



**26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOL'AJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko**

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.20>

VLIV SEMIAKTIVNÍHO ŘÍZENÍ TLUMIČŮ VRTIVÝCH POHYBŮ NA KRITICKOU RYCHLOST ŽELEZNIČNÍHO VOZIDLA

THE EFFECT OF SEMI-ACTIVE CONTROL OF BOGIE YAW DAMPERS ON THE RAILWAY VEHICLE CRITICAL SPEED

Filip JENIŠ^{*)}, Tomáš MICHÁLEK

1 ÚVOD

S rozvojem vysokorychlostního železničního systému roste rychlost železničních vozidel, s čímž rostou i požadavky na tato vozidla. Nutnou podmínkou zvyšování rychlosti je přitom zachování stability jízdy vozidla. Při vysoké rychlosti totiž může za určitých podmínek dojít k nestabilnímu chodu, který spočívá v nadměrném rozvinutí samobuzeného příčného kmitání dvojkolí ve volném kanálu koleje s negativními důsledky na silové působení vozidla na kolej, na bezpečnost jízdy i na jízdní komfort.

Na stabilitu vozidla má zásadní vliv systém vypružení a tlumení, na který jsou tímto kladeny čím dál vyšší nároky. Se zvyšujícími se požadavky na tlumicí systém se objevuje problém s rozdílnými požadavky pro různé režimy jízdy. Pro jízdu vysokou rychlostí v přímé koleji je nutné zabezpečit stabilitu pomocí vysoké tuhosti vedení dvojkolí v rámu podvozku a vysokého odporu podvozku proti natáčení. Oproti tomu v obloucích malých poloměrů (ale také v odbočných větvích výhybek) je požadavek na minimalizaci příčných silových účinků vozidla na kolej, takže požadavky na systém vypružení a vedení dvojkolí jsou přesně opačné. Tento rozpor je obtížné vyřešit pomocí konvenčních pasivních tlumičů.

Vlastnosti železničního vozidla je možné zlepšit použitím buď aktivních prvků, nebo pomocí semiaktivně (S/A) řízených tlumičů. V aktivním systému jsou obecně namísto pružin a tlumičů použity aktuátory, které generují sílu potřebnou k utlumení pohybu podvozku při jízdě v přímé koleji a při průjezdu oblouky malých poloměrů pomáhají podvozek natáčet [1]. Aktivní systémy jsou však oproti S/A řízeným tlumičům složitější, dražší, energeticky náročnější a náročnější na provedení fail-safe režimu [2]. S/A řízené tlumiče mohou podle potřeby měnit tlumicí charakteristiku [3], a mohly by tak být alternativou k aktivním prvkům.

Semiaktivně řízené tlumiče existují ve dvou typech: s elektromagnetickým ventilem (CDC) a magnetoreologické (MR). Hlavní výhodou MR tlumičů oproti CDC tlumičům je fakt, že dokáží podstatně rychleji změnit svoji tlumicí charakteristiku. MR tlumiče fungují na principu magneto-reologického jevu. Namísto klasického hydraulického oleje používají MR kapalinu – suspenzi feromagnetických mikročástic v nosné kapalině. Pokud je MR kapalina vystavena externímu magnetickému poli, dojde k zřetězení feromagnetických částic ve směru magnetického pole, a tím i k rapidnímu nárůstu její zdánlivé viskozity. V MR tlumiči

^{*)} **Ing. Filip JENIŠ**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika. Tel.: +420 541 143 216, e-mail: Filip.Jenis@vutbr.cz

Ing. Tomáš MICHÁLEK, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dislokované pracoviště Dopravní fakulty Jana Pernera, Nádražní 547, 56002 ČESKÁ TŘEBOVÁ, Česká republika. Tel.: +420 466 037 415, e-mail: Tomas.Michalek@upce.cz.

tento nárůst viskozity MR kapaliny způsobí nárůst hydraulického odporu pístu, a tím nárůst tlumících sil. K vytvoření magnetického pole slouží cívka umístěná v pístu tlumiče, přičemž intenzita pole je regulována proudem procházejícím cívkou.

