

PŘÍNOS SEMIAKTIVNĚ ŘÍZENÉHO MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE PRO ŽELEZNIČNÍ VOZIDLO

BENEFIT OF A SEMI-ACTIVELY CONTROLLED MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER FOR A RAILWAY VEHICLE

Filip JENÍŠ¹, Tomáš MICHÁLEK², Ivan MAZŮREK³

Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá potenciálním přínosem semiaktivně řízených tlumičů pro železniční vozidlo. Pomocí svislých nebo příčných sekundárních tlumičů je možné podstatně snížit kmitání skříňe a tím zvýšit komfort cestujících. Pomocí řízení tlumičů vrtivých pohybů podvozků je možné zlepšit stabilitu jízdy a snížit opotřebení v kontaktu kolo–kolejnice, ať už za použití pomalého adaptivního řízení, nebo řízení plně semiaktivního. Přínos adaptivního módu byl ověřen na reálném vozidle s magnetoreologickým tlumičem vyvinutým v rámci řešení projektu MPO firmou Strojírna Oslavany, spol. s r.o., ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně. V tomto článku je potom popsáno simulační ověřování přínosu plně semiaktivního řízení nově vyvinutého tlumiče vrtivých pohybů podvozku s krátkou časovou odezvou. Výsledky simulačních výpočtů ukazují, že použití vhodného algoritmu umožňuje dosáhnout klidnějšího chodu vyšetřovaného vozidla při vysoké rychlosti v přímé koleji a má zároveň potenciál snížit úroveň opotřebení v kontaktu kolo–kolejnice.

Klíčová slova

semiaktivní magnetoreologický tlumič, železniční vozidlo, podvozek, komfort, stabilita jízdy, opotřebení

Abstract

This contribution deals with potential benefits of semi-active dampers for a railway vehicle. With the help of vertical or lateral secondary dampers, it is possible to significantly reduce a vibration level of the vehicle body and thus increase passengers' comfort. By controlling the yaw dampers, it is possible to improve running stability and reduce wear in the wheel/rail contact, whether using slow adaptive control or fully semi-active control. The benefit of adaptive mode has been verified on a real vehicle with a magnetorheological damper developed within the Czech Ministry of Industry and Trade project by the company Strojírna Oslavany, spol. s r.o. in cooperation with the Brno University of Technology. This paper then describes the simulation verification of the benefits of fully semi-active control of a developed yaw damper with a short time response. The simulation results show that the application of a suitable algorithm allows to reach smooth running of the investigated vehicle at higher speed in a straight track and has a potential to reduce the level of wear in wheel/rail contact.

Keywords

semi-active magnetorheological damper, railway vehicle, bogie, comfort, stability, wear

¹ Ing. Filip Jeniš, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. Institute of Machine and Industrial Design, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 216, e-mail: filip.jenis@vutbr.cz

² Ing. Tomáš Michálek, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 428, e-mail: tomas.michalek@upce.cz

³ doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc., Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 308, e-mail: mazurek@fme.vutbr.cz

1 ÚVOD

S rozvojem vysokorychlostních železnic se zvyšuje rychlost železničních vozidel, s čímž také rostou požadavky na tato vozidla. Můžeme mluvit především o požadavcích na bezpečnost, komfort a ekonomičnost jízdy. Na dynamické vlastnosti vozidla má zásadní vliv systém vypružení a tlumení, na který jsou tedy kladeny čím dál větší nároky. Vlastnosti železničního vozidla je možné zlepšit buď použitím aktivních prvků, nebo semiaktivně (S/A) řízených tlumičů. V aktivních systémech jsou místo pružin a tlumičů použity aktuátory, které mohou podvozek pomáhat natáčet [1]. Tyto systémy jsou ale oproti semiaktivně řízeným tlumičům, které mohou podle potřeby měnit tlumicí charakteristiku [2], složitější, dražší, energeticky náročnější a náročnější na provedení fail-safe režimu [3].

