

ZVÝŠENÍ JÍZDNÍHO KOMFORTU POMOCÍ SEMIAKTIVNĚ ŘÍZENÝCH TLUMIČŮ – JÍZDNÍ ZKOUŠKY

RIDE COMFORT INCREASING WITH SEMI-ACTIVELY CONTROLLED DAMPERS – RUNNING TESTS

Filip JENIŠ¹, Ondřej MACHÁČEK², Tomáš MICHÁLEK³, Patrik STANĚK⁴

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252669

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Tento příspěvek popisuje přínos semiaktivního řízení příčných a svislých sekundárních tlumičů v reálných podmínkách na vozu elektrické jednotky Škoda 10Ev („InterPanter“) oproti konvenčním pasivním tlumičům. Výsledky zkoušek ukazují výrazné zvýšení jízdního komfortu, a to zejména při vyšších rychlostech a na tratích s horší kvalitou. Při hodnocení ukazatelem středního pohodlí (N_{MV}) dle normy EN 12299 se dosahovaná hodnota snižuje průměrně o 26 % na běžných tratích.

Klíčová slova

semiaktivní, magnetoreologický, sekundární, tlumič, železniční vůz, zrychlení, komfort

Abstract

This paper describes the benefits of semi-active control of lateral and vertical secondary dampers under real conditions on a Škoda 10Ev („InterPanter“) EMU in comparison with conventional passive dampers. The results show a significant increase in ride comfort thanks to the semi-actively controlled dampers, especially at higher speeds and on poorer quality tracks. The mean comfort index (N_{MV}) on standard lines is reduced by 26% on average according to EN 12299.

Keywords

semi-active, magnetorheological, secondary, damper, railway vehicle, acceleration, comfort

1 ÚVOD

V současné době roste celosvětově význam vysokorychlostní železnice. S rostoucí rychlostí vlaků se však objevují nové problémy. Jednou z výzev, které je třeba řešit, je rostoucí požadavek na jízdní komfort.

¹ Ing. Filip Jeniš, Ph.D.,  0000-0002-1753-1508. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering / Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika, e-mail: filip.jenis@vutbr.cz

² Ing. Ondřej Macháček, Ph.D.,  0000-0003-4720-6375. Strojírna Oslavany, spol. s r.o. Padochovská 31, 664 12 Oslavany, Česká republika, e-mail: machacek@st-os.cz

³ doc. Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.,  0000-0001-7776-6627. University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Means and Diagnostics / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová, Česká republika, e-mail: tomas.michalek@upce.cz

⁴ Ing. Patrik Staněk. VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky, Česká republika, e-mail: stanek@vukv.cz

Za komfort vozu je zodpovědný systém vypružení, zejména pak tlumení v systému. K tlumení kmitání se nejčastěji používají konvenční pasivní tlumiče, avšak jejich možnosti jsou omezené.

Alternativou mohou být semiaktivní (S/A) tlumicí systémy, které dokáží měnit tlumicí charakteristiku podle potřeby na základě signálu z různých senzorů [1, 2]. V případě železničního vozu simulace na zjednodušených fyzických modelech ukazují, že S/A řízení sekundárního příčného tlumiče by mělo snížit příčné vibrace vozu až o 30 %, a tím zvýšit komfort [3, 4].

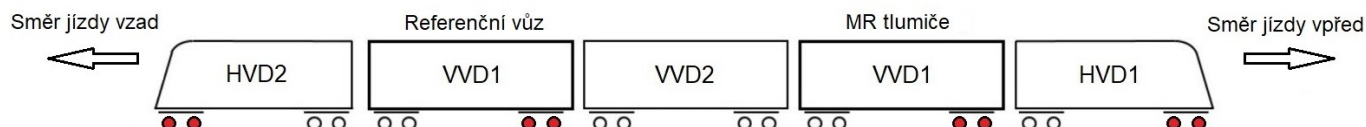
Ovšem zatím nikdo neověřil přínos S/A řízení svislých i příčných tlumičů na reálném voze v provozu na různých tratích. To je nutné, protože virtuální a fyzické modely obsahují různá zjednodušení. Také není jasné, jak různé parametry trati ovlivňují účinnost S/A řízení. Poznatky z reálných aplikací S/A řízených tlumičů na železniční vůz jsou prozatím omezené. Kim [5] pracoval pouze s příčnými tlumiči a použil velmi krátkou testovací trať. V publikaci také nejsou uvedeny dostatečné informace o pasivním tlumení, se kterým je S/A systém porovnáván. Wu [6] použil elektronicky řízené hydraulické tlumiče, avšak dosáhl přínosu pouze 8 %.