Tlumiče, jež nejvíce ovlivňují stabilitu jízdy železničního vozidla, jsou tlumiče vrtivých pohybů podvozku. Tato aplikace se tedy jeví jako nejvhodnější pro použití MR tlumičů. Bylo ukázáno, že S/A řízení tlumičů vrtivých pohybů má potenciál zlepšit jízdní vlastnosti vozidla při podkritické rychlosti [4]. Tento příspěvek se zabývá potenciálním zvýšením kritické, a tedy i maximální provozní rychlosti vozidla pomocí S/A řízení těchto tlumičů. Kritickou rychlostí se přitom myslí rychlost, při níž vozidlo ztrácí stabilitu, přičemž podle normy EN 14363 je v rámci jízdních zkoušek ověřováno, že vozidlo vykazuje stabilní chod i při rychlosti o 10 % vyšší, než je maximální provozní rychlost vozidla.

2 SEMIAKTIVNÍ ŘÍZENÍ TLUMIČŮ

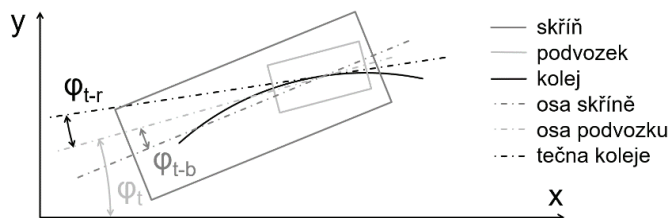
Pro semiaktivní řízení tlumičů vrtivých pohybů podvozku byly navrženy dvě S/A strategie, jejich cílem je zvýšit stabilitu jízdy vozidla, resp. kritickou rychlost. Příslušné řídicí algoritmy byly pracovně pojmenovány *Tracking* a *Accelerating*.

2.1 Algoritmus „Tracking“

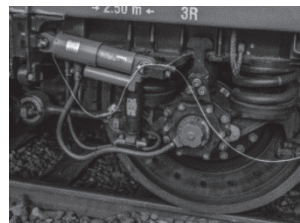
Idea řízení tlumiče tímto algoritmem je jednoduchá. Cílem je udržet minimální úhel podélné osy podvozku vůči ose koleje φ_{t-r} (**obr. 1**). V okamžiku, kdy se úhel podvozku vůči ose koleje bude zmenšovat a úhlová rychlost podvozku bude větší než úhlová rychlost skříně, bude tlumič deaktivován, aby zmenšování úhlu podvozku vůči koleji nebránil. A naopak, pokud se bude skutečná poloha podvozku od požadované polohy vzdalovat (a úhlová rychlost podvozku bude větší než úhlová rychlost skříně), tlumič se aktivuje tak, aby tomuto pohybu bránil, viz rovnice (1). Tento algoritmus počítá s dokonalou predikcí polohy osy koleje. Taková predikce však není v současné době dostupná. Polohu koleje by bylo teoreticky možné sledovat a vyhodnocovat pomocí kamery na lokomotivě [5, 6], což je námět na další výzkum.

2.2 Algoritmus „Accelerating“

Aby bylo možné řídit podvozek i bez informace o aktuální prostorové poloze osy koleje, byl navržen druhý algoritmus, který pracuje s úhlovým zrychlením podvozku (relativně snadno měřitelná veličina). Algoritmus *Accelerating* je odvozen od algoritmu *Modifikovaný Groundhook* z oblasti automotive, jehož cílem je minimalizovat rozkmit svislých sil v kontaktu kolo/vozovka. Funkce tohoto algoritmu je popsána v [7], tamtéž je uvedeno ověření na reálném modelu automobilového podvozku. V rámci řešení tohoto výzkumu byl následně tento algoritmus upraven pro analogii minimalizace rozkmitu příčných sil v kontaktu kolo/kolejnice. Matematicky je tento princip vyjádřen rovnicí (2).



