu Simulink, ktorého simulačná schéma je zobrazená na Obr. 6.



Obrázok 4: Veľkosť hydraulického toku v závislosti od tlakovej diferencie a veľkosti prúdu pre semi-aktívny tmič



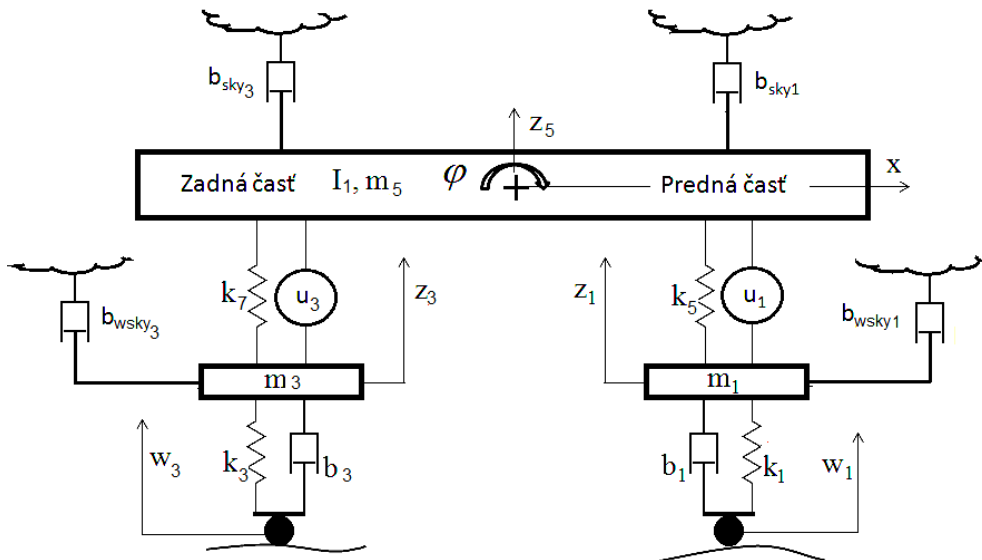
Obrázok 5: a) Statická charakteristika pre pasívny tmič b) Charakteristika semi-aktívneho tmiča



Obrázok 6: Dynamický model tmiča v Simulinku

3 Hybrid logika riadenia pruženia

Hybrid riadenie pruženia je kombináciou Skyhooku a Wheel-skyhooku. Skyhook spočíva v realizácii sily vznikajúcej virtuálnym tmičom, ktorý je upevnený jedným koncom o karosériu vozidla a druhým koncom o v priestore vertikálne sa nepohybujúci bod (pripevnený na oblohu). Pri Wheel-skyhooku je to podobné s rozdielom, že karosériu nahrádza koleso Obr. 7.



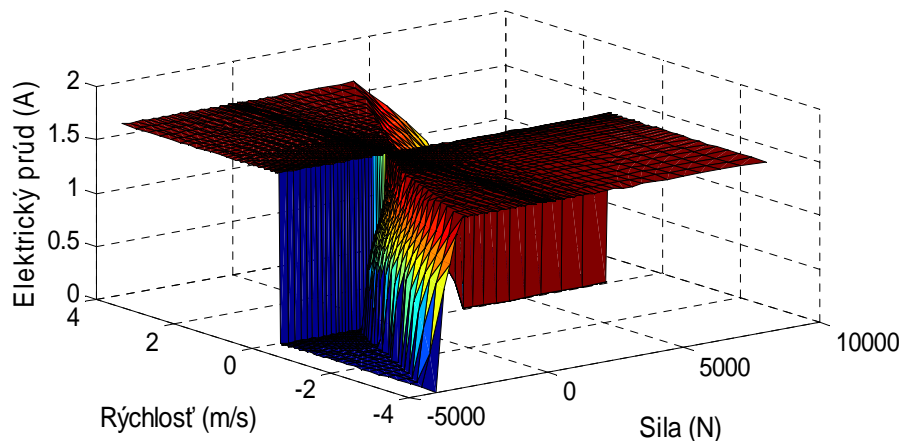
Obrázok 7: Hybrid logika riadenia na celom modeli automobilu (pohľad z boku)

Parametre u_1 , u_2 a u_3 , u_4 reprezentujú aktuátory prostredníctvom, ktorých sa realizuje požadovaný akčný zásah na sústavu, pre ktorý platí (6).