Hlavním cílem tohoto článku je ukázat zvýšení jízdního komfortu na vybraném železničním voze v provozu, pomocí semiaktivně řízeného tlumicího systému s příčnými a svislým magnetoreologickými tlumiči (MR) v sekundárním stupni vypružení. Použitý systém S/A tlumení byl vyvinut firmou Strojírna Oslavany, spol. s r.o., ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně a Univerzitou Pardubice. Měření při jízdních zkouškách zajistila firma VÚKV a.s.

2 METODY

2.1 Implementace S/A tlumicího systému na reálné vozidlo

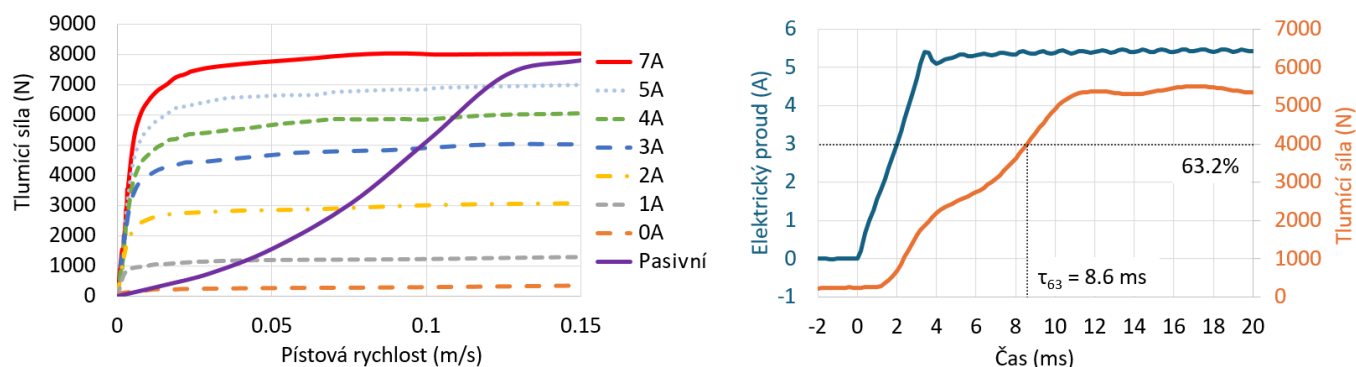
Experimenty byly provedeny na jednopodlažní elektrické jednotce (EMU) 10Ev vyráběné společností Škoda Transportation, zvané „InterPanter“ a provozované Českými drahami. Tato jednotka s maximální rychlostí 160 km/h se skládá z pěti vozů – uspořádání vozů v rámci je znázorněno na obr. 1. Pro zkoušky byl upraven vůz VVD1 (vložený hnací vůz) o hmotnosti 46,2 t. Tento vůz je vybaven jedním hnacím a jedním běžným podvozkem, podrobnější popis jeho konstrukce lze nalézt v [7]. Konvenční pasivní příčné a svislé tlumiče v sekundárním stupni vypružení byly nahrazeny semiaktivními magnetoreologickými tlumiči (obr. 3). Zbývající vozy byly v běžném provozním stavu. Zkoušky byly prováděny v prázdném stavu. Jako referenční vozidlo byl použit druhý vůz VVD1 v soupravě vlaku (tj. vůz stejného typu jako zkoušený vůz, viz obr. 1). Oba vozy typu VVD1 byly vybaveny stejným měřicím zařízením, aby bylo možné porovnat výsledky měření obou měřených vozů za srovnatelných podmínek.



Obr. 1 Uspořádání testované jednotky Škoda 10Ev (hnací podvozky – vyplněná kola)