Obr. 1 Schéma úhlů použitých pro S/A řízení MR tlumičů
Fig. 1 Scheme of angles used for S/A control of the MR bogie yaw dampers



Obr. 2 MR tlumič na vozidle
Fig. 2 MR bogie yaw damper on the vehicle

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

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

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

3 MODEL ŽELEZNIČNÍHO VOZIDLA

Potenciál zvýšení kritické rychlosti vozidla použitím semiaktivně řízených tlumičů vrtivých pohybů podvozků byl vyšetřován v simulačním prostředí. Pro tyto účely byl využit programový systém SJKV (*Simulace jízdy kolejového vozidla*), který je vyvíjen na Dopravní fakultě Jana Pernera 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 o celkové hmotnosti 90 t s bezkolébkovými podvozky a s plně vypruženým trakčním pohonem. Model lokomotivy je tvořen celkem patnácti tuhými tělesy (dvojkolí, ložiskové skříně, rámy podvozků včetně trakčních motorů, skříň vozidla), vzájemně spolu vázaných příslušnými pružnými a tlumicími vazbami. Přehled základních parametrů modelu je uveden v **TAB. 1**. Struktura akademické verze systému je podrobněji popsána například v [8].

TAB. 1 Přehled základních parametrů vyšetřované čtyřnápravové elektrické lokomotivy
TABLE 1 Overview of basic parameters of the investigated four-axle electric locomotive

Parametr	Jednotka	Hodnota
vzdálenost otočných čepů (středů) podvozků E	[m]	8,70
rozvor podvozku B	[m]	2,50
jmenovitý průměr kol D_o	[m]	1,25
hmotnost dvojkolí (nevypružená hmotnost) M_d	[kg]	2 870
hmotnost podvozku (jedenkrát vypružená hmotnost) M_p	[kg]	10 265
hmotnost skříně vozidla (dvakrát vypružená hmotnost) M_s	[kg]	57 990
podélná tuhost vedení ložiskové skříně v rámu podvozku K_{1x}	[kN/mm]	88,8
příčná tuhost vedení ložiskové skříně v rámu podvozku K_{1y}	[kN/mm]	3,90
svislá tuhost primárního vypružení (pro jednu ložiskovou skříň) K_{1z}	[kN/mm]	2,42
příčná tuhost vazby skříně a podvozku K_{2y}	[kN/mm]	0,62
svislá tuhost vazby skříně a podvozku K_{2z}	[kN/mm]	2,08
úhlová tuhost vazby skříně a podvozku (odpor proti natáčení) γ	[kNm/rad]	1,156
konstanta tlumení svislého tlumiče primárního vypružení B_{1z}	[kNs/m]	40
konstanta tlumení svislého tlumiče sekundárního vypružení B_{2z}	[kNs/m]	80
konstanta tlumení příčného tlumiče sekundárního vypružení B_{2y}	[kNs/m]	60
počet tlumičů vrtivých pohybů podvozků na jednom podvozku N_{tvr}	[-]	2
příčná vzdálenost tlumičů vrtivých pohybů od podélné osy vozidla W_{st}	[m]	1,39

4 MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ VRTIVÝCH POHYBŮ A MODEL JEHO SILOVÉHO PŮSOBNÍ

Pro účinné řízení S/A tlumiče je důležitý jeho dynamický rozsah, tedy poměr tlumicí síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu [9], a časová odezva, tedy čas od změny řídicího signálu, za jaký tlumič dosáhne požadované tlumicí síly [10]. S malým dynamickým rozsahem a s dlouhou časovou odezvou účinnost použité S/A strategie klesá. V simulacích je proto vhodné, aby tyto dva parametry odpovídaly realitě. Proto byl matematický model silového působení MR tlumiče vytvořen podle existujícího tlumiče vrtivých pohybů podvozku, určeného pro podvozek moderní čtyřnápravové lokomotivy o hmotnosti 90 t (**obr. 2**). Tento tlumič byl vyvinut a vyroben firmou Strojírna Oslavany, spol. s r.o., ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně [11]. Pro tvorbu modelu bylo nutné naměřit F - v charakteristiky tlumiče a zmíněnou časovou odezvu.