Semiaktivně řízené tlumiče existují v principu dvou typů: s elektromagnetickým ventilem (CDC) a magnetoreologické (MR). Hlavní výhodou MR tlumičů oproti CDC je, že dokáží podstatně rychleji změnit svoji tlumicí charakteristiku. Funkce MR tlumiče je založena na využití magnetoreologického jevu. Místo klasického hydraulického oleje používají MR kapalinu, což je suspenze feromagnetických mikročástic v nosné kapalině. Je-li MR kapalina vystavena působení externího magnetického pole, dojde k zřetězení feromagnetických částic ve směru siločar magnetického pole a tím i k rapidnímu nárůstu její zdánlivé viskozity. V MR tlumiči tento nárůst zdánlivé viskozity MR kapaliny způsobí nárůst hydraulického odporu pístu a tím nárůst tlumících sil. K tvorbě magnetického pole slouží cívka umístěná v pístu tlumiče a intenzita pole je regulována elektrickým proudem procházejícím cívku.

V několika studiích byl ověřen přínos semiaktivního řízení svislých a příčných MR tlumičů z hlediska pohybu skříňe vozidla [4, 5, 6, 7]. Zveřejněné výsledky jsou konzistentní a ukazují, že amplitudy kmitání skříňe vozidla je možné snížit i více než o třetinu, což vede k podstatnému zvýšení komfortu cestujících.

Dále se nabízí využití potenciálu S/A tlumičů pro řešení rozporu v požadavcích na stabilitu jízdy vozidla ve vysokých rychlostech v přímé koleji a na minimalizaci příčných silových účinků jízdy vozidla na kolej v obloucích malých poloměrů. Zatímco pro zabezpečení vysoké stability je žádoucí vysoká tuhost vedení dvojkolí v rámu podvozku a vysoký odpor podvozku proti natáčení, v druhém případě jsou tyto konstrukční požadavky přesně opačné. Tento rozpor je možné pomocí MR tlumičů řešit buď na úrovni vedení dvojkolí (viz [8]), nebo na úrovni tlumičů vrtivých pohybů podvozku, čímž se dále zabývá tento příspěvek.

Pro účinné řízení S/A tlumiče je důležitý jeho dynamický rozsah, tedy poměr tlumicí síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu (viz [9]), a také časová odezva, tedy čas, za jaký tlumič dosáhne požadované tlumicí síly (viz [10]), což současné publikace příliš nereflktují. S malým dynamickým rozsahem a s dlouhou časovou odezvou účinnost použité strategie klesá. V tomto příspěvku se bude pracovat s časovou odezvou a dynamickým rozsahem podle již vyrobeného tlumiče vrtivých pohybů.

2 METODY

2.1 Model železničního vozidla

Pro simulace byl využit systém SJKV (*Simulace jízdy kolejového vozidla*), který je vyvíjen na Dopravní fakultě Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice. Jedná se o vlastní multi-body simulační software, jenž slouží k vyšetřování dynamických vlastností různých typů kolejových vozidel. Použitý model vozidla reprezentuje moderní čtyřnápravovou elektrickou lokomotivu s bezkolébkovými podvozky a s plně vypruženým trakčním pohonem. Model lokomotivy je tvořen celkem patnácti tuhými tělesy (dvojkolí, ložiskové skříňe, rámy podvozků včetně trakčních motorů, skříň vozidla), vzájemně spolu vázaných pružnými a tlumicími vazbami, které reprezentují reálné prvky vypružení, vedení dvojkolí atd. Přehled základních parametrů modelu je uveden v tab. 1. Struktura akademické verze systému SJKV je podrobněji popsána např. v [11].

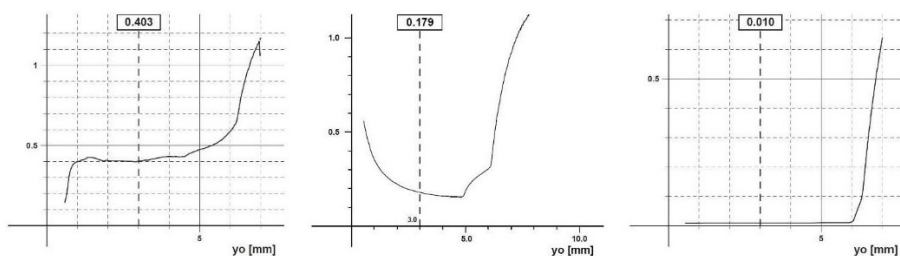
Tab. 1 Přehled základních parametrů vyšetřovaného modelu čtyřnápravové elektrické lokomotivy

