

Aktivní tlumení

– případová studie simulace

TEXT: Ing. Aleš Kruczek, Ph.D., doc. Ing. Antonín Stříbrský, CSc., Ing. Jaroslav Honců, CSc., Ing. Martin Hlinovský, Ph.D., Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Aktivní tlumení v automobilu je velmi důležitou částí určující bezpečnost a pohodlí vozidla. V tomto článku je pomocí H-nekonečno řízení navrhován systém aktivního tlumení s využitím lineárního motoru jako akčního členu. Hlavní důraz je kladen na porovnání různých regulátorů navržených pro čtvrtinový, poloviční a celý model auta (a vždy použit na „celé“ auto). Pozornost je věnována hlavně energetickým nárokům systému. Regulátory jsou ověřovány simulacemi a validovány na čtvrtinové testovací stolici.

Požadavky na vývoj aktivního tlumení automobilu se poslední dobou zvyšují. Základní funkcí tlumení pérování v automobilu je poskytnout pasažérovi komfort, zvýšit adhezi mezi koly a vozovkou a tedy zvýšit stabilitu řízení. Začínají být vyvíjeny a zlepšovány aktivní a polo-aktivní systémy tlumení tak, aby bylo možné zlepšit komfort i stabilitu. Samozřejmě existuje mnoho různých konfigurací a mechanických uspořádání takových systémů. V aktivních tlumeních je převážně využíváno hydraulických akčních členů. Alternativou jsou pak elektromechanické uspořádání, kde je možné přímo propojit elektronické řízení se systémem tlumení pérování.

V době vzrůstajícího zájmu o obnovitelné zdroje energie může být právě omezení spotřeby aktivního tlumení také malým příspěvkem pro ekologii. Právě v automobilu navíc spotřeba energie hraje velkou roli při vývoji jednotlivých prvků. V tomto článku je použit jako akční člen lineární elektrický motor a tudíž existuje možnost rekuperovat energii během některých speciálních pohybů tlumiče. Tuto energii je pak možné akumulovat a použít později, když ji bude potřeba.

Aktivní tlumení pérování je navrhováno tak, aby splňovalo určitá kritéria. Obvykle jsou důležité dvě vlastnosti – absorpce poruch vozovky (tedy komfort pasažéra) a snížení přenosu poruch mezi vozovkou a automobilem (tedy

stabilita vozidla). První požadavek může být kvantifikován jako snížení zrychlení odpružené části, případně snížení špičky překmitu ve svislém pohybu. Druhý požadavek může být charakterizován jako snížení síly působící na vozovku, nebo zjednodušeně jako snížení zrychlení neodpružené části vozidla. Pravděpodobně je zřejmé, že oba požadavky jsou navzájem protichůdné. Proto je není možné splnit pomocí pasivního tlumení pérování, které je nastaveno buď na „komfort“ nebo „stabilitu“. Naopak nejlepšími výsledky je pak dosahováno při vhodně navrženém aktivním tlumení, kde existuje doplňkový zdroj síly libovolného směru.

Jednou z možností je využít jako zdroj síly právě lineární elektrický motor. Oproti klasickému rotačnímu elektromotoru má tu výhodu, že elektromagnetická síla je aplikována přímo bez dalších mechanických částí. Lineární motor je schopen působit velkými silami a velkým zrychlením, a to se zachováním dlouhé životnosti. Proto se jeví jako vhodný pro použití v systému aktivního tlumení automobilu.

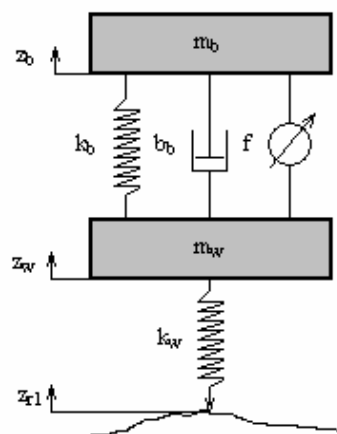
Čtvrtinový model

Nejdůležitější částí každého návrhu regulátoru je použít vhodný matematický model, který může být také následně použit pro validaci experimentů. Tento článek porovnává různé modely

použité k návrhu – čtvrtinový, poloviční a úplný model automobilu.