4.1 F - v charakteristiky

F - v (*force-velocity*) charakteristikou se myslí závislost tlumicí síly tlumiče na okamžité pístové rychlosti pro daný elektrický proud procházející cívkou. Při navržených způsobech řízení bude tlumič fungovat v takzvaném on/off režimu, tedy bude přepínat mezi maximální a minimální tlumicí charakteristikou, tedy mezi proudem 0 A a 1,4 A. Naměřené F - v charakteristiky a charakteristiky zjednodušené pro potřeby simulace jsou zobrazeny na **obr. 3** vlevo.

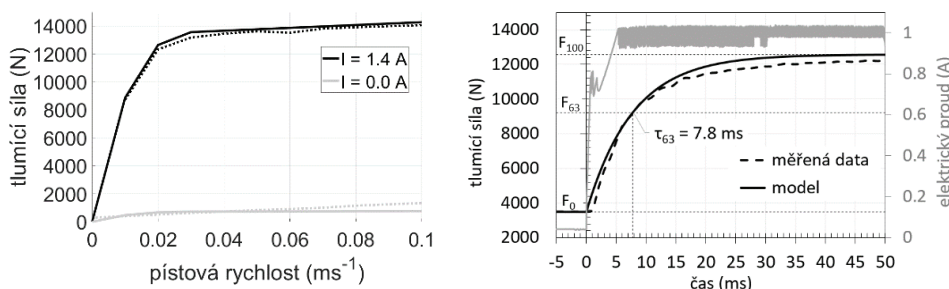
4.2 Tranzientní chování tlumiče

U reálného tlumiče existuje prodleva mezi nástupem proudu a nástupem tlumicí síly. Nárůst tlumicí síly v reakci na skokovou změnu proudu lze modelovat jako systém prvního řádu [9] dle rovnice:

$$F(v, t) = F_0(v) + (F_1(v) - F_0(v)) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{63}}}\right), \quad (3)$$

kde: $F_0(v)$ je tlumicí síla tlumiče v čase $t = 0$ s, $F_1(v)$ je požadovaná tlumicí síla a t je čas od změny požadavku.

Dále 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. V simulacích bylo tedy tranzientní chování tlumiče modelováno podle rovnice (3) s časovou odezvou 7,8 ms (**obr. 3** vpravo).



Obr. 3 F - v charakteristiky MR tlumiče (vlevo) – měřené (tečkovaná) a aproximované (plná); časové odezvy tlumiče (vpravo) – měřené (čárkovaná) a aproximované (plná)

Fig. 3 Force-velocity curves of MR damper (left) – measured (dotted line) and approximated (solid line); time response of the damper (right) – measured (dotted line) and approximated (solid line)

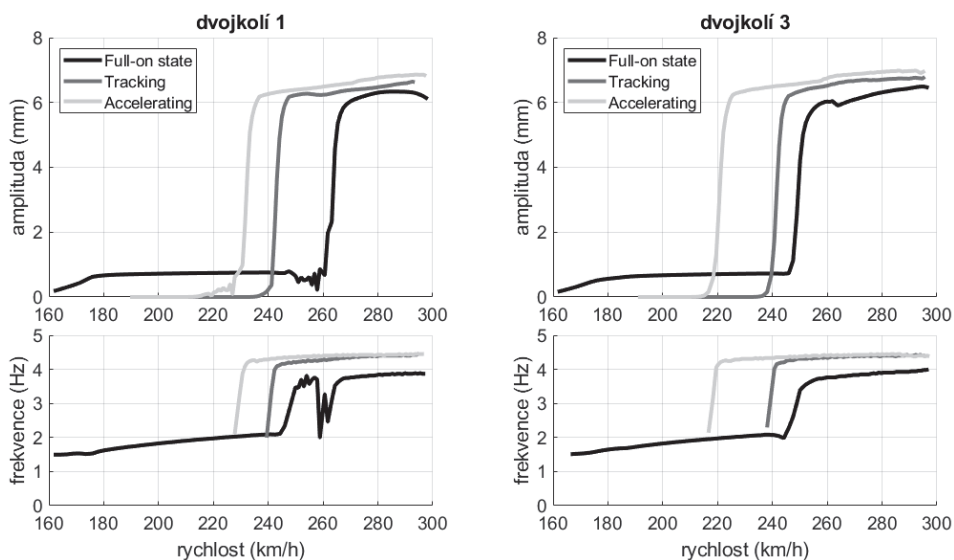
5 NASTAVEN I SIMULACE A METODA HODNOCEN I