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
vzdálenost otočných čepů (středů) podvozků	E	[m]	8,70
rozvor podvozků	B	[m]	2,50
jmenovitý průměr kol	D_o	[m]	1,25
hmotnost dvojkolí (nevypužené hmoty)	M_d	[kg]	2 870
hmotnost rámu podvozků (jedenkrát vypužené hmoty)	M_p	[kg]	10 265
hmotnost skříně vozidla (dvakrát vypužené hmoty)	M_s	[kg]	57 990
podélná tuhost vedení ložiskové skříně v rámu podvozků	K_{1x}	[kN/mm]	88,8
příčná tuhost vedení ložiskové skříně v rámu podvozků	K_{1y}	[kN/mm]	3,9
svislá tuhost primárního vypružení (pro jednu ložiskovou skříň)	K_{1z}	[kN/mm]	2,42
příčná tuhost vazby skříně a podvozků	K_{2y}	[kN/mm]	0,62
svislá tuhost vazby skříně a podvozků	K_{2z}	[kN/mm]	2,08
úhlová tuhost vazby skříně a podvozků (odpor proti natáčení)	γ	[kN·m/rad]	1,156
konstanta tlumení svislého tlumiče primárního vypružení	B_{1z}	[kN·s/m]	40
konstanta tlumení svislého tlumiče sekundárního vypružení	B_{2z}	[kN·s/m]	80
konstanta tlumení příčného tlumiče sekundárního vypružení	B_{2y}	[kN·s/m]	60
počet tlumičů vrtivých pohybů podvozků na jednom podvozku	N_{ivr}	[-]	2
příčná vzdálenost tlumičů vrtivých pohybů od podélné osy vozidla	W_{st}	[m]	1,39

2.2 Podmínky v kontaktu kolo kolejnice

Jízdní vlastnosti kolejových vozidel jsou do značné míry ovlivněny podmínkami kontaktu dvojkolí a koleje. Z hlediska působení tečných sil v kontaktu byl při provedených simulacích aplikován adhezní model prof. Polácha [12] při uvažování součinitele tření v kontaktu kolo–kolejnici o hodnotě 0,4, která odpovídající suchým kolejnicím. Z hlediska geometrického vztahu dvojkolí a koleje byly příslušné simulace provedeny pro trojici různých podmínek. Z hlediska funkce ekvivalentní konicity, kterou je možné považovat za jednu z nejvýznamnějších charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí–kolej, byly uvažovány následující podmínky:

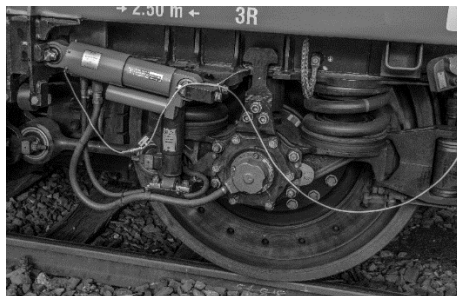
- kontakt s velmi nízkou ekvivalentní konicitou ($\lambda_{eq} = 0,01$, viz obr. 1 vpravo), který odpovídá dvojkolí s teoretickým jízdním obrysem kol S1002/e32,5 a koleji s teoretickým tvarem hlav kolejnic 60E1 s úklonem 1:20;
- kontakt se střední ekvivalentní konicitou ($\lambda_{eq} = 0,18$, obr. 2 uprostřed), odpovídající dvojkolí s jízdním obrysem kol S1002/e32,5 a koleji s kolejnicemi 60E1 s úklonem 1:40;
- kontakt s vyšší ekvivalentní konicitou ($\lambda_{eq} = 0,40$, obr. 2 vlevo), který odpovídá provozně opotřebovaným jízdním obrysům kol dvojkolí v kombinaci s kolejnicemi 60E1 s úklonem 1:40. Tato úroveň ekvivalentní konicity byla zvolena s ohledem na požadavky TSI INS [13].



Obr. 1 Funkce ekvivalentní konicity pro uvažované podmínky kontaktu dvojkolí a koleje

2.3 Magnetoreologický tlumič

Jádrem příspěvku je magnetoreologický tlumič vrtivých pohybů, určený pro podvozek moderní čtyřnápravové lokomotivy o hmotnosti 90 t (obr. 2). Tento tlumič byl vyvinut a vyroben v rámci řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky TRIO FV30310 firmou Strojírna Oslavany, spol. s r.o., ve spolupráci s Vysokým učeníem technickým (VUT) v Brně.