Začneme nejjednodušším modelem a to je čtvrtinový (Obrázek 1). Skládá se ze dvou pružin (jedna v tlumení a druhá reprezentující pneumatiku), tlumiče a ideálního zdroje síly jako akčního členu. Ve skutečnosti bude jako akční člen použit lineární elektrický motor, ale vzhledem k jeho linearitě v pracovním rozsahu a malým časovým konstantám je toto zanedbání možné. Model je možno popsat následujícími pohybovými rovnicemi:

$$\begin{aligned}m_b \ddot{z}_b &= F - k_b(z_b - z_w) - b_b(\dot{z}_b - \dot{z}_w) \\ m_w \ddot{z}_w &= -F + k_b(z_b - z_w) \dots \\ &\dots - k_w(z_w - z_r) + b_b(\dot{z}_b - \dot{z}_w)\end{aligned}$$



Obr. 1 Čtvrtinový model automobilu.



Poloviční model

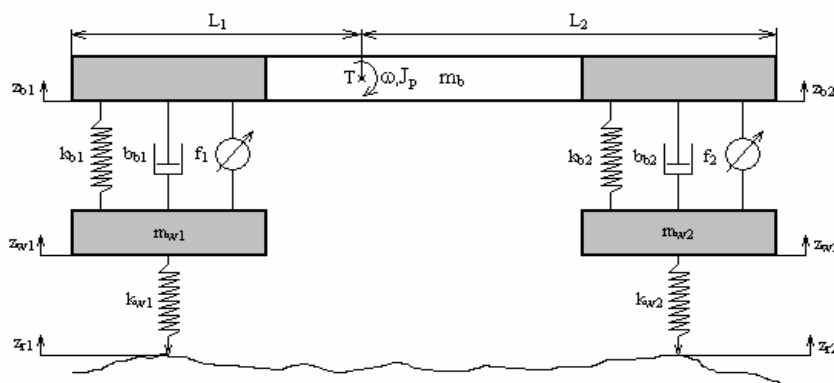
Přirozeným rozšířením čtvrtinového modelu je model poloviční, skládající se z levé a pravé části automobilu. Model je zobrazen na obrázku 2. Poté je nutné do modelu přidat následující pohybové rovnice předklánění, pohybu těžiště a rychlosti odpružené hmoty:

$$m_b \ddot{z}_{b1} L_1 - m_b \ddot{z}_{b2} L_2 - J_P \dot{\omega} = 0$$

$$m_b \ddot{z}_{b1} + m_b \ddot{z}_{b2} - m_b \dot{v}_T = 0$$

$$\dot{z}_{b1} = v_T + \omega L_1$$

$$\dot{z}_{b2} = v_T - \omega L_2$$



Obr. 2 Poloviční model

Samozřejmě je možné také připravit model pro přední a zadní část. Ve skutečnosti se ale matematicky jedná o tentýž model otočený o 90°.

Úplný model automobilu

Posledním modelem v tomto článku je model celé vertikální dynamiky automobilu. To znamená, že jsou spojeny dva poloviční modely k sobě a přibudou tak rovnice pro naklánění, (změní se rovnice) předklánění, pohybu těžiště a rychlosti odpružených hmot:

$$F_1 L_1 - F_2 L_2 + F_3 L_1 - F_4 L_2 - J_P \dot{\omega} = 0$$

$$F_1 D_1 + F_2 D_2 - F_3 D_1 - F_4 D_2 - J_{PR} \dot{\Omega} = 0$$

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - m_b \dot{v}_T = 0$$

$$\dot{z}_{b1} = v_T + \omega L_1 + \Omega D_1$$

$$\dot{z}_{b2} = v_T - \omega L_2 + \Omega D_2$$

$$\dot{z}_{b3} = v_T + \omega L_3 - \Omega D_3$$

$$\dot{z}_{b4} = v_T - \omega L_4 - \Omega D_4$$

Více o chování a dynamice vozidla najdeme například v [1].

Experimentální stolice

Pro účely validace navrhovaných modelů byla připravena speciální testovací stolice pro čtvrtinový model automobilu. Mechanická konstrukce je patrná z obrázku 3. Testovací stolice se skládá z hydraulického zdroje síly (jako vstup poruchy vozovky), vyříznuté čtvrtiny automobilu a lineárního elektrického motoru (jako akčního členu).



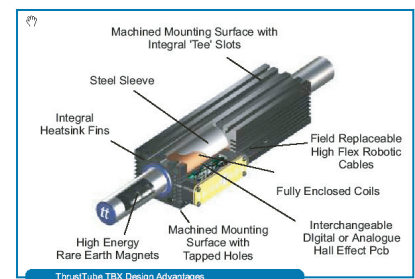
Obr. 3 Testovací stolice

Lineární elektrický motor

Jako akční člen vyvíjející požadovanou sílu byl použit lineární elektrický motor. Obrázek 4 ilustruje základní princip a uspořádání lineárního motoru. Výhodou lineárního motoru je, že přenáší elektrickou energii přímo na použitelnou mechanickou sílu přímočarého pohybu, a naopak. Motor je vyráběn v synchronní a asynchronní verzi. V porovnání s klasickým rotačním elek-

tromotorem je stator a rotor (translator) lineárně uspořádán v jedné rovině. V podstatě je možné si takový motor představit jako rotační motor s nekonečným poloměrem statoru.