Byla simulov ana j zda vyšetřovaného vozidla v ide ln i přim e koleji bez nerovnosti za podmínek vyšší  rovn e ekvivalentn i konicity ($\lambda_{eq} = 0,40$ pro smluvn i amplitudu přičn eho pohybu dvojkolí 3 mm) a suchý kolejníc ($f = 0,40$). Pří po ate n i rychlosti 500 km/h byl model vybuzen osamělou přičnou nerovností koleje o amplitudě 8 mm a n asledn e zpomalován se zrychlením $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ až na rychlost 50 km/h, a to zavedením síly působící na skříň vozidla. Pří simulaci byl sledován přičn y pohyb všech dvojkolí vozidla (amplituda a frekvence přičn eho pohybu). Rychlost, pří které nadm ern e přičn e kmitání všech dvojkolí ustalo, byla prohl asena za rychlost kritickou. Bližší informace o způsobech vyšetřování kritické rychlosti kolejového vozidla lze nalézt například v [12, 13].

Ze zkušenosti [9] plyne, že S/A řízení funguje nejl ep e se silou tlumiče v aktivovaném stavu, která odpovídá alespoň 1,5 násobku síly ideálního pasivního tlumiče. Z toho důvodu byl zkoumán vliv úrovně síly tlumiče na činnost tlumení algoritmů *Tracking* a *Accelerating* a rovněž pro *Full-on-state* režim (pasivní tlumení s konstantní F - v charakteristikou odpovídající konstantnímu proudu cívkou 1,4 A), a to pro 100, 150, 200, 250 a 300 % nominálních F - v charakteristik (v aktivovaném i deaktivovaném stavu). Tak e byl zkoumán vliv  asov e odezvy MR tlumiče, a to pro dva případy: $\tau_{63} = 0 \text{ ms}$ (pro zjištění potenciálního přínosu navržený algoritmů) a pro $\tau_{63} = 7,8 \text{ ms}$ (pro posouzení činnosti S/A tlumení s aktuálně dostupným reálným tlumičem).

6 VYŠLEDKY A DISKUZE

Obr. 4 ukazuje výsledky teoretické analýzy stability vozidla pří simulaci jízdy v ideální přim e koleji s klesající rychlostí. Uvedeny jsou výsledky pro *Full-on state* režim a oba navržené S/A algoritmy pří nominálních F - v charakteristikách tlumiče (100 %, viz též **obr. 3**) a s ideální časovou odezvou $\tau_{63} = 0 \text{ ms}$.



Obr. 4 Závislost amplitudy a frekvence přičn eho pohybu 1. a 3. dvojkolí na rychlosti pří analýze stability jízdy vozidla pro všechny uvažované tlumicí strategie ($\lambda_{eq} = 0,40$)

Fig. 4 Dependency of amplitude and frequency of lateral motion of the 1st and 3rd wheelset on vehicle speed at the stability analysis for all considered damping strategies ($\lambda_{eq} = 0.40$)