Obr. 2 MR tlumič namontovaný na lokomotivě

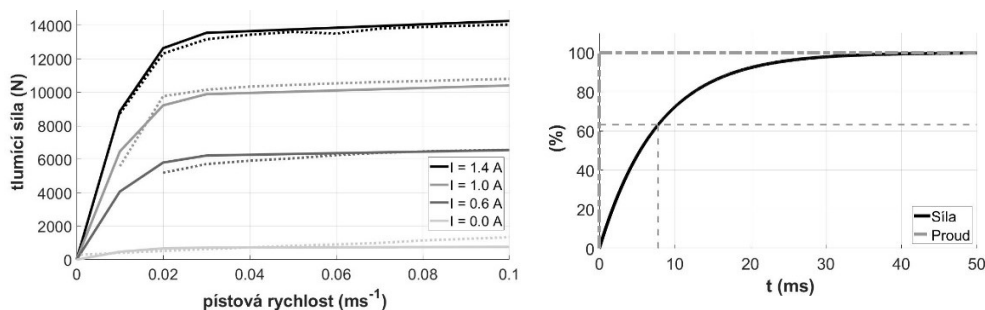
V rámci řešení projektu byly na VUT naměřeny jeho klíčové charakteristiky (F - v - I charakteristika a časová odezva), které v tomto výzkumu posloužily jako podklad pro tvorbu matematického modelu silového působení tlumiče, aplikovaného do systému SJKV (viz následující kapitoly).

F- v - I charakteristika tlumiče

F - v - I charakteristikou tlumiče se myslí závislost síly tlumiče (F) na okamžité pístové rychlosti (v) a elektrickém proudu (I) procházejícím cívkou. Při navržených způsobech řízení bude tlumič fungovat v takzvaném ON/OFF režimu, tedy bude přepínat mezi maximální a minimální tlumicí silou, tedy mezi stavy odpovídajícími hodnotám proudu 0 A a 1,4 A. Naměřená F - v - I charakteristika a charakteristika zjednodušená pro potřeby simulace jsou zobrazeny na obr. 3 vlevo.

Časová odezva tlumiče

U reálného MR tlumiče dochází k prodlevě mezi nástupem proudu a nástupem síly. Nástup síly v reakci na skokovou změnu proudu lze modelovat jako systém prvního řádu [14]. Je definovaná primární časová odezva τ_{63} , a to jako čas, za který síla dosáhne 63,2 % požadované hodnoty (obr. 3 vpravo). Primární časová odezva funkčního vzorku MR tlumiče byla naměřena $\tau_{63} = 7,8$ ms, a proto byl v příslušných simulacích exponenciální náběh síly modelován s touto časovou odezvou.



Obr. 3 Měřené (tečkovaná) a aproximované (plná) F - v charakteristiky MR tlumiče pro různé proudy – vlevo, znázornění časové odezvy tlumiče – vpravo

Ověření funkce adaptivního režimu tlumiče

Předmětný MR tlumič byl po výrobě otestován v adaptivním módu na lokomotivě výrobce Škoda Transportation v podmínkách zkušební koleje (obr. 2). Na každém podvozku byly namontovány dva

tlumiče. Zkouška byla provedena průjezdem protisměrnými oblouky (tzv. S-obloukem) o poloměru 190 m s mezipřímou délky 6 m rychlostí 40 km/h (dle požadavků přílohy F normy EN 14363 [15]). Kolej v S-oblouku byla osazena tenzometry pro měření vodicích a svislých kolových sil. Vodicí síly uvedené v tabulce byly získány jako maximální hodnoty z několika jízd a všech měřicích bodů.

Tab. 2 Výsledky testu adaptivního režimu [16]

Konfigurace	Vodicí síla [kN]	Srovnání [%]
MR tlumič off-state	80	95
MR tlumič on-state	87	104
pasivní tlumič	84	100

Na základě výsledků uvedených v tab. 2 je možné konstatovat, že deaktivování tlumičů vrtivých pohybů podvozků zde umožňuje při průjezdu příslušným S-obloukem snížit maximální vodicí sílu o 5 % oproti klasickým pasivním tlumičům. Tlumicí síla ve vypnutém stavu je bohužel silně ovlivněna teplotou tlumiče, která při testu činila jen 16 °C. Během normální jízdy by se tlumič rychle zahřál na provozní teplotu a maximální vodicí síla při průjezdu S-obloukem by se, předpokládáme, dále snížila.