Lineární motor je využitelný i při velkých rychlostech (až 200m/min), velkých zrychleních (až několik g) a silách (až jednotky kN). Jak již bylo zmíněno, elektromagnetická síla je aplikována přímo na zátěž bez dalších mechanických převaděčů, což vede k velké tuhosti celého systému, velké spolehlivosti a delší životnosti. V praxi jsou nečastěji využívány synchronní třífázové lineární motory. V této práci byl použit motor ThrustTube TBX3810 (detailní specifikace viz [2]).



Obr. 4 Lineární elektrický motor

Je nutné si však položit a zodpovědět jednu důležitou otázku. Je výhodnější zahrnout model motoru do návrhu regulátoru nebo jej můžeme zanedbat (brát jako ideální zdroj síly) a zahrnout ho až do modelu, na kterém jsou v rámci simulací validovány výsledky? Porovnáním výhod může být jednoznačně řečeno, že zahrnutím modelu do syntézy získáme více informací pro zpětnou vazbu a tím můžeme zkvalitnit řízení. Naneštěstí existuje také jedna nevýhoda a tou je složitost komplexního modelu motoru. Zbývá tedy opačná otázka, zda může být tento model ze syntézy „vynechán“? Odpověď zní ano, protože mechanické i elektrické časové konstanty jsou velmi malé (okolo 1ms) a průběh síly v pracovní oblasti je téměř lineární.

Detailní popis návrhu matematického modelu lineárního elektrického motoru je uveden například v [3] nebo [4].

Návrh regulátorů

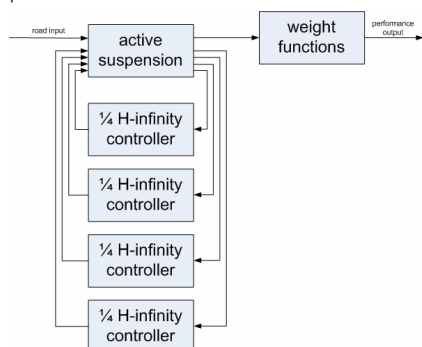
V minulých odstavcích byly popsány různé matematické modely aktivního tlumení. Pro tyto tři modely budou nyní navrženy tři regulátory. Začneme nejjednodušším čtvrtinovým a skončíme úplným regulátorem. Regulátory jsou navrženy s využitím H-nekonečno teorie (více viz [5]). Detailní popis návrhu regulátorů je mimo rozsah tohoto článku a je možné ho nalézt v [6].

Standardní schéma uzavřené smyčky má dva vstupy – poruchu vozovky a požadovaný akční zásah lineárního motoru. První výstup je použit pro úpravu vlastností uzavřené smyčky a druhý výstup slouží jako zpětná vazba pro regulátor.

První výstup může být vážen konstantami nebo frekvenčními váhovými funkcemi tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností uzavřené smyčky systému. Jak byly jednotlivé konstanty nebo funkce zvoleny popisují následující odstavce (jsou různé pro každý z regulátorů).

Čtvrtinový regulátor

První navrhovaný regulátor je pro čtvrtinový model. Tento regulátor je pak použit čtyřikrát pro každý tlumící prvek (přední – zadní, levý – pravý). Zapojení regulátorů je patrné z obrázku 5. Samozřejmě je nevýhodou, že regulátory nemají informaci o ostatních prvcích, takže existuje pouze malá (a nepřímá) možnost jak ovlivňovat naklánění a předklánění.



Obr. 5 Uspořádání čtvrtinového regulátoru

Byly použity následující váhové konstanty a funkce:

- Vzdálenost mezi vozovkou a kolem – pomáhá vylepšit odchytku

v ustáleném stavu a ovlivňuje stabilitu vozidla.

- Zrychlení karoserie – vylepšuje komfort pasažéra, je váženo pomocí funkce.
- Akční zásah – umožňuje limitovat požadovanou velikost síly, váženo funkcí.
- Zrychlení kola – vylepšuje stabilitu vozidla.