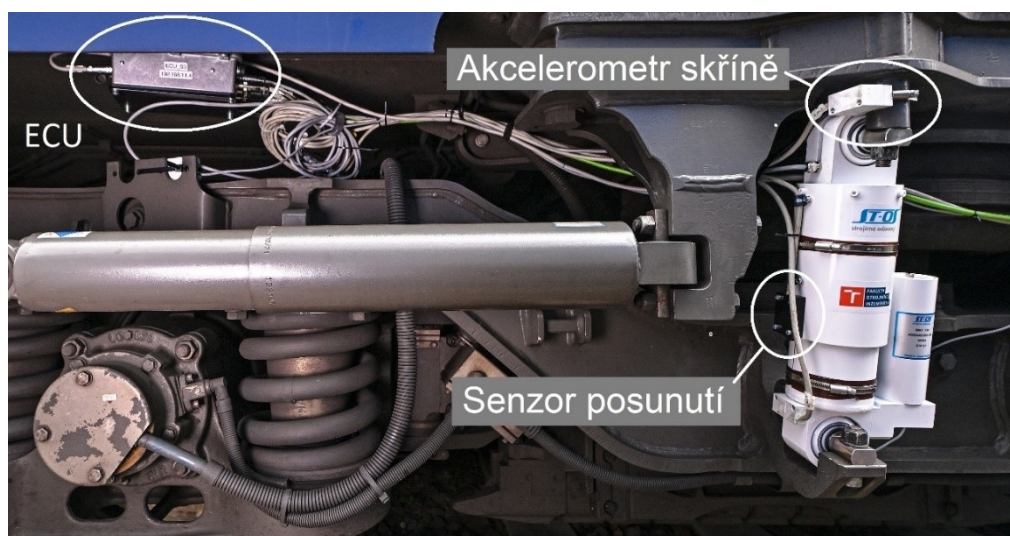
2.2 Magnetoreologické tlumiče a jejich příslušenství

Konstrukce použitých MR tlumičů vychází z dříve vyvinutého MR tlumiče vrtivých pohybů podvozku [8]. Jejich F-v (síla-rychlost) charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 2 vlevo. F-v charakteristika původních pasivních tlumičů je na obr. 2 rovněž znázorněna. F-v charakteristiky jsou symetrické pro kompresi i roztahování a jsou stejné pro příčné i svislé tlumiče. Klíčovým parametrem MR tlumiče je jeho časová odezva. Tedy doba, za kterou tlumicí síla vzroste z počáteční síly na 63,2 % požadované hodnoty [9]. Časová odezva vyvinutého tlumiče je $\tau_{63} = 8,5$ ms při skokovém nárůstu proudu z 0 A na 5,5 A při rychlosti pístu 0,1 m/s, viz obr. 2 vpravo. To je výrazně kratší časová odezva tlumiče v porovnání s odezvou MR tlumiče pro železniční vozidlo, kterou publikoval Guo [10]. Časová odezva síly tlumiče pro skokový pokles proudu z 5,5 A na 0 A je $\tau_{36} = 4$ ms. Metodika měření F-v charakteristiky a časové odezvy tlumiče je podrobně popsána v [11].



Obr. 2 F-v charakteristiky MR tlumiče a F-v charakteristika pasivního tlumiče (vlevo); transientní časová odezva MR tlumiče (vpravo)

Každý MR tlumič je vybaven vlastní řídicí jednotkou a sadou senzorů. S/A řízení vyžaduje signál o zrychlení skříně vozidla a o výchylce tlumiče. Akcelerometr (AIS2IH, STMicroelectronics) pro skříň je umístěn na horní konzole tlumiče a snímač posunutí (MHL200, iC-Haus) je umístěn přímo na těle tlumiče, viz obr. 3. Na základě signálu z těchto dvou senzorů určí elektronická řídicí jednotka (ECU) podle rovnice (1) potřebný elektrický proud, kterým je následně MR tlumič napájen. ECU používá vlastní regulátor proudu, který umožňuje nárůst elektrického proudu na maximální hodnotu za 4 ms (viz obr. 2 vpravo). MR tlumič je na vozidle namontován pomocí standardních pouzder vyrobených společností Gumokov a.s. se jmenovitou radiální tuhostí 20 kN/mm.



Obr. 3 Svislý MR tlumič a jeho výbava senzory a řídicí jednotkou

2.3 Strategie semiaktivního řízení

Strategie řízení MR tlumičů je stejná pro příčné i svislé sekundární tlumiče. Je založena na semiaktivním algoritmu Skyhook linear [12], který byl upraven pro snadnější aplikaci a pro eliminaci „chatteringu“ [13-15], na formu:

$$I = \begin{cases} \text{sat}(k |\dot{y}_2|), & \dot{y}_2(\dot{y}_d) \geq 0 \\ 0, & \dot{y}_2(\dot{y}_d) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

kde I je požadovaný elektrický proud, k je proporční koeficient, $\dot{y}_2$ je rychlost skříně, $\dot{y}_d$ je pístová rychlost, sat značí, že $I \in [0, I_{\max}]$ a $I_{\max}$ je maximální elektrický proud.

Rychlost pohybu skříně vozu v příslušném směru se získá integrací zrychlení naměřeného příslušným akcelerometrem a pístová rychlost se získá derivací posunutí tlumiče naměřené příslušným magnetickým senzorem posunutí.