2.4 Semiaktivní řízení tlumiče

V simulačním prostředí byla testována funkce dvou algoritmů pro řízení tlumiče. Oba si kladou za cíl zvýšit stabilitu jízdy vozidla a snížit opotřebení v kontaktu kolo–kolejnice:

- první algoritmus („*Tracking*“) předpokládá dokonalou predikci úhlu natočení osy koleje,
- druhý algoritmus („*Accelerating*“) vychází z algoritmu „modifikovaný groundhook“ a jeho cílem je minimalizovat rozkmit příčné (vodicí) síly v kontaktu kolo–kolejnice.

Algoritmus „*Tracking*“

Idea řízení tlumiče tímto algoritmem je jednoduchá. Cílem je udržet minimální úhel podvozku vůči ose koleje φ_{t-r} . V okamžiku, kdy se úhel podvozku vůči ose koleje bude zmenšovat, bude tlumič deaktivován, aby tomuto pohybu podvozku nebránil. A naopak, pokud se bude skutečná poloha podvozku od požadované polohy vzdalovat, tlumič se aktivuje, tak aby tomuto pohybu bránil. V případě, že by se skříň vozidla pohybovala rychleji než podvozek, je nutné algoritmus přepnout, aby skříň podvozek nerozpohybovala místo brzdění a naopak. Proto je úhlová rychlost podvozku sledována vůči skříní vozidla. Matematicky je tento princip vyjádřen podmínkou (1) pro F_{Tr} .

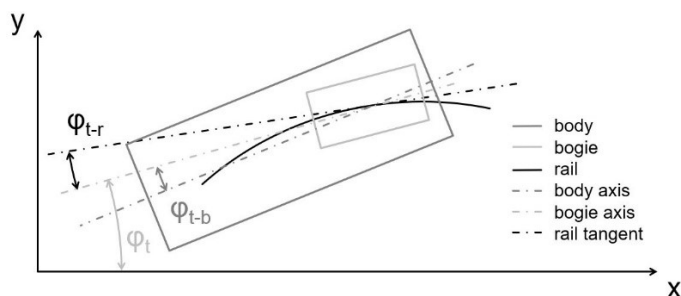
Algoritmus počítá s dokonalou (tedy včasnou a dostatečně přesnou) predikcí polohy osy koleje. Taková predikce ovšem není v současné době dostupná. Polohu koleje by bylo teoreticky možné sledovat a vyhodnocovat pomocí kamery na lokomotivě [17], což je námět na další výzkum.

Algoritmus „*Accelerating*“

Abychom dokázali řídit podvozek i bez informace o prostorové poloze osy koleje, byl navržen druhý algoritmus, který pracuje s úhlovým zrychlením podvozku, což je poměrně snadno měřitelná veličina. Tento algoritmus je odvozen od algoritmu „modifikovaný groundhook“ z oblasti automotive, jehož cílem je minimalizovat rozkmit svislých sil v kontaktu kolo–vozovka. Funkce algoritmu byla ověřena na reálném modelu automobilového podvozku [14]. V tomto výzkumu byl algoritmus upraven tak, aby minimalizoval rozkmit vodicích sil, což lze matematicky vyjádřit podmínkou (2) pro F_{Ac} :

$$F_{Tr}(v) = \begin{cases} F_{max}(v), & \dot{\varphi}_{t-b} \cdot \varphi_{t-r} < 0 \\ F_{min}(v), & \dot{\varphi}_{t-b} \cdot \varphi_{t-r} \geq 0 \end{cases}, \quad F_{Ac}(v) = \begin{cases} F_{max}(v), & \ddot{\varphi}_t \cdot \dot{\varphi}_{t-b} < 0 \\ F_{min}(v), & \ddot{\varphi}_t \cdot \dot{\varphi}_{t-b} \geq 0 \end{cases}, \quad (1), (2)$$

kde F_{Tr} a F_{Ac} je aktuální tlumicí síla, F_{max} síla tlumiče v aktivovaném stavu, F_{min} síla tlumiče v stavu deaktivovaném, $\ddot{\varphi}_t$ úhlové zrychlení podvozku vůči základnímu souřadnému systému, $\dot{\varphi}_{t-b}$ úhlová rychlost podvozku vůči skříní, φ_{t-r} úhel podvozku vůči ose koleje a v je pístová rychlost.