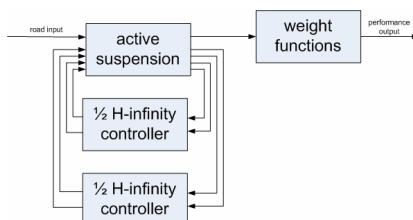
Jak bylo zmíněno výše, dva výstupy jsou váženy pomocí frekvenčních funkcí. První je zrychlení karoserie, které je váženo tak, aby respektovalo citlivost pasažéra na vibrace v různých frekvenčních oblastech. Druhou je pak akční signál, kde jsou omezeny vyšší frekvence požadované síly (ve skutečnosti je jako váha použita horní propust, resp. inverzní funkce dolní propust).

Poloviční regulátor

Poloviční regulátor má oproti čtvrtinovému jednu výhodu – může přímo ovlivňovat předklánění (nebo naklánění) automobilu. Zapojení polovičního regulátoru je na obrázku 6, přičemž máme dvě možnosti jak poloviční regulátor navrhovat.

První možnost je rozdělit automobil na levou a pravou část. Potom může být ovlivňováno předklánění a výsledný regulátor je zapojen do dvou elementů (levého a pravého). Pro vážení budou použity stejné váhové výstupy (hodnoty budou samozřejmě jiné kvůli vazbě mezi přední a zadní částí). Přibude však jedna váha navíc – předklánění automobilu.

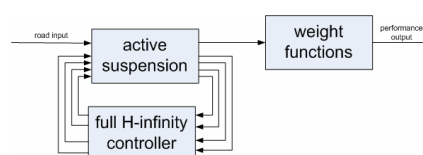
Druhá možnost je rozdělit vozidlo na přední a zadní část. Pak může být ovlivněno naklánění a regulátor je použit pro přední a zadní element. Přibude váhová konstanta pro naklánění automobilu.



Obr. 6 Uspořádání polovičního regulátoru

Úplný regulátor

Samozřejmě poslední možností, jak řídit úplný model, je navrhnout regulátor právě pro tento model. Naopak je to asi ta nejpřirozenější možnost. Pak můžeme řídit vše – každý tlumící element, předklánění i naklánění. Takový regulátor je však nejobtížnější navrhnout. Schéma zapojení je vidět na obrázku 7. Váhy jsou stejné jako pro čtvrtinový model, spolu úhlem naklánění a předklánění.



Obr. 7 Uspořádání úplného regulátoru

Zpomalovací retardér

Existuje mnoho možností, jak simulovat vstupní poruchu vozovky a existuje pro to mnoho matematických modelů. V tomto článku používáme dva z nich. Existuje jedna specifická jízdní situace důležitá pro komfort pasažéra a „přívěťivost“ k vozovce a tou je přejezd zpomalovacího retardéru. Velikost takového retardéru je v našem případě 0.5 x 0.45 x 0.05m. Jako matematický model je použita polovina funkce $\sin(75,36 t)$, přičemž ještě musí být samozřejmě brána do úvahy rychlost vozidla.

Běžná vozovka

Jedna z možností jak namodelovat běžnou vozovku je použít deterministicky „náhodný“ signál, který může být popsán následovně:

$$z_t = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\dot{\omega}}{\pi \cdot v_x}} \left\{ \operatorname{Re} \left(\frac{b_0}{-\omega^2 + a_1 j \omega + a_0} \right) \cdot \cos(\omega t + \alpha_1) + \operatorname{Im} \left(\frac{b_0}{-\omega^2 + a_1 j \omega + a_0} \right) \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) \right\}$$

$$b_0 = 0.121 \cdot v_x \quad (4)$$

$$a_0 = 2.249 \cdot v_x$$

$$a_1 = 30.36 \cdot v_x$$

Vyhodnocení výsledků

Hlavním cílem tohoto článku je porovnat různé H-nekonečno regulátory. Jestliže se zamyslíme nad podmínkami, které jednotlivé regulátory mají, pak výsledky nejsou překvapivé, ale určitě



jsou některé zajímavé z praktického pohledu.

