

SNIŽOVÁNÍ VODICÍCH SIL V OBLoucÍCH TRATIPOMOCÍ AKTIVNÍHO NATÁČENÍ DVOJKOLÍ

REDUCTION OF GUIDING FORCES IN CURVES BY MEANS OF ACTIVE WHEELSET STEERING

Jan KALIVODA¹

Abstrakt

Článek na základě simulačních výpočtů porovnává efekt jednotlivých systémů pro snižování velikosti vodicích sil v obloucích koleje používaných u elektrických lokomotiv. Z tohoto srovnání vykazuje největší přínos aktivní natáčení náprav, které je v článku dále podrobněji zkoumáno z hlediska detekce poloměru oblouku trati, algoritmů řízení a citlivosti na proměnlivé parametry trati a rychlost jízdy vozidla. Navržený systém aktivního natáčení náprav je následně otestován pomocí simulace jízdy v reálném obloukovitém úseku trati o délce 21 km a výsledky jsou porovnány s vozidlem v konvenčním uspořádání.

Klíčová slova

elektrická lokomotiva, vodicí síly, aktivní natáčení dvojkolí, simulační výpočty

Abstract

Based on the computer simulations the potential effect of various systems for reduction of guiding forces in track curves for electric locomotives are compared. From this comparison, the greatest potential is shown by active wheelset steering, which is further examined in the article in terms of detecting the radius of the track curve, control algorithms and sensitivity to variable track parameters and vehicle speed. The proposed system of active wheelset steering is then tested by computer simulations of vehicle run in a real section of a track with a length of 21 km and the results are compared with a vehicle in a conventional arrangement.

Keywords

electric locomotive, guiding forces, active wheelset steering, computer simulations

1 ÚVOD

Silová interakce koleje a železničního dvojkolí je bezesporu jednou z nejdůležitějších otázek v rámci vývoje a kvalitativního hodnocení každého nového železničního vozidla. Povolena maxima sil, kterými působí kolo na kolejnici, jsou definována v příslušných normách a vycházejí z únosnosti železniční infrastruktury. Snaha budovat železnici ekonomickou i ekologickou přináší obecný a trvalý požadavek na snižování těchto sil co nejhluběji pod stanovené limity. Snižování sil v kontaktu kolo–kolejnice totiž přináší nejen snížení opotřebení vozidla i koleje, ale i řadu dalších benefitů, například snižování emisí hluku. Nejčastěji využívané metody snižování vodicích sil vozidla jsou zpravidla založeny na optimalizaci charakteristik vypružení [1], případně na mechanických nebo hydraulických vazbách mezi komponenty pojezdu vozidla [2]. Vzhledem k tomu, že se tyto přístupy dostávají stále

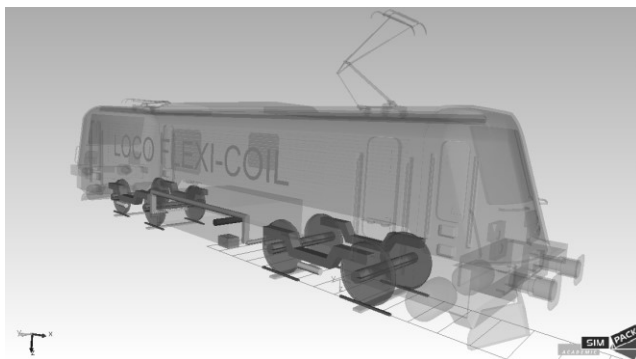
¹ Ing. Jan Kalivoda, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 160 00 Praha 6. Tel.: +420 224 352 493, e-mail: jan.kalivoda@fs.cvut.cz

častěji na hranice svých možností, objevují se myšlenky snižování vodicích sil pomocí aktivně řízených silových prvků v pojezdu [3] a to nejen v podobě teoretických studií a či experimentů [4] ale i v praktickém nasazení na běžně provozovaných vozidlech [5].