$$u(t) = \begin{bmatrix} b_{sky1}\dot{x}_5(t) + b_{sky1}l_1\dot{\phi}_1(t) + b_{sky1}l_3\dot{\phi}_2(t) + b_{wsky1}\dot{x}_1(t) \\ b_{sky2}\dot{x}_5(t) + b_{sky1}l_1\dot{\phi}_1(t) + b_{sky2}l_3\dot{\phi}_2(t) + b_{wsky2}\dot{x}_2(t) \\ b_{sky3}\dot{x}_5(t) + b_{sky3}l_2\dot{\phi}_1(t) + b_{sky3}l_3\dot{\phi}_2(t) + b_{wsky3}\dot{x}_3(t) \\ b_{sky4}\dot{x}_5(t) + b_{sky4}l_2\dot{\phi}_1(t) + b_{sky3}l_3\dot{\phi}_2(t) + b_{wsky4}\dot{x}_4(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Hodnoty virtuálnych tmičov Skyhooku $b_{sky1}, b_{sky2}, b_{sky3}, b_{sky4}$ a Wheel-skyhooku $b_{wsky1}, b_{wsky2}, b_{wsky3}, b_{wsky4}$ boli nastavené na konštantné hodnoty [4].

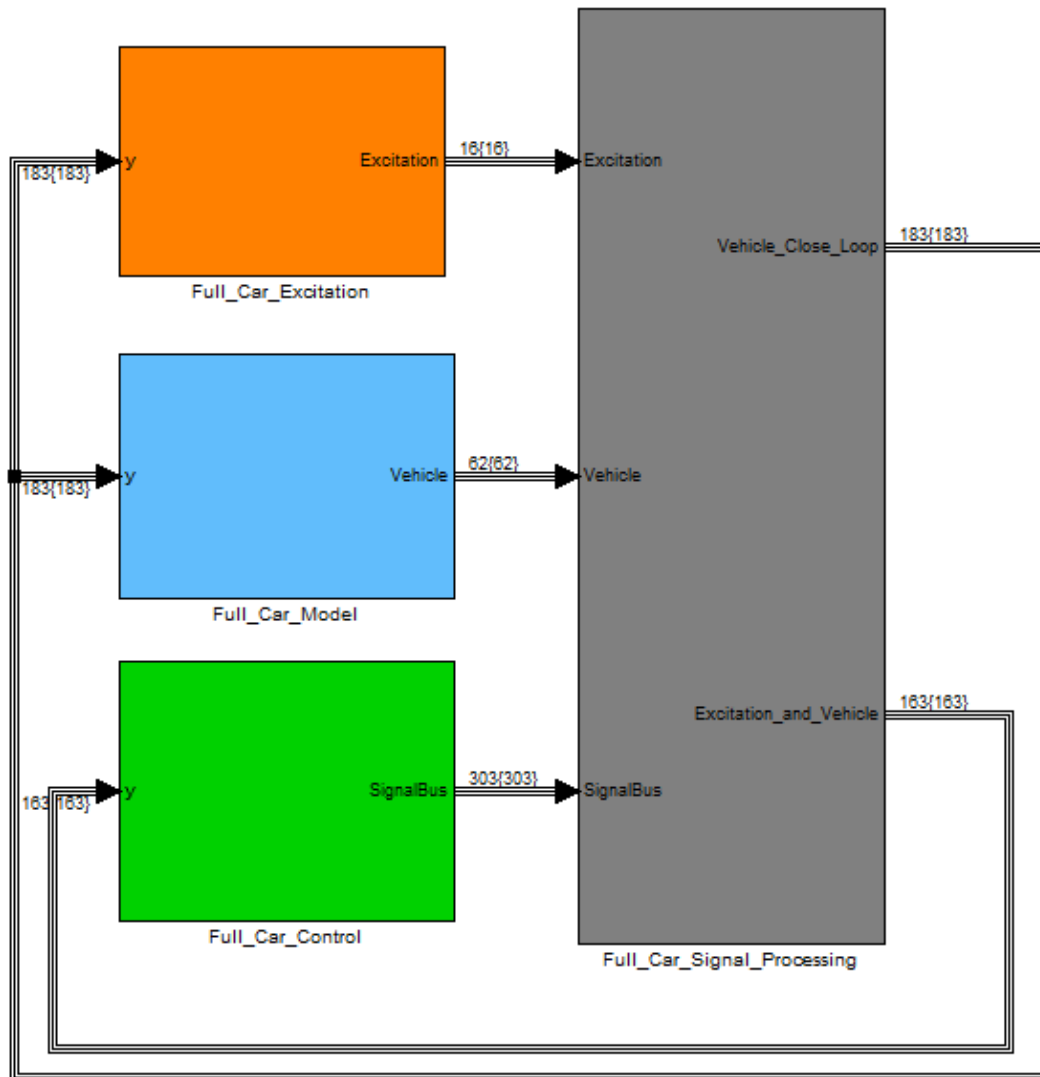
Na nasledujúcom Obr. 8 je grafické znázornenie pola na výpočet hodnôt elektrického prúdu na prednom semi-aktívnom tmiči.