Obr. 4 Schéma úhlů použitých pro definici řídicích algoritmů S/A tlumičů

2.5 Metoda hodnocení

Jízdní vlastnosti lokomotivy byly sledovány při simulaci jízdy po koleji s reálnými nerovnostmi rychlostí 220 km/h z hlediska čtyř parametrů: příčná výchylka dvojkolí Y_w , rámová síla H (tj. příčná síla mezi dvojkolím a rámem podvozku) pro jednotlivá dvojkolí, příčné zrychlení skříně na stanovišti strojvedoucího $\ddot{Y}_b$ a číslo opotřebení W_b , určené pro jednotlivá kola pomocí vztahu:

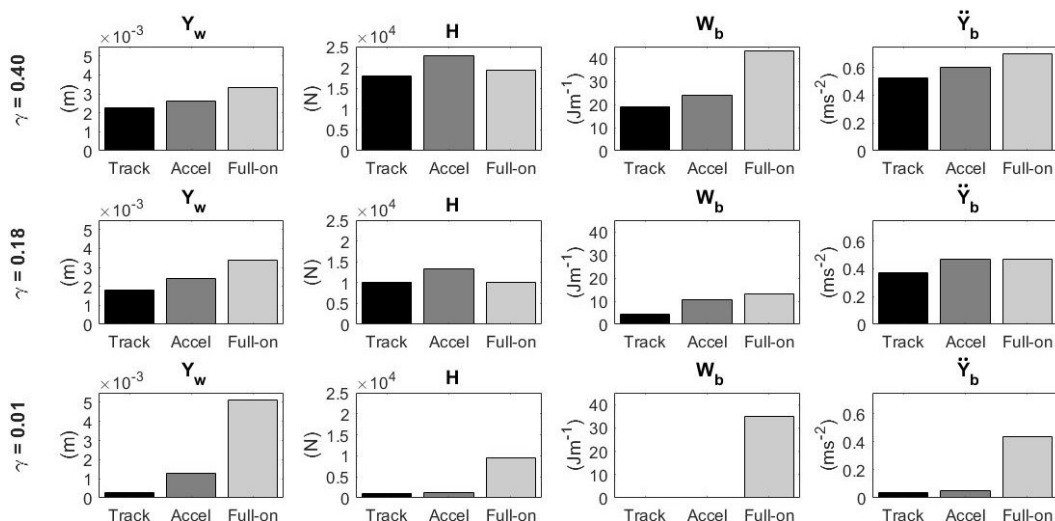
$$W_b = |T_x \cdot s_x| + |T_y \cdot s_y|, \quad (3)$$

kde T_x , T_y jsou podélná a příčná tečná síla a s_x , s_y odpovídající skluzu v kontaktu kolo–kolejnice.

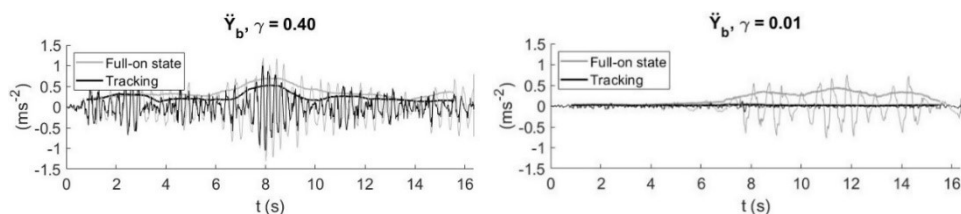
Pro každou z těchto sledovaných veličin bylo vyjádřeno plovoucí RMS s délkou okna 100 m (ve smyslu hodnocení stability jízdy v souladu s požadavky normy EN 14363 [15] na provádění jízdních zkoušek vozidel, kde se takto přistupuje např. k hodnocení rámových sil při aplikaci zjednodušené metody měření). Pro jednotlivé varianty (algoritmy) pak byly porovnávány maximální hodnoty RMS pro nejhorší dvojkolí (resp. kolo u W_b), a to pro všechny tři zmiňované úrovně ekvivalentní konicity.