Existuje řada způsobů aplikace aktivně řízených silových prvků v pojezdu vozidla s cílem snížení velikosti vodicích sil v obloucích koleje. Ty se v principu liší umístěním aktuátorů, algoritmy řízení, množstvím vstupních veličin pro řídicí algoritmus i způsoby jejich získávání. Umístění aktivních silových prvků má rovněž úzkou vazbu zajištění bezpečnosti provozu v případě jejich poruchy. Například náhrada konvenčních tlumičů vrtivých pohybů podvozku aktivně řízenými představuje významně nižší rizika spojená s jejich poruchou v porovnání s umístěním aktivních prvků přímo ve vedení dvojkolí. Na otázkou je, zda jsou tato rizika vyvážena odpovídajícím přínosem z hlediska snížení velikosti vodicích sil se snaží odpovědět studie prezentovaná v tomto článku.

2 POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ PRO SNIŽOVÁNÍ VODICÍCH SIL

Pro porovnání přínosu jednotlivých systémů snižování vodicích sil byl vytvořen zjednodušený simulační model normálněrozchodné čtyřnápravové lokomotivy se sekundárním vypružením typu flexi-coil (obrázek 1). Model se skládá ze sedmi tuhých těles, které jsou vzájemně propojeny lineárními silovými prvky. Rozměry, hmotovými parametry i parametry silových prvků odpovídá model moderní lokomotivě s asynchronním pohonem dutou hřídelí. Kontakt kolo kolejnice respektuje křivkový profil kola S1002 a profil kolejnic UIC60 se sklonem 1:40. Pro výpočet tečných sil v kontaktu kolo–kolejnice je použita metoda FASTSIM.

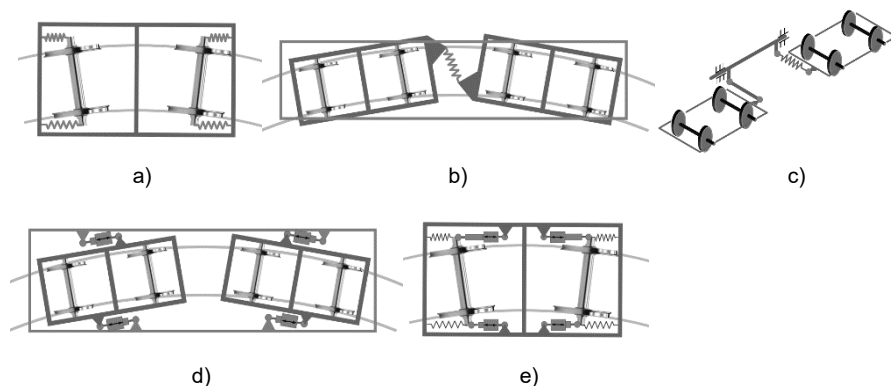


Obr. 1 Grafická reprezentace simulačního modelu čtyřnápravové elektrické lokomotivy

Model je možné konfigurovat do šesti základních uspořádání, které představují jednotlivé systémy pro snižování velikosti vodicích sil.