2.4 Metodologie experimentu a vyhodnocení výsledků měření

Experimenty se semiaktivně řízenými tlumiči byly provedeny na třech železničních tratích v okolí Brna. Základní informace o těchto tratích jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Testovací trati a jejich specifikace

typ trati	traťový úsek	traťová rychlost	typické trasování koleje	technický stav trati	délka úseku
koridor	Modřice–Šakvice	160 km/h	přímá kolej	standardní stav (kolejnice 60E1/1:40)	29 km
hlavní trať	Kuřim–Tišnov	100 km/h	oblouky $R = 400\text{--}800$ m	stará trať (úklon kolejnic 1:20)	10 km
koridor	Maloměřice–Blansko	70–100 km/h	oblouky $R = 250\text{--}400$ m	modernizovaná trať (2022), nové kolejnice (kolejnice 60E2/1:40)	17 km

Každý traťový úsek byl v rámci zkoušek projížděn dvakrát v každém směru. Při prvním průjezdu byly parametry řízení S/A příčných sekundárních tlumičů nastaveny na $k = 0,05$ a $I_{max} = 4$ A (řízení „A“), při druhém průjezdu byly nastaveny na $k = 0,1$ a $I_{max} = 7$ A (řízení „B“). Parametry řízení příčných sekundárních tlumičů byly při všech jízdách $k = 0,05$ a $I_{max} = 3$ A. Tyto hodnoty byly zvoleny na základě simulace na komplexním virtuálním modelu železničního vozidla [7] a na základě předběžného testování na seřadovacím nádraží v Brně Maloměřicích.

Měření jízdního komfortu bylo vyhodnoceno podle normy EN 12299 [16]. Přínos S/A tlumení k jízdnímu komfortu se hodnotil nad hnacími podvozky (kritičtější místo než běžný podvozek). Pro hodnocení byly použity následující veličiny měřené na obou zkušebních vozech VVD1:

- příčné zrychlení a svislé zrychlení měřené na skříni nad hnacím podvozkem;
- podélné zrychlení ve středu skříně.

Pro každý měřený úsek byl vyjádřen parametr N_{MV} (ukazatel středního pohodlí). Metoda hodnocení je podrobně popsána v normě EN 12299. Pro lepší pochopení funkce S/A tlumení, zejména v různých frekvenčních pásmech, byly provedeny také analýzy FFT zrychlení skříně.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1 Koridorová trať, přímá kolej, vysoká rychlost

Výsledky ukazatele středního pohodlí (N_{MV}) na koridorové trati Modřice–Šakvice jsou uvedeny v tab. 2. Při řízení „A“ se ukazatel v průměru snížil o 27 %. To koresponduje s přínosem dosaženým Shin na testovacím stavu [3]. Průměrovaná frekvenční analýza zrychlení skříně nad hnacím podvozkem je potom zobrazena na obr. 4.

Tab. 2 Hodnoty ukazatele středního pohodlí (N_{MV}) pro skříň nad hnacím podvozkem, pasivní a Skyhook režim, pro 4 měřené úseky a jejich průměr na koridorové trati Modřice–Šakvice při konstantní rychlosti 160 km/h

měření č.	směr jízdy	pasivní	Skyhook	přínos
1	vpřed	2,90	1,90	34 %
2	vpřed	2,43	1,83	25 %
3	vzad	2,56	1,97	23 %
4	vzad	3,17	2,31	27 %
průměr		2,76	2,00	27 %

3.2 Hlavní trať se starým kolejovým svrškem

Výsledky ukazatele středního pohodlí na nerekonstruované trati Kuřim–Tišnov jsou uvedeny v tab. 3 (řízení „B“). Průměrovaná frekvenční analýza zrychlení skříně nad hnacím podvozkem je pak zobrazena na obr. 4.

Tab. 3 Hodnoty ukazatele středního pohodlí (N_{MV}) pro skříně nad hnacím podvozkem, pasivní a Shyhook režim, pro 2 měřené úseky a jejich průměr na trati Kuřim–Tišnov při konstantní rychlosti 100 km/h

měření č.	směr jízdy	pasivní	Skyhook	přínos
1	vpřed	1,73	1,21	30 %
2	vpřed	1,69	1,34	20 %
průměr		1,71	1,28	25 %

3.3 Modernizovaná koridorová trať, oblouky o malých poloměrech, nízká rychlost

Třetí testovací trať je charakteristická oblouky o velmi malých poloměrech. Jde sice o koridorovou trať, která ale ve sledovaném úseku vede údolím řeky Svitavy, kde je mnoho oblouků o poloměrech 250–400 m. Proto je tu také podstatně omezená traťová rychlost, která se pohybuje kolem 80 km/h. Trať byla navíc nedávno rekonstruována, takže má velmi kvalitní kolejový svršek. Ukazuje se, že nízká rychlost jízdy a vysoká kvalita trati silně ovlivňují jak hodnotu ukazatele středního pohodlí, tak velikost přínosu. Průměrné snížení ukazatele středního pohodlí je tu o 10 % (řízení „A“), viz tab. 4. Průměrovaná frekvenční analýza zrychlení skříně nad hnacím podvozkem je potom zobrazena na obr. 4.