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

Na obr. 5 je provedeno grafické porovnání sledovaných parametrů vždy nejhoršího dvojkolí/kola pro algoritmy „Tracking“, „Accelerating“ a pro „Full-on state“ režim, a to napříč scénáři odpovídajícími úrovním ekvivalentní konicity o charakteristických hodnotách 0,40, 0,18 a 0,01. Na obr. 6 je potom zobrazen průběh $\ddot{Y}_b$ pro simulace jízdy na koleji s ekvivalentní konicitou 0,40 a 0,01.



Obr. 5 Souhrn výsledků provedených simulací – posouzení přínosu S/A tlumení vrtivých pohybů podvozků



Obr. 6 Průběh příčného zrychlení skříně na stanovišti strojvedoucího a jeho plovoucí RMS (tlustá čára) pro algoritmus „Tracking“ a „Full-on state“ režim při simulaci jízdy rychlostí 220 km/h na koleji s nerovnostmi za podmínky ekvivalentní konicity 0,40 (vlevo) a 0,01 (vpravo)

Z uvedených výsledků vyplývá, že přínos navržených algoritmů semiaktivního řízení tlumičů vrtivých pohybů podvozků je z hlediska stability jízdy vozidla silně závislý na podmínkách kontaktní geometrie dvojkol–kolej. Za efektivnější je přitom možné považovat algoritmus „Tracking“, který vede ve všech vyšetřovaných případech simulace jízdy vozidla vysokou rychlostí v přímé koleji ke zlepšení všech sledovaných parametrů (v porovnání s vozidlem se stále aktivovanými tlumiči). V případě simulace jízdy po koleji s vyšší úrovní ekvivalentní konicity – což je scénář, který je z hlediska dosahovaných absolutních hodnot sledovaných parametrů nejkritičtější – dochází ve vyšetřovaném úseku k poklesu maximální hodnoty RMS rámové síly sice jen o 8 %, avšak např. z hlediska jízdního komfortu je přínos semiaktivních tlumičů výraznější (maximální hodnota RMS příčného zrychlení na stanovišti strojvedoucího ve vyšetřovaném úseku poklesne o 25 %). Oproti tomu algoritmus „Accelerating“ zde přináší pokles maximální hodnoty RMS příčného zrychlení na stanovišti strojvedoucího jen o 13 %, zatímco v případě rámových sil dochází oproti lokomotivě s pasivními tlumiči dokonce ke zhoršení (viz obr. 4). Rámovou sílu je přitom možné považovat za měřítko stability jízdy vozidla a zrychlení na stanovišti za měřítko jízdního komfortu.

V případě simulací jízdy vozidla po koleji se střední úrovní ekvivalentní konicity jsou pozorované trendy velmi podobné jako v případě podmínek s vyšší úrovní ekvivalentní konicity (algoritmus „Tracking“ přináší oproti vozidlu s pasivními tlumiči mírné zlepšení jízdních vlastností, algoritmus „Accelerating“ v některých parametrech naopak zhoršení), avšak celkově se dosahované hodnoty sledovaných veličin pohybují v nižších absolutních číslech, a tak nejsou z hlediska jízdních vlastností vozidla natolik kritické.

Zcela zásadní zlepšení jízdních vlastností vozidla v důsledku použití navržených algoritmů semiaktivního tlumení však lze zaznamenat v případě simulace jízdy po koleji s nízkou úrovní ekvivalentní konicity. V těchto podmínkách dochází k téměř úplnému uklidnění příčného pohybu dvojkolí (viz obr. 5), a tudíž i příslušných rámových sil a úrovní příčného zrychlení na skříně (viz též průběhy na obr. 6). I v tomto případě je dosahováno mírně lepších výsledků s algoritmem „Tracking“ – viz obr. 4.