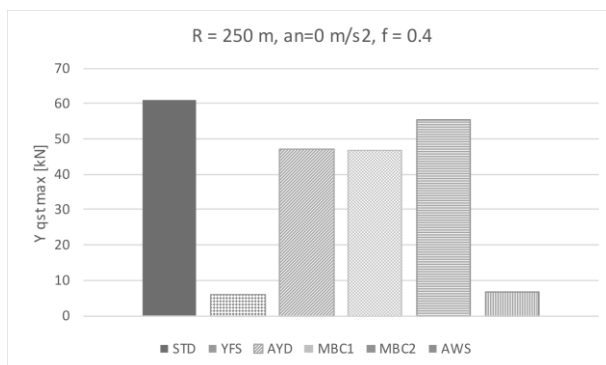
- STD – Standard. Parametry modelu odpovídají standardní čtyřnápravové lokomotivě.
- YFS – Yaw Flexible Suspension (obr. 2, a). Parametry primárního vypružení a vedení dvojkolí jsou modifikovány tak, aby bylo dosaženo snížení úhlové tuhosti spojení dvojkolí a rámu podvozku kolem osy z.
- MBC1 – Mechanical Bogies Connection Type 1 (obr. 2, b). Lokomotiva je vybavena přímou mechanickou mezipodvozkovou vazbou, která byla použita například u elektrických lokomotiv Škoda řady 140.
- MBC2 – Mechanical Bogies Connection Type 2 (obr. 2, c). Lokomotiva je vybavena mezipodvozkovou vazbou umožňující umístění transformátoru mezi podvozky. Ta byla použita například u elektrických lokomotiv Škoda druhé generace řady 363 a 163.
- AYD – Active Yaw Dampers (obr. 2, d). Lokomotiva je vybavena aktivními prvky nahrazujícími tlumiče vrtivých pohybů. Aktivní prvky tak vyvozují moment kolem osy z, který působí mezi skříní a rámy podvozku.

- AWS – Active Wheelset Steering (obr. 2, e). Lokomotiva je vybavena systémem aktivního natáčení dvojkolí kolem osy z vzhledem k rámu podvozku.



Obr. 2 Schematické zobrazení systémů pro snižování vodících sil

Pro jednotlivá uspořádání vozidla byly provedeny simulace jízdy obloukem o poloměru 250 m s převýšením kolejnic 150 mm. Simulace byly prováděny při uvažování součinitele tření v kontaktu kolo–kolejnice 0,4 a rychlosti jízdy 56,5 km/h, která odpovídá nulovému nedostatku převýšení kolejnic. Při těchto simulacích byly postupně měněny parametry jednotlivých systémů snižování vodících sil. U poddajného vedení dvojkolí (YFS) byla postupně měněna podélná tuhost vedení dvojkolí, u mechanických mezipodvozkových vazeb (MBC1 a MBC2) byla měněna tuhost pružného členu ve vazbě podvozků při zachování nezbytné vůle potřebné pro průjezd S-obloukem [6]. U aktivních tlumičů vrtivých pohybů (AYD) byla měněna síla v aktivních prvcích, kdy oba podvozky byly řízeny na stejnou velikost momentu. U aktivního natáčení dvojkolí byl měněn úhel mezi dvojkolími a rámem podvozku, všechna dvojkolí byla řízena na stejnou velikost úhlu, který se u jednotlivých dvojkolí lišil pouze orientací. Během simulací byla sledována kvazistatická hodnota vodících sil v oblouku konstantního poloměru na všech kolech vozidla a vyhodnocována maximální hodnota ze všech kol $Y_{qst,max}$. Cílem těchto simulací bylo nalézt takové nastavení každého z porovnávaných systémů, které přináší minimální hodnotu veličiny $Y_{qst,max}$ a tedy dává maximální možný přínos z hlediska minimalizace velikosti vodících sil. Obrázek 3 shrnuje výsledky těchto simulací. Je zřejmé že za daných podmínek lze s využitím AWS a YFS dosáhnout snížení maximální velikosti vodící síly řádově o 90 %. S využitím systémů MBC1 a AYD došlo k poklesu maximální hodnoty kvazistatické vodící síly v rozsahu 20 až 25 % a systém MBC2 dosáhl snížení přibližně 10 %.



Obr. 3 Maximální velikost kvazistatické hodnoty vodící síly v oblouku konstantního poloměru $R = 250$ m

Kvalitativně srovnatelných výsledků bylo dosaženo i při simulacích s nedostatkem či přebytkem převýšení kolejnic – viz tabulka 1.