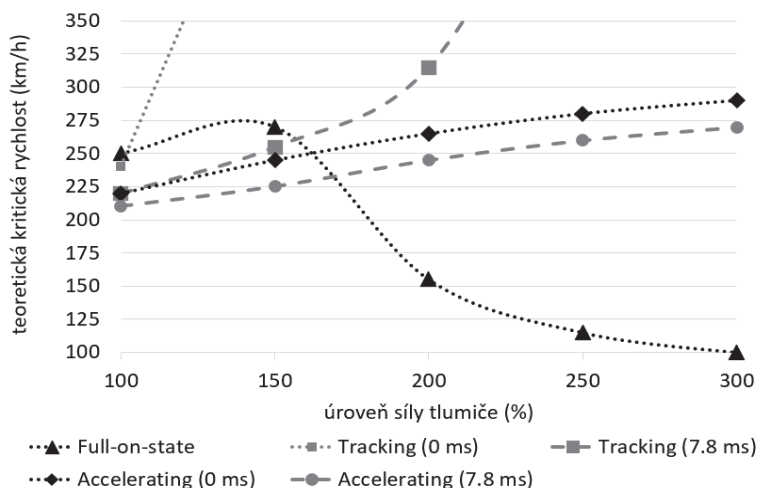
Je nutné konstatovat, že za uvažovaných podmínek zde nebylo pozorováno zvýšení kritické rychlosti vozidla pomocí aplikovaného S/A řízeného tlumení. Ve *Full-on-state* režimu vozidlo vykazuje kritickou rychlost přibližně 250 km/h, při aplikaci algoritmu *Tracking* je to cca 240 km/h a v případě algoritmu *Accelerating* 220 km/h. Ve všech případech je však kritická rychlost alespoň o 10 % vyšší než uvažovaná maximální rychlost vozidla (200 km/h).

Za povšimnutí však stojí, že vozidlo s pasivním tlumením vykazuje při podkritické rychlosti stabilní příčné kmitání dvojkolí o malé amplitudě a nižší frekvenci (zde však nejde o nestabilitu, neboť při pohybu dvojkolí nedochází k vyčerpání volného kanálu koleje). Oba uvažované S/A řídicí algoritmy toto kmitání plně eliminovaly.

Obr. 5 potom ukazuje závislost kritické rychlosti na úrovni tlumicí síly pro všechny tři strategie tlumení a pro časové odezvy 0 a 7,8 ms. V případě pasivního tlumení je možné zvýšit kritickou rychlost pouze o 20 km/h (na 270 km/h), a to při zvýšení úrovně síly tlumiče na 150 % nominální *F-v* charakteristiky. Při vyšších tlumicích silách vozidlo rychle ztrácí stabilitu a kritická rychlost klesá až k hodnotě 100 km/h.

Ovšem při použití algoritmu *Tracking* je možné zvýšit kritickou rychlost přes 300 km/h s tlumičem o dvojnásobné úrovni tlumicí síly oproti aktuálnímu tlumiči a s (reálně dostupnou) časovou odezvou 7,8 ms. Při úrovni tlumicí síly 250 % (nebo více) je potom kritická rychlost mimo vyšetřovaný rozsah, tedy vyšší než 500 km/h. Při teoretickém zkrácení časové odezvy tlumiče na 0 ms je kritické rychlosti vyšší než 500 km/h dosaženo již s tlumiči o úrovni tlumicí síly 150 % nominální charakteristiky.

V případě algoritmu *Accelerating* se kritická rychlost postupně zvyšuje s rostoucí úrovní tlumicí síly, ale nepřesahuje 300 km/h. Pro všechny vyšetřované úrovně tlumicí síly je však kritická rychlost vozidla vyšší než 210 km/h. Rozdíl mezi kritickou rychlostí stanovenou pro časovou odezvu 7,8 ms a pro hypotetickou nulovou časovou odezvu zde činí cca 20 km/h ve prospěch ideálního tlumiče s nulovou časovou odezvou.