Tab. 4 Hodnoty ukazatele středního pohodlí (N_{MV}) pro skříně nad hnacím podvozkem, pasivní a Shyhook režim, pro 3 měřené úseky a jejich průměr na koridorové trati Malomeřice–Blansko při konstantní rychlosti 80 km/h

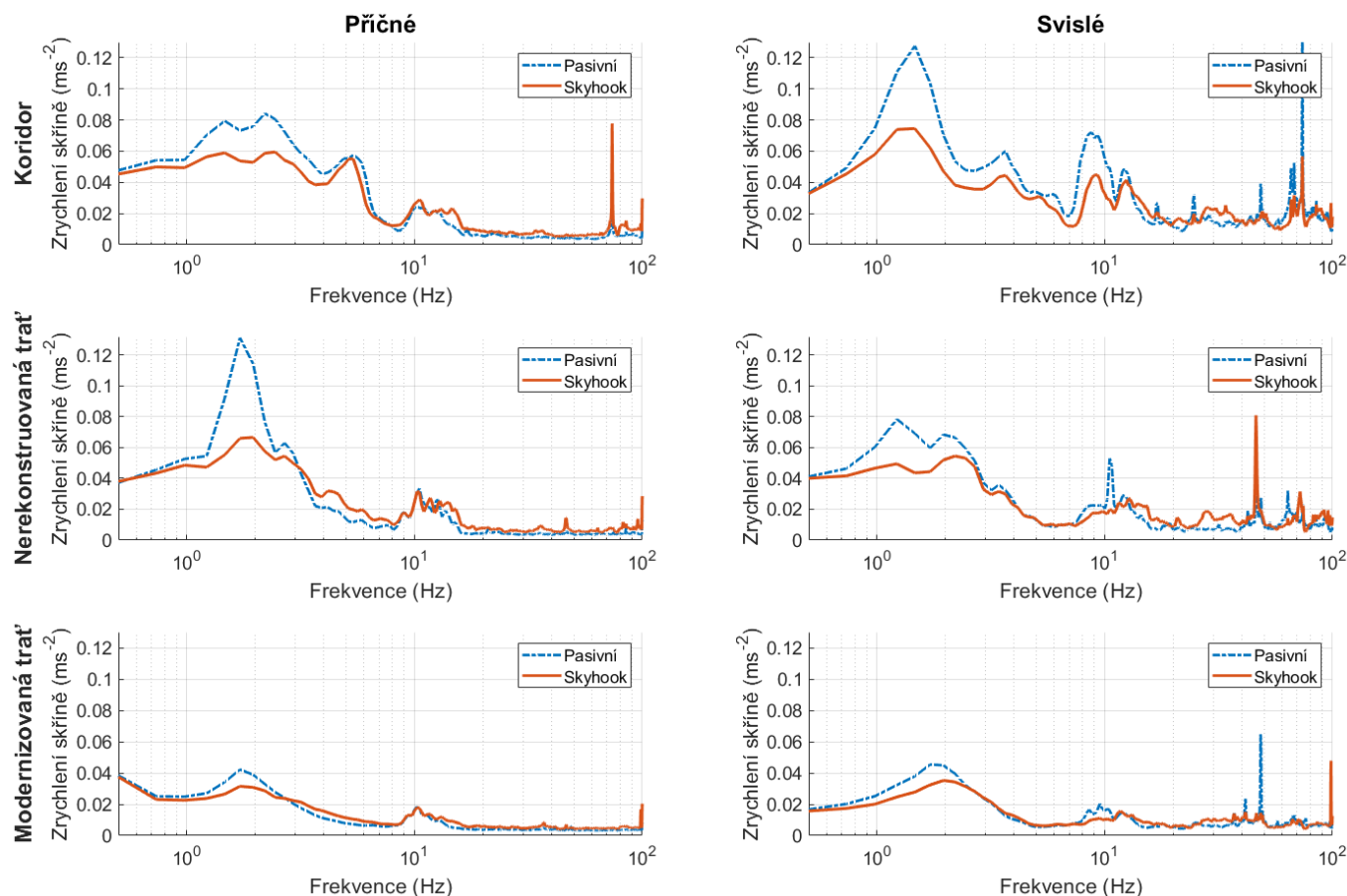
měření č.	směr jízdy	pasivní	Skyhook	přínos
1	vzad	0,84	0,84	-1 %
2	vzad	0,97	0,86	11 %
3	vpřed	1,10	0,92	16 %
průměr		0,97	0,87	10 %