Tab. 1 Velikost snížení maximální hodnoty kvazistatické vodící síly v oblouku $R = 250$ m

$\Delta Y_{\text{qstat,max}} [\%]$		YFS	MBC1	MBC2	AYD	AWS
$f = 0,4$	$a_n = 0 \text{ m/s}^2$	90,1	23,1	9,4	22,9	88,9
	$a_n = 1 \text{ m/s}^2$	74,1	21,8	5,4	35,2	71,8
	$a_n = -0,65 \text{ m/s}^2$	69,0	1,9	2,0	1,4	71,8

Je nezbytné podotknout, že k výraznému snížení vodících sil u systému YFS došlo až při velmi nízkých hodnotách podélné tuhosti vedení, které by v praxi nebyly realizovatelné vzhledem k velikosti přenášených tažných a brzdných sil a stabilitě vozidla. Z tohoto pohledu se tak jeví systém AWS jako velmi perspektivní s potenciálem dosáhnout výrazně lepších výsledků než ostatními posuzované systémy.

3 SYTÉM AKTIVNÍHO NATÁČENÍ DVOJKOLÍ

Myšlenka aktivního natáčení dvojkolí není zcela nová. Existuje řada různých algoritmů, které byly testovány převážně pomocí simulačních výpočtů [7,8] či ojedinělých experimentů. Pro tuto studii byla zvolena metoda přímého řízení, kdy jsou dvojkolí natáčena do žádané polohy vzhledem k rámu podvozku na základě známé hodnoty aktuálně projížděného oblouku trati. Výhodou této metody je nezávislost na znalosti proměnných a často obtížně měřitelných veličin, jako je tvar profilu kola či součinitel tření v kontaktu kolo kolejnice. Natáčení dvojkolí je realizováno pomocí lineárních aktuátorů umístěných v podélném směru mezi ložiskovými komorami a rámem podvozku. Pro aplikaci přímého řízení natáčení dvojkolí je třeba vyřešit dva principiální problémy:

- detekce poloměru oblouku trati,
- algoritmus řízení natáčení dvojkolí.

3.1 Detekce poloměru oblouku trati

Vstupem algoritmu řízení je hodnota aktuálního poloměru trati, kterou vozidlo projíždí. Z matematického hlediska je praktičtější pracovat s křivostí trati, tedy s převrácenou hodnotou poloměru. Principálně lze rozlišit dvě základní možnosti detekce křivosti trati:

- využití mapy trati a detekce polohy vozidla na trati,
- estimace křivosti trati na základě senzorů umístěných na vozidle.

Poloha vozidla na trati může být určena pomocí GPS zařízení, případně může být využito balíže zabezpečovacího systému ETCS. Obě možnosti je nezbytné doplnit dalším systémem, neboť je nezbytné znát polohu vozidla i v místech s nedostatečným GPS signálem (horská údolí, tunely, městská zástavba) nebo v místech mezi balízami. Doplnkový systém může vycházet např. z měření otočení kol, avšak takový typ detekce polohy je zatížen nezanedbatelnou chybou danou v čase proměnným průměrem kola a obtížně měřitelnou velikostí skluzů v kontaktu kolo–kolejnice. Další nevýhoda využití mapy trati pro detekci křivosti je v omezené flexibilitě systému v případě neplánovaných výluk, kdy vozidlo nemusí mít údaje o trati kterou projíždí k dispozici. Proto byla zvolena estimace křivosti trati na základě senzorického systému umístěného přímo na vozidle. Křivost trati je určována z úhlů natočení podvozků vzhledem ke skříní vozidla dle vztahu:

$$\rho = \frac{2 \sin \alpha}{u} \cong \frac{2\alpha}{u}, \quad (1)$$

kde ρ je křivost trati, u je vzdálenost otočných čepů vozidla a α je úhel natočení podvozku pod skříní. Úhly natočení podvozků jsou měřeny pomocí měření vysunutí tlumičů vrtivých pohybů.