Obrázok 8: Pole na výpočet hodnôt elektrického prúdu na prednom semi-aktívnom tmiči

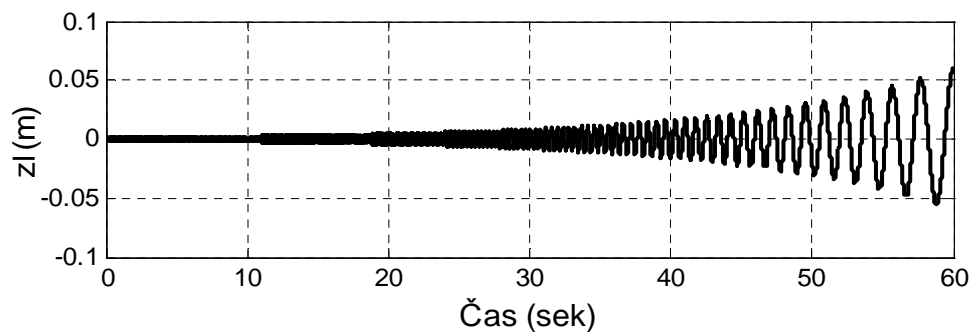
4 Výsledky simulácií riadenia

Modelovanie vozidla a jednotlivých komponentov pruženia bolo realizované v prostredí programu Matlab vytvorením funkcií a simulačného modelu v prostredí Simulink Obr. 9.



Obrázok 9: Simulačná schéma pruženia vozidla v Simulinku

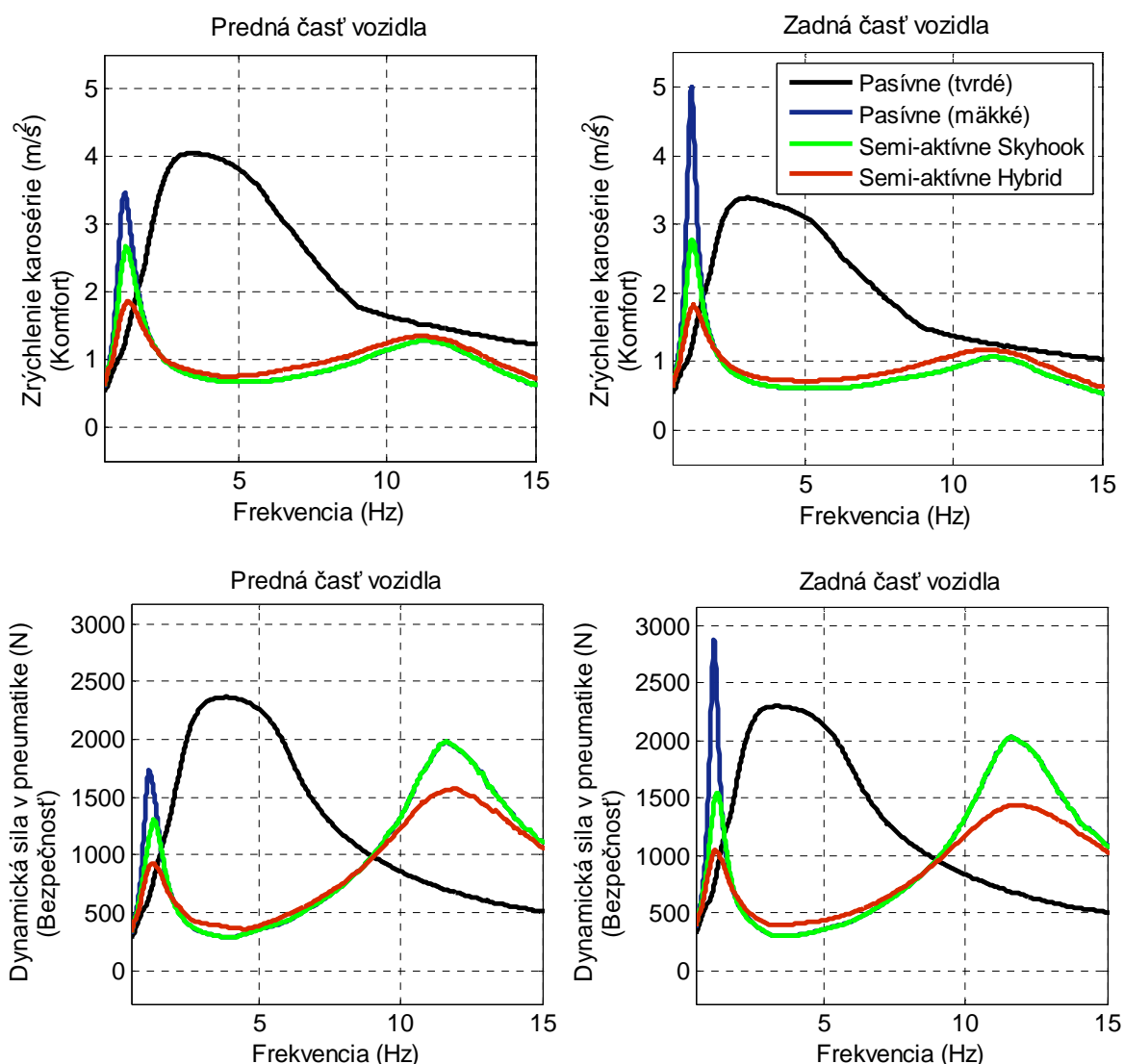
Vozidlo bolo budené prostredníctvom hydraulických valcov s počiatočnou frekvenciou 20 Hz a končiacou pri 0,4 Hz. Pribeh budiaceho signálu je zobrazený na Obr.10.