4 ZÁVĚR

Ukazuje se, že mimo zvyšování komfortu vibroizolací skříně, lze v principu S/A řízení tlumičů účinně použít také pro řešení rozporu v požadavcích na tlumicí systém pro rychlou jízdu v přímé koleji na straně jedné a v obloucích o malých poloměrech na straně druhé. Při vysokých rychlostech umožňují navržené algoritmy zlepšit stabilitu jízdy vozidla a při vjezdu do oblouku mohou být tlumiče deaktivovány, čím se sníží špičkové hodnoty vodicích sil a s tím i opotřebením kol a kolejnic.

V tomto příspěvku se jedná o úvodní studii. Lepší výsledky se dají očekávat při použití tlumiče s větší silou v aktivovaném stavu (větší sílu půjde použít, protože tlumič bude možné deaktivovat při vjezdu do oblouku). Zatím také nebyl testován vliv časové odezvy, s rychlejším tlumičem se dají očekávat lepší výsledky. A v neposlední řadě se dají očekávat lepší výsledky při použití pokročilejšího algoritmu, který nebude pouze dvoustavový, ale bude přepínat mezi různými proudy (proporčně).

Tento výzkum byl podpořen MPO ČR v rámci projektu FV30310, Technologickou agenturou ČR v rámci projektu TN01000026 a Vysokým učením technickým v Brně v rámci projektu FSI-S-20-6247.



Literatura

- [1] PÉREZ, J., BUSTURIA, J. M., GOODALL, R. M. Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles. *Control Engineering Practice*. 2002, **10**(9), 1005–1012. ISSN 09670661.
- [2] SPELTA, C., SAVARESI, S. M., CODECÀ, F., MONTIGLIO, M., IELUZZI, M. Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles. *Asian Journal of Control*. 2012, **14**(4), 875–890. ISSN 15618625.
- [3] GOODALL, R. M. Control engineering challenges for railway trains of the future. *Measurement and Control*. 2011, **44**(1), 16–24. ISSN 00202940.
- [4] LAU, Y. K., LIAO, W. H. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005, **219**(4), 261–276. ISSN 09544097.
- [5] CODECÀ, F., SAVARESI, S. M., SPELTA, C., MONTIGLIO, M., IELUZZI, M. Semiactive control of a secondary train suspension. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2007. ISSN 2159-6255.
- [6] HUDHA, K., HARUN, M. Hafiz, HARUN, M. Hanif, JAMALUDDIN, H. Lateral suspension control of railway vehicle using semi-active magnetorheological damper. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings (IV)*. 2011, 728–733. ISSN 1931-0587.
- [7] 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*. 2012, **26**(11), 3423–3431. ISSN 1738494X.
- [8] WEI, X., ZHU, M., JIA, L. A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers. *Vehicle System Dynamics*. 2016, **54**(7), 982–1003. ISSN 17445159.
- [9] 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*. 2019, **11**(3), 1–8. ISSN 1687-8140.
- [10] 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*. 2018, **10**(11), 1–8. ISSN 1687-8140.
- [11] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Programový systém SJKV-V4N v. 1.0, technická a uživatelská dokumentace*. 2018. Dostupné z: <https://dfjp.upce.cz/dfjp/kdpd/kolejova-vozidla>
- [12] POLACH, O. A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code. *Vehicle System Dynamics*. 2000, **33**(supplement), 728–739.
- [13] Nařízení Komise (EU) č. 1299/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii. In: *Úřední věstník Evropské unie*. L 356, 12. 12. 2014.
- [14] STRECKER, Z., MAZŮREK, I., ROUPEC, J., KLAPKA, M. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica*. 2015, **50**(8), 1949–1959. ISSN 15729648.
- [15] ČSN EN 14363+A1. *Železniční aplikace – Zkoušení a simulace pro schvalování železničních vozidel z hlediska jízdních vlastností – Jízdní chování a stacionární zkoušky*. Praha: ČAS, 2020.
- [16] KUBÍK, M., STRECKER, Z., JENIŠ, F., MACHÁČEK, O., PŘIKRYL, M., ŠPALEK, P. Magnetorheological Yaw Damper with Short Response Time for Railway Vehicle Bogie. In: *International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021*. 2021, 373–376. ISBN 9783800754540.
- [17] BANIČ, M., MILTENOVÍČ, A., PAVLOVIČ, M., ČIRIČ, I. Intelligent machine vision based railway infrastructure inspection and monitoring using UAV. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2019, **17**(3), 357–364. ISSN 23350164.