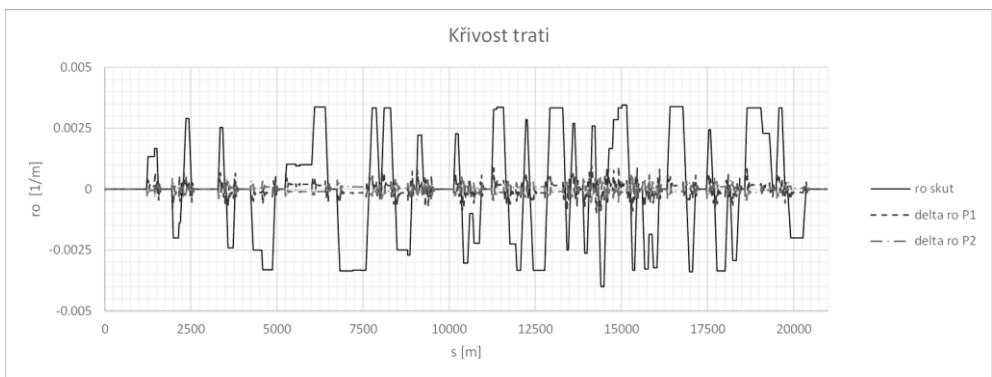
Přestože principálně je tento způsob detekce velmi jednoduchý, musela mu být věnována náležitá pozornost. Je třeba vzít v úvahu, že vzhledem k vůlím v kolejovém kanálu nabývají podvozky v koleji obecné polohy a úhly natočení prvního a druhého podvozku pod skříní se liší. To bylo zohledněno pomocí korekčních součinitelů, které byly určeny na základě simulace 21 různých situací vzhledem k poloměrům oblouku a rychlosti jízdy. Výpočty byly provedeny za předpokladu nominálních geometrických parametrů dvojkolí a trati. Chyba estimace křivosti trati touto metodou v různých obloucích konstantního poloměru je shrnuta v tabulce 2. Způsob estimace poloměru trati je podrobněji popsán v [9].

Tab. 2 Parametry simulovaných manévřů a odchylka měřené a skutečné křivosti trati. ro ... křivost trati, index P1, P2 ... první, druhý podvozek vozidla

Manévr No	R	$p_{\pm}$	a_n	v	ro	ro měř P1	ro měř P2	ro err P1	ro err P2	ro err P1	ro err P2
[–]	[m]	[mm]	[m/s ²]	[km/h]	[1/m]	[1/m]	[1/m]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	250	150	0	56.52	4.00E-03	3.86E-03	4.06E-03	-1.45	0.72	-3.60	1.47
2	300	150	0	61.91	3.33E-03	3.27E-03	3.39E-03	-0.87	1.46	-1.98	1.77
3	400	150	0	71.49	2.50E-03	2.52E-03	2.52E-03	-0.17	1.37	0.81	0.77
4	500	150	0	79.93	2.00E-03	2.05E-03	2.00E-03	-0.47	1.46	2.69	-0.05
5	600	150	0	87.56	1.67E-03	1.74E-03	1.65E-03	-1.14	1.54	4.23	-0.88
6	800	150	0	101.11	1.25E-03	1.34E-03	1.22E-03	-2.94	1.81	6.88	-2.43
7	1000	150	0	113.04	1.00E-03	1.09E-03	9.61E-04	-5.08	2.15	9.21	-3.91
8	250	150	1	80.22	4.00E-03	4.16E-03	3.88E-03	6.86	-3.71	4.07	-3.09
9	300	150	1	87.87	3.33E-03	3.52E-03	3.22E-03	7.44	-3.50	5.68	-3.33
10	400	150	1	101.46	2.50E-03	2.73E-03	2.39E-03	8.77	-3.62	9.07	-4.38
11	500	150	1	113.44	2.00E-03	2.25E-03	1.87E-03	10.27	-4.69	12.61	-6.39
12	600	150	1	124.27	1.67E-03	1.94E-03	1.53E-03	11.79	-5.77	16.17	-8.42
13	800	150	1	143.49	1.25E-03	1.54E-03	1.09E-03	14.64	-7.95	23.11	-12.49
14	1000	150	1	160.43	1.00E-03	1.30E-03	8.34E-04	17.43	-10.16	30.00	-16.59
15	250	150	-0.65	32.99	4.00E-03	3.67E-03	4.14E-03	-6.47	2.66	-8.24	3.46
16	300	150	-0.65	36.14	3.33E-03	3.10E-03	3.48E-03	-6.33	4.12	-7.03	4.51
17	400	150	-0.65	41.73	2.50E-03	2.34E-03	2.62E-03	-8.03	5.29	-6.44	4.80
18	500	150	-0.65	46.66	2.00E-03	1.91E-03	2.09E-03	-8.35	5.67	-4.58	4.28
19	600	150	-0.65	51.11	1.67E-03	1.61E-03	1.73E-03	-9.57	6.24	-3.56	3.96
20	800	150	-0.65	59.02	1.25E-03	1.22E-03	1.30E-03	-13.37	7.83	-2.76	3.77
21	1000	150	-0.65	65.98	1.00E-03	9.75E-04	1.04E-03	-17.78	9.50	-2.52	3.67