3.4 Diskuze

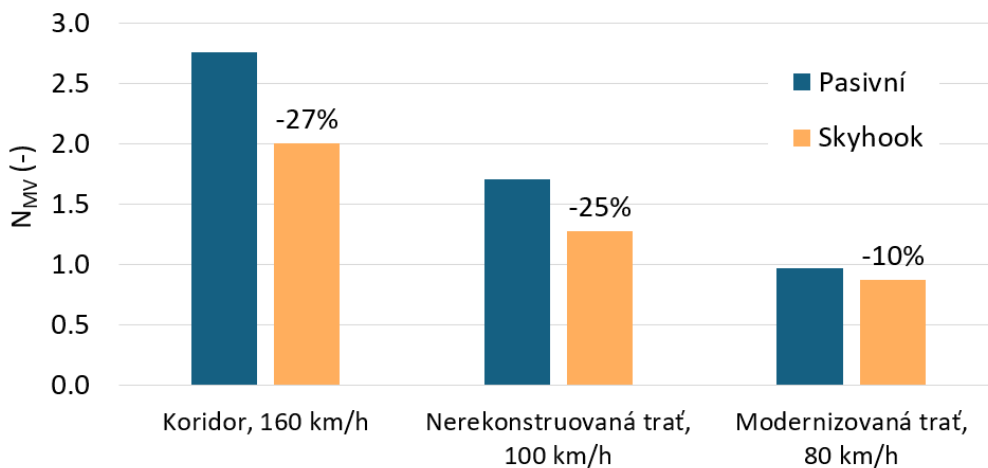
Obr. 5 ukazuje srovnání průměrných hodnot N_{MV} pro skříně nad trakčními podvozky, pro pasivní režim a algoritmus Skyhook a pro všechny zkušební trati. Výsledky ukazují, že účinnost S/A řízení není na všech typech tratí stejná. Čím vyšší je rychlost vozidla a čím horší je kvalita trati, tím vyšší je přínos S/A řízení. Na obloukovité koridorové trati s novými kolejnicemi, kde je rychlost vozidla nízká, je jízdní komfort velmi vysoký i bez S/A řízení. S/A řízení může přesto zvýšit komfort jízdy, ale ne s takovou účinností, jako je tomu na standardních tratích.

Na nerekonstruované železniční trati se jízdní komfort při použití S/A tlumení posunul při rychlosti jízdy 100 km/h u zkoumaného vozidla z kategorie „komfortní“ do kategorie „velmi komfortní“ podle normy EN 12299. A na koridorové trati došlo při rychlosti jízdy 160 km/h k posunu z kategorie „střední“ na „komfortní“.

Z frekvenční analýzy na obr. 4 je zřejmé, že S/A řízení funguje nejlépe na první vlastní frekvenci svislého i příčného vypružení vozu. S/A řízení však funguje dobře až do frekvence cca 3–10 Hz v závislosti na typu trati. To je výrazné zlepšení oproti výsledkům uvedeným v publikaci [5] s reálným použitím MR tlumičů, kde S/A řízení snižuje vibrace pouze do frekvence přibližně 1 Hz. Délka časové odezvy MR tlumiče použitého v publikaci [5] bohužel není známa. Příliš dlouhá doba odezvy však výrazně snižuje účinnost regulace při vyšších frekvencích.



Obr. 4 Průměrovaná frekvenční analýza nefiltrovaného zrychlení skříně nad hnacím podvozkem pro všechny úseky měřené na koridorové trati s rychlostí 160 km/h (nahore), nerekonstruované hlavní trati s rychlostí 100 km/h (uprostřed) a modernizované obloukovité trati s rychlostí 80 km/h (dole) pro příčný (vlevo) a svislý (vpravo) směr



Obr. 5 Porovnání průměrného ukazatele středního pohodlí N_{MV} pro skříně nad hnacím podvozkem pro pasivní režim a Skyhook algoritmus pro všechny zkušební trati

3.5 Problémy a omezení

Během vývoje systému bylo zjištěno několik problémů, které snižují účinnost S/A řízení systému tlumení. Prvním problémem je způsob měření relativní rychlosti skříně vůči podvozku. S/A řízení předpokládá měření této rychlosti přímo, ale v tomto případě se místo toho měří pístová rychlost tlumiče. Tlumič je však namontován pomocí poměrně měkkých pouzder, takže relativní rychlost skříně vůči rámu podvozku není stejná jako pístová rychlost tlumiče. Náhlé změny tlumicí síly při zapínání a vypínání elektrického proudu způsobovaly rychlé změny rychlosti pístu, na které řídicí algoritmus zpětně reagoval.