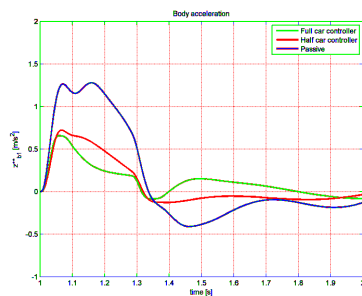
Stejně jako pro modelování vozovky máme také mnoho možností jak vyhodnocovat simulace či experimenty. Samozřejmě výsledek je vždy jen jeden a vyhodnocení tedy musí stále dávat stejné porovnání. V tomto článku používáme RMS hodnotu pro zrychlení odpružené hmoty (komfort) a vzdálenost mezi vozovkou a kolem (jízdni stabilita). V simulacích bylo zjištěno, že stabilita se téměř nemění (to bylo cílem návrhu regulátorů) a proto je níže vyhodnocována jen RMS hodnota pro komfort:

$$J_{\text{comf}} = \sqrt{\int_0^T G_w * \ddot{z}_b dt}$$

Kde G_w v (5) je přenosová funkce odrážející citlivost člověka na vibrace v různých frekvenčních oblastech a * představuje konvoluci.

Konečné výsledky

Pro ilustraci řízení uzavřené smyčky je na obrázku 10 znázorněno zrychlení odpružené hmoty při průjezdu přes zpomalovací retardér popisovaný v sekci 4. (úplný regulátor = zelená, poloviční regulátor = červená, pasivní = modrá).



Obr. 7 Zrychlení odpružené hmoty při projíždění zpomalovacím retardérem.

Nakonec je čas porovnat jednotlivé metody řízení aktivního tlumení pérování automobilu. Během simulací (a pro čtvrtinový i během experimentu) byly testovány oba vstupní signály popisované v sekci 4. Výsledky shrnuje tabulka 1, kde jako pasivní řízení je myšlen systém bez regulátoru.

Tabulka 1. Porovnání RMS pro komfort.

	Zpomalovací retardér	Běžná vozovka
Pasivní	0.2738	0.3860
¼ regulátor	0.2201	0.2931
½ regulátor	0.2674	0.3438
Úplný regulátor	0.2698	0.3622

Druhá tabulka porovnává předklánění pro jednotlivé regulátory, což nám dává představu o tom, jak vypadají výsledky v případě, kdy nemáme (nebo máme) informaci o ostatních elementech. Výsledky jsou v tabulce 2.

Obě tabulky potvrzují výsledky ilustrované na obrázku 10 při průjezdu zpomalovacím retardérem. Podobné výsledky byly získány na běžné deterministické vozovce.

Tabulka 2. Porovnání RMS úhlu předklánění.

	Zpomalovací retardér	Běžná vozovka
Pasivní	0.0207	0.0362
¼ regulátor	0.0190	0.0254
½ regulátor	0.0133	0.0194
Úplný regulátor	0.0138	0.0196

V tomto článku bylo navrženo několik H-nekonečno regulátorů s různou složitostí, kde jako akční člen byl lineární elektrický motor. Dále byly zvoleny dva modely charakterizující vstupní poruchu od vozovky.

Bylo dokázáno, že není nezbytně nutné navrhovat složité regulátory, aby bylo dosaženo těch nejlepších výsledků. Dle simulací vyplynulo, že nejlepší hodnoty komfortu získáme pro nejjednodušší čtvrtinový regulátor, ale samozřejmě za cenu horšího naklánění a předklánění automobilu.

Toto je však pravda pouze pro regulátory podobné H-nekonečnu s velkou robustností celé uzavřené smyčky, ale pravděpodobně to nebude pravda pro některé typy například prediktivního

řízení, kde například signál z přední části vozu může být výhodně použit v zadní části. Toto je jistě inspirací pro další výzkum.

Poznámka: This research has been supported by the MSMT project No. 1M6840770002 "Josef Bozek's Research Center of Combustion Engines and Automobiles II"

Literatúra

- Gillepsie, T.D. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamic. SAE Book.
- ThrustTube TBX3810. Datasheet DS01047. Online: <http://www.copleycontrols.com/Motion/pdf/DS-pdf/DS01047.pdf>.
- Znamenáček K. (2004). Lineární motor jako akční člen aktivního tlumiče. Diploma thesis, Czech Technical University in Prague.
- Stříbrský, A., Hyniová, K., Honců J. and Kruczek, A. (2007). Energy Recuperation in Automotive Active Suspension Systems with Linear Electric Motor. In Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece.
- Zhou, K. and Doyle J.C. (1998). Essentials of Robust Control. Prentice Hall.
- Kruczek, A. and Stříbrský, A. (2004). H-infinity Control of Automotive Active Suspension with Linear Motor. In Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Sydney, Australia.

Automotive suspension system is an important part of car comfort and safety. In this article automotive active suspension with linear motor as an actuator is designed using H-infinity control. This paper is focused on comparison of different controller designed for quart, half or full-car model (and always used for "full" car). Special attention is placed on energy demand of the whole system. Each controller configuration is simulated and then verified on the hydraulic quarter car test bed.

RESUME