V přechodnicových úsecích trati dochází ke zpoždění detekované křivosti za skutečnou, a dále může být detekce úhlu natočení podvozku pod skříní z vysunutí tlumičů vrtění zkreslena pohyby ve vypružení vozidla. Všechny tyto vlivy snižují přesnost detekce poloměru oblouku trati.

Proto byl systém detekce křivosti trati byl následně testován pomocí simulace jízdy vozidla po reálném úseku trati Letohrad–Lichkov délky 21 km včetně uvažování nerovností trati. Výsledky jsou zobrazeny na obrázcích 4 a 5.



Obr. 4 Průběh skutečné křivosti trati „ro skut“ a odchylka skutečné hodnoty a hodnoty měřené na prvním „delta ro P1“ a druhém podvozku vozidla „delta ro P2“



Obr. 5 Odchylka měřené a skutečné hodnoty křivosti trati vyjádřená v %

Tyto simulace potvrdily, že chyba estimace křivosti trati je v obloucích konstantního poloměru velmi nízká a pohybuje se v řádu očekávaných nízkých jednotek procent. Nepoměrně vyšší procentuální chyby dosahují peaky, které se objevují v místech počátků přechodnic. To je způsobeno především dvěma vlivy:

1. Z principu vykazuje navrhovaný systém detekce křivosti v přechodnici určité zpoždění. Tuto vlastnost lze do určité míry eliminovat sofistikovanějšími algoritmy výpočtu křivosti koleje z natočení podvozku [9,10],
2. Peaky se vyskytují v místech s malou křivostí koleje, a proto má i relativně malá absolutní chyba měřené veličiny poměrně velký procentní podíl.

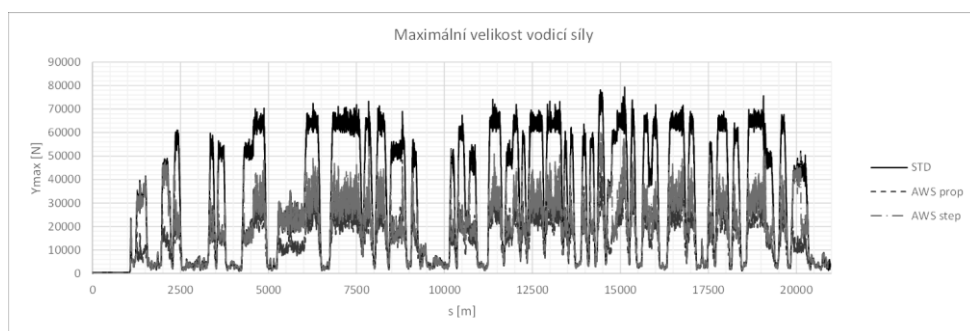
Přes tyto nedostatky byly výsledky estimace křivosti trati shledány jako uspokojivé z hlediska jejich využití pro řízení aktivního natáčení dvojkolí.