To mělo za následek „chattering“ – nežádoucí přepínání tlumiče na frekvenci přibližně 90 Hz. To způsobovalo nepříjemný hluk a vibrace. Toto chování by mělo jistě negativní vliv na životnost podvozku a součástí skříně (především konzol pro montáž tlumičů). Z tohoto důvodu musel být původně uvažovaný algoritmus Skyhook linear upraven do podoby rovnice (1). Chattering však neměl vliv na parametr N_{MV} , protože frekvence kolem 90 Hz jsou při hodnocení odfiltrovány.

Měření pístové rychlosti by bylo vhodné nahradit měřením pomocí dvou akcelerometrů – jedním na skříně a druhým na podvozku. Získání relativní rychlosti z obou akcelerometrů bude součástí následujícího vývoje.

Měkká pouzdra tlumičů také prodlužují efektivní dobu odezvy tlumičů, čímž snižují účinnost S/A tlumení. Při změně elektrického proudu musí být pouzdra nejprve stlačena na určitou úroveň, což způsobuje pouze postupný nárůst síly.

Z těchto hledisek by bylo vhodné použít pouzdra o vyšší tuhosti. To je však problematické, protože pohyby skříně vozu vůči rámu podvozku při svislém propružení nebo při průjezdu obloukem by způsobovaly nepříjemné ohybové namáhání pístnic tlumičů, jak bylo zjištěno při předběžných zkouškách. Řešením by mohlo být použití ocelových kulových kloubů, což by ale pro změnu zvýšilo přenos nežádoucích vibrací na vyšších frekvencích.

Dalším problémem je, že použitý vůz není příliš vhodný pro použití S/A řízeného vypružení. Vozy jednotky Škoda 10Ev používají systém sekundárního vzduchového vypružení se dvěma sériově připojenými přídatnými vzduchojemy, přičemž druhý ze vzduchojemů je připojen hadicí o průměru 24 mm a délce 1–2 m, což způsobuje dodatečný tlumicí účinek. Tím se snižuje dynamický rozsah tlumících sil, a tím i účinnost S/A řízení [17].

4 ZÁVĚR

Tento článek se zabývá ověřením funkce S/A řízení příčných a svislých magnetoreologických tlumičů v sekundárním stupni vypružení reálného železničního vozidla (vloženého vozu elektrické jednotky Škoda 10Ev) v provozu na třech různých tratích. Tlumiče jsou řízeny pomocí optimalizovaného algoritmu Skyhook. Je vyhodnocován jízdní komfort dle normy EN 12299. Klíčové závěry článku jsou následující:

- posuzováno ukazatelem středního pohodlí N_{MV} dle EN 12299 je možné zvýšit komfort vozu až o 34 %;
- čím vyšší je rychlost vozidla a čím horší je kvalita trati, tím větší je přínos S/A řízení;
- na standardních tratích dochází ke snížení parametru N_{MV} průměrně o 26 %;
- při pomalé jízdě po kvalitní trati klesá přínos na 10 %.

Lze předpokládat, že lepších výsledků by bylo dosaženo, kdyby byl vůz navržen pro použití se S/A řízenými MR tlumiči, a byly by minimalizovány účinky parazitního tlumení ve vzduchovém vypružení. Bylo by též vhodné zvýšit tuhost uložení tlumiče v radiálním směru při zachování volnosti v ostatních směrech. A také by bylo vhodné měřit relativní polohu skříně vozu vůči rámu podvozku pomocí dvou akcelerometrů namísto měření pístové rychlosti.

Výzkum byl podpořen Technologickou agenturou ČR v rámci grantu CK04000210 a Vysokým učením technickým v Brně v rámci grantu FSI-S-23-821.