Obr. 5 Závislost teoretické kritické rychlosti vozidla na úrovni tlumicí síly (vůči nominální *F-v* charakteristice tlumiče) pro všechny uvažované strategie řízení tlumičů a pro časové odezvy 0 ms a 7,8 ms ($\lambda_{eq} = 0,40$)

Fig. 5 Dependency of the theoretical critical speed on the damping force level (percentage of the nominal *F-v* curve) for all considered damping control strategies and for the time response of 0 ms and 7.8 ms ($\lambda_{eq} = 0.40$)

7 ZÁVĚR

Z uvedených výsledků vyplývá, že při použití S/A řízených magnetoreologických tlumičů vrtivých pohybů podvozků lze významně zlepšit stabilitu jízdy železničního vozidla, což vede ke zvýšení jeho kritické, a potenciálně tedy i maximální provozní rychlosti. Zatímco s pasivním tlumením lze v případě vyšetřovaného vozidla a uvažovaných podmínek zvýšit kritickou rychlost jen o 20 km/h zvýšením úrovně tlumicí síly (tj. jmenovité F -v charakteristiky) na 150 %, tak při použití S/A řídicího algoritmu *Tracking* a tlumičů s (teoretickou) časovou odezvou 0 ms a se stejnou úrovní tlumení lze kritickou rychlost hypoteticky zvýšit o 250 km/h. S tlumiči vykazujícími aktuálně dostupnou časovou odezvu 7,8 ms je potom možné zvýšit kritickou rychlost o 70 km/h při zvýšení úrovně tlumicí síly na 200 %.

Tyto skutečnosti budou užitečné především pro novou generaci vysokorychlostních vozidel, jež budou mít pojezd konstrukčně přizpůsobený vyšším silám generovaným tlumiči vrtivých pohybů. V případě aplikace technologie na současná vozidla by bylo nutné provést pevnostní analýzu uchycení tlumičů, a v případě nevyhovujících úchytných provést konstrukční úpravy pojezdu a skříně vozidla.

Efektivnější ze dvou navržených algoritmů (*Tracking*) vyžaduje jako vstupní veličinu dokonalou predikci polohy osy koleje. Druhý algoritmus (*Accelerating*) využívá snadno měřitelné veličiny, avšak dosahuje horších výsledků. Součástí budoucího výzkumu tedy bude dokonalá predikce polohy osy koleje. Úhel osy koleje vzhledem ke skříně by mělo být možné sledovat pomocí kamery, viz např. [5, 6]. Mimo to lze očekávat lepší výsledky, pokud by byl navržen pokročilejší algoritmus přepínající mezi aktivovaným a deaktivovaným stavem proporcionálně (tedy nikoliv pouze on/off).

Tento příspěvek se nezabývá chováním vozidla při průjezdu obloukem o malém poloměru, případně výhybkou. Předpokládá se, že tlumiče vrtivých pohybů podvozků mohou být v takové části trati (vyznačující se relativně nízkou traťovou rychlostí) přepnuty do deaktivovaného stavu ($I = 0$ A), což usnadní natáčení podvozku do oblouku, a tím sníží negativní příčné silové účinky mezi vozidlem a kolejí. A to i v případě, kdy budou použity tlumiče o vyšší úrovní tlumicí síly, než je úroveň nominální, protože síla v neaktivovaném stavu může být minimálně 10krát nižší než síla ve stavu aktivovaném.

Výzkum byl podporován Technologickou agenturou ČR a Ministerstvem dopravy ČR v rámci Programu DOPRAVA 2020+ (projekt CK04000210 „Semiaktivní systém tlumení pro jednopodlažní elektrickou jednotku“) a Vysokým učením technickým v rámci projektu FSI-S-23-8212.

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 0967-0661. [2] Goodall, R. M.: Control engineering challenges for railway trains of the future. *Measurement and Control*, 2011, **44**(1), 16–24, ISSN 0020-2940. [3] Spelta, C., Savaresi, S. M., Codeca, F., Montiglio, M., Ieluzzi M.: Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles. *Asian Journal of Control*, 2012, **14**(4), 875–890, ISSN 1561-8625. [4] Jeniš, F., Michálek, T., Mazúrek, I.: Benefit of a semi-actively controlled magnetorheological damper for a railway vehicle. In: *Proc. of the 25th conf. with int. participation Current Problems in Rail Vehicles 2021*, 85–92, ISBN 978-80-7560-377-7. [5] Banić, M., Miltenović, A., Pavlović M., Ćirić, I.: Intelligent machine vision based railway infrastructure inspection and monitoring using UAV. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2019, **17**(3), 357–364, ISSN 23350164. [6] Maire, F., Bigdeli, A.: Obstacle-free range determination for rail track maintenance vehicles. In: *11th Int. Conf. on Control*,

Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2010, 2172–2178. [7] Strecker, Z., Mazúrek, I., Roupec, J., Klapka, M.: Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica*, 2015, **50**(8), 1949–1959, ISSN 15729648. [8] Michálek, T., Zelenka, J., Fišr, Z.: Academic licence of software tools created for education in the field of railway vehicles at the University of Pardubice. In: *Proc. of the 25th conf. with int. participation Current Problems in Rail Vehicles 2021*, 207–217, ISBN 978-80-7560-377-7. [9] Macháček, O., Kubík, M., Strecker, Z., Roupec, I., Mazúrek, I.: Design of a frictionless magnetorheological damper with a high dynamic force range. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, **11**(3), 1–8, ISSN 16878140. [10] Strecker, Z., Roupec, J., Mazúrek, I., Macháček, O., Kubík, M.: Influence of response time of magneto-rheological valve in Skyhook controlled three-parameter damping system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, **10**(11), 1–8, ISSN 1687-8140. [11] Kubík, M., Strecker, Z., Jeniš, F., Macháček, O., Příkryl, 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*, 373–376, ISBN 9783800754540. [12] Polách, O.: On non-linear methods of bogie stability assessment using computer simulations. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2006, **220**(1), 13–27, ISSN 0954-4097. [13] Zelenka, J., Kohout, M., Michálek, T.: Application of sensitivity analysis in design of characteristics of damping joints in locomotive running gear. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, **20**(5), 369–377, ISSN 1805-4633.



Resumé

Kritickou rychlostí železničního vozidla nazýváme rychlost, při které pohyb jeho dvojkolí ztrácí stabilitu – dochází k nadměrnému rozvinutí samobuzeného příčného kmitání dvojkolí ve volném kanálu koleje s negativními důsledky na silové působení vozidla na kolej a jízdní komfort. V rámci jízdních zkoušek musí vozidlo prokázat stabilní chod při rychlosti alespoň o 10 % vyšší, než je maximální provozní rychlost daného vozidla. Tento příspěvek se zabývá vlivem semiaktivně řízených tlumičů vrtivých pohybů podvozků na stabilitu jízdy vozidla – je demonstrován potenciál zvýšení kritické, a tedy i provozní rychlosti vozidla. Vliv semiaktivního řízení tlumičů na stabilitu jízdy vozidla je zde zkoumán v simulačním prostředí na multi-body modelu moderní čtyřnápravové elektrické lokomotivy o hmotnosti 90 t. Výsledky simulačních výpočtů ukazují, že kritickou rychlost vyšetřovaného vozidla je teoreticky možné zvýšit až na 500 km/h, resp. o 250 km/h oproti pasivním tlumičům.

Summary

We call the critical speed of a railway vehicle the speed at which the movement of its wheelsets loses stability – it leads to excessive development of the self-excited lateral vibration of the wheelsets in the gauge clearance with negative consequences for the force of the vehicle on the track and ride comfort. As a part of the running tests, the vehicle must demonstrate a stable run at the speed at least by 10 % higher than the maximum operating speed of the vehicle. This paper deals with the effect of semi-actively controlled bogie yaw dampers on the vehicle running stability – the potential for increasing the critical, and thus also the maximum operating speed of the vehicle, is demonstrated. The influence of semi-active damper control on the vehicle running stability is investigated by simulations on a multi-body model of a modern four-axle electric locomotive with a total weight of 90 t. The simulation results show that the critical speed of the investigated vehicle can be theoretically increased up to 500 km/h, i.e. by 250 km/h compared to application of passive dampers.