3.2 Algoritmus natáčení dvojkolí

Algoritmy natáčení dvojkolí nabízí značné množství různých variant. Z hlediska jednoduchosti a technické realizovatelnosti se při sestavování algoritmu natáčení dvojkolí vyšlo z předpokladu, že každý podvozek bude vybaven autonomním systémem detekce křivosti trati a kontrolérem který bude ovládat aktuátory natáčení dvojkolí. Obě dvojkolí v podvozku budou řízena na shodný úhel opačné orientace. Simulační výpočty potvrdily obecně známý fakt, že minima vodicích sil je dosaženo v případě, kdy dvojkolí projíždí oblouk v radiální poloze. První uvažovaný systém řízení natáčení dvojkolí předpokládá spojitě proporcionální řízení tak, aby se dvojkolí natočila do radiální polohy. Jako druhý způsob bylo zvoleno třípolohové řízení, které uvažuje pouze 3 pozice akruátoru (plně zarejdrováno jedním směrem, plně zarejdrováno druhým směrem, nezarejdrováno). Tento způsob řízení je nepochybně určitým kompromisem z hlediska snížení vodicích sil, avšak nabízí jednodušší aktuátor bez nutnosti přesného odměřování polohy. Pro třípolohové řízení bylo nezbytné stanovit velikost úhlu natočení dvojkolí v zarejdrované poloze. Tento úhel byl stanoven na základě provedení 231 simulačních výpočtů při kterých byl pro 21 manévrů uvedených v tabulce 2 měněn úhel natočení dvojkolí a vyhodnocována kvazistatická hodnota vodicích sil. Byla hledána taková hodnota úhlu natočení dvojkolí, aby v obloucích o poloměru 600 m a menším docházelo k efektivnímu snížení vodicích sil. Stanovená poloha dvojkolí v zarejdrované poloze je kompromisem, který nevede ke zvýšení vodicích sil v obloucích středních poloměrů vlivem přerejdrování a zároveň je dostatečně účinný v obloucích velmi malých poloměrů. Na základě provedených simulačních výpočtů byl pro třípolohovou regulaci zvolen úhel natočení dvojkolí $0,2^\circ$, který odpovídá vzájemnému podélnému posunutí ložiskových komor o 7 mm.

3.3 Simulační výpočty vozidla s aktivním natáčením dvojkolí

Oba způsoby řízení natáčení dvojkolí byly implementovány do zjednodušeného simulačního modelu elektrické lokomotivy. Aby se zabránilo nežádoucím odezvám systému na geometrické nerovnosti v přímé trati, případně opakovanému zarejdovávání a zpětnému pohybu dvojkolí v oblouku hraniční křivosti pro třípolohovou regulaci, byl systém řízení doplněn určitou hysterezí. Proporcionální řízení se aktivuje až v okamžiku, kdy křivost koleje překročí křivost odpovídající oblouku $R = 800$ m a deaktivuje se, pokud křivost poklesne pod křivost oblouku koleje $R = 2000$ m. Třípolohový systém natáčení je aktivován v oblouku o poloměru $R = 500$ m a deaktivován v oblouku $R = 700$ m. Vlastní dynamika aktuátoru byla zjednodušeně modelována přenosovou funkcí prvního řádu. Simulace byly opět realizovány na úseku trati Letohrad–Lichkov s respektováním nerovností trati. Výsledky těchto simulací jsou zobrazeny na obrázcích 6 a 7. Zde jsou zobrazeny průběhy maximální hodnoty vodící síly ze všech kol lokomotivy v závislosti na poloze vozidla na trati. „STD“ označuje model lokomotivy bez aktivního natáčení náprav, „AWS prop“ s proporcionálním a „AWS step“ s třípolohovým aktivním natáčením náprav.