Literatura

- [1] SPELTA, C., SAVARESI, S. M., CODECÀ, F., MONTIGLIO, M., IELUZZI, M. Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles. *Asian Journal of Control*. Vol. 14 (2012), no. 4, s. 875–890. ISSN 1561-8625.
- [2] SHIN, Y. J., YOU, W. H., HUR, H. M., PARK, J. H. Semi-active control to reduce carbody vibration of railway vehicle by using scaled roller rig. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 26

- (2012), no. 11, s. 3423–3431. ISSN 1738-494X.
- [3] SHIN, Y. J., YOU, W. H., HUR, H. M., PARK, J. H., LEE, G. S. Improvement of ride quality of railway vehicle by semiactive secondary suspension system on roller rig using magnetorheological damper. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 6 (2014), s. 1–10. ISSN 1687-8132.
 - [4] OH, J. S., SHIN, Y. J., KOO, H. W., KIM, H. Ch., PARK, J. H., CHOI, S. B. Vibration control of a semi-active railway vehicle suspension with magnetorheological dampers. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 8 (2016), no. 4, s. 1–13. ISSN 1687-8132.
 - [5] KIM, H. Ch., SHIN, Y. J., YOU, W. H., JUNG, K. Ch., OH, J. S., CHOI, S. B. A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with MR damper: Railway field tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 231 (2017), no. 3, s. 306–316. ISSN 2041-3017.
 - [6] WU, Y., GAN, F., SHI, H., ZENG, J., CHEN, Ch., FENG, Y. Experimental investigations on the semi-active control of a valve-driven secondary lateral damper for a high-speed rail vehicle. *Journal of Vibration and Control*. Vol. 29 (2023), no. 13–14, s. 3025–3037. ISSN 1741-2986.
 - [7] MICHÁLEK, T., JENIŠ, F. Modelling of secondary suspension for electric multiple unit. In: *Computational Mechanics 2023: 38th conference with international participation, conference proceedings*. Plzeň: University of West Bohemia, 2023, s. 116–118. ISBN 978-80-261-1177-1.
 - [8] KUBÍK, M., STRECKER, Z., JENIŠ, F., MACHÁČEK, O., PŘIKRYL, M., ŠPALEK, P. Magneto-rheological yaw damper with short response time for railway vehicle bogie. In: *International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021, conference proceedings*. VDE, 2021, s. 373–376. ISBN 978-3-8007-5454-0.
 - [9] GONCALVES, F. D., KOO, J. H., AHMADIAN, M. Experimental approach for finding the response time of mr dampers for vehicle applications. In: *International Design Engineering Technical Conference, conference proceedings*. ASME, 2003, s. 425–430. ISBN 0-7918-3703-3.
 - [10] GUO, Ch., GONG, X., ZONG, L., PENG, Ch., XUAN, S. Twin-tube- and bypass-containing magnetorheological damper for use in railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 229 (2015), no. 1, s. 48–57. ISSN 2041-3017.
 - [11] STRECKER, Z., ROUPEC, J., MAZŮREK, I., MACHÁČEK, O., KUBÍK, M., KLAPKA, M. Design of magnetorheological damper with short time response. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 26 (2015), no. 14, s. 1951–1958. ISSN 1530-8138.
 - [12] SAMMIER, D., SENAME, O., DUGARD, L. Skyhook and H^∞ control of semi-active suspensions: Some practical aspects. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 39 (2003), no. 4, s. 279–308. ISSN 0042-3114.
 - [13] STRECKER, Z., ROUPEC, J., MAZŮREK, I., MACHÁČEK, O., KUBÍK, M. Influence of response time of magnetorheological valve in Skyhook controlled three-parameter damping system. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 10 (2018), no. 11, s. 1–8. ISSN 1687-8132.
 - [14] POUSSOT-VASSAL, Ch., SPELTA, C., SENAME, O., SAVARESI, S. M., DUGARD, L. Survey and performance evaluation on some automotive semi-active suspension control methods: A comparative study on a single-corner model. *Annual Reviews in Control*. Vol. 36 (2012), no. 1, s. 148–160. ISSN 1367-5788.
 - [15] SAVARESI, S. M., SPELTA, C. Mixed sky-hook and ADD: Approaching the filtering limits of a semi-active suspension. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. Vol. 129 (2007), no. 4, s. 382–392. ISSN 0022-0434.
 - [16] EN 12299:2024. *Railway applications – ride comfort for passengers- measurement and evaluation*.
 - [17] MACHÁČEK, O., KUBÍK, M., STRECKER, Z., ROUPEC, J., MAZŮREK, I. Design of a frictionless magnetorheological damper with a high dynamic force range. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 11 (2019), no. 3, s. 1–8. ISSN 1687-8132.

Zasláno / received: 16. 06. 2025, přijato / accepted: 11. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Zdeněk Červenka (ŠKODA TRANSPORTATION a.s.), prof. Dr. Ing. habil. Oldřich Polách.