Obrázok 10: Pribeh budenia vozidla hydropulzom

Na Obr. 11 sú zobrazené priebehy zvolených kritérií pruženia v prednej a v zadnej časti vozidla, z hľadiska komfortu (hodnoteného prostredníctvom zrýchlenia karosérie) a bezpečnosti (hodnotenej prostredníctvom dynamickej sily v pneumatike) pri bežnej prevádzkovej rýchlosti 90

km/h. V Tab. 2 sú uvedené stredné hodnoty jednotlivých kritérií všetkých riešených variant pruženia vozidla.



Obrázok 11: Amplitúdovo frekvenčná charakteristika kritérií pruženia vozidla s pasívnym a semi-aktívnym pružením so Skyhook a Hybrid logikou

TABUĽKA 2: STREDNÉ HODNOTY KRITÉRIÍ PRUŽENIA VOZIDLA

Kritérium Jednotky	Predná časť vozidla		Zadná časť vozidla	
	Komfort (4-8 Hz) (m/s^2)	Bezpečnosť (N)	Komfort (4-8 Hz) (m/s^2)	Bezpečnosť (N)
Pasívne (mäkké)	4.02	1753	3.25	2892
Pasívne (tvrdé)	1.22	2851	1.02	2250
Semiak. Skyhook	1.22	1280	1.02	1512
Semiak. Hybrid	1.03	890	0.83	1056

Záver

Z uvedených výsledkov numerických simulácií sa dá tvrdiť, že semi-aktívnym pružením sa dosiahli lepšie výsledky pre zvolené kritéria pruženia v porovnaní s pasívnym pružením. Prostredníctvom semi-aktívneho pruženia je možné vozidlo naľadiť do režimu, kde pasažierom vozidla je poskytovaný maximálny komfort (prevažne Skyhook riadnie) a maximálny športový pôžitok z jazdy (prevažne Wheel-skyhook riadnie). Hybrid logika

riadenia pruženia umožňuje naladiť určitý kompromis medzi spomínanými režimami riadenia, vhodným podielom Skyhooku s Wheel-skyhook riadným.

PodĎakovanie

Článok bol pripravený pri grantovej podpore VEGA projektu „*Riadenie dynamických systémov reprezentované numericou štruktúrou systému s rozloženými parametrami*“ (grant 1/0138/11) a APVV projektu „*High-tech riešenia pre technologické procesy a mechatronické komponenty, v riadiacich systémoch s rozloženými parametrami*“ (APVV-0131-10).

References

- [1] M. Zuščiková, C. Belavý, M. Vlček, F. Vitáloš. *LQG a Skyhook riadenie semi-aktívneho pruženia automobilu pre prejazde prekážkou*. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi. ARTEP 2012* [elektronický zdroj] : Zborník príspevkov. Stará Lesná, SR, 22.2.-24.2. 2012. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2012.
- [2] E. Guglielmino. *Semi-active Suspension Control*. Berlin, Springer, 2008.
- [3] D. E. Newland. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*. Longman Scientific & Technical, Essex, U.K., third edition, 1994.
- [4] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute, 2006.

Ing. Monika Zuščiková

Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Measurement and Applied Informatics. Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava, e-mail: monika.zuscikova@stuba.