Obr. 6 Průběh maximální hodnoty vodící síly po délce trati



Obr. 7 Odchylka maximální hodnoty vodící síly AWS systémů od standardního vozidla

Výsledky simulací potvrdily významný přínos aktivního natáčení dvojkolí na snižování vodících sil u obou systému řízení. Průměrná hodnota maximální vodící síly po celé délce trati byla pro STD lokomotivu 32,6 kN, zatímco u AWS proporcionálního řízení 13,9 kN a AWS třípolohového řízení 18,6 kN. To představuje průměrný pokles maximální hodnoty vodící síly o 57,4 % pro AWS proporcionální a o 42,8 % pro AWS třípolohové řízení. Ještě výraznější je tento pokles v obloucích velmi malých poloměrů, kde je zároveň dosahováno nejvyšších hodnot vodících sil. Pozitivním výsledkem simulací je také zjištění, že u navržených způsobů aktivního natáčení náprav dochází pouze velmi ojediněle ke zvýšení velikosti vodících sil oproti vozidlu bez aktivního natáčení. Jedná se o krátkodobé peaky o velikosti jednotek kN, typicky při výjezdu vozidla z přechodnice do přímého úseku trati.

4 ZÁVĚR

Z provedených simulačních výpočtů vyplývá, že aktivním natáčením dvojkolí lze dosáhnout velmi významného snížení vodících sil. Pro přímé řízení natočení dvojkolí je nezbytné poskytnout řídicímu systému informaci o aktuální křivosti trati. Tu lze s dostatečnou přesností možné určit z odměřování zdvihu tlumičů vrtivých pohybů. Byly navrženy dva algoritmy řízení natáčení dvojkolí proporcionální a třípolohový. Oba způsoby vykazují výrazný přínos z hlediska snížení velikosti vodících sil. Z provedených simulací vyplývá, že aktivní natáčení dvojkolí je v principu technicky realizovatelný způsob snižování silových účinků mezi vozidlem a tratí s velkým potencionálním přínosem. V dalších krocích bude zpřesněn simulační model na straně vozidla i aktuátorů a řešeny problematické manévry, např. průjezd výhybkou, a citlivost systému na proměnlivé parametry vozidla i trati. Značná pozornost musí být rovněž věnována spolehlivosti a bezpečnosti a řešení poruchových stavů systému.

Výzkum byl realizován za podpory Technologické agentury České republiky, projekt TN01000026 Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky.



Literatura

- [1] KLIMENKO, I., KALIVODA, J., NEDUZHA, L. Parameter optimization of the locomotive running gear. In: *Transport Means: Proceedings of the 22nd International Scientific Conference*. October 03 – 05, 2018, Trakai, Lithuania. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018, 1095–1098. ISSN 1822-296 X.
- [2] SHIMOKAWA, Y., MIZUNO, M. *Development of the New Concept Steering Bogie* [online]. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 105 December 2013, 41–47 [cit. 16. 06. 2021]. Dostupné z: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/105-08.pdf>
- [3] FU, B. et al, Active suspension in railway vehicles: a literature survey. *Railway Engineering Science*. 2020, **28**, 3–35. ISSN 2662-4745. DOI: 10.1007/s40534-020-00207-w
- [4] HUR, H., SHIN, Y., AHN, D. Analysis on Steering Performance of Active Steering Bogie According to Steering Angle Control on Curved Section. *Applied Sciences*. 2020, **10**(12). DOI:10.3390/app10124407
- [5] Liebherr to supply active yaw damper systems for Vectron locomotives. In: Liebherr [online]. 29. 03. 2017 [cit. 02. 04. 2020]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/usa/latest-news/news-press-releases/detail/liebherr-to-supply-active-yaw-damper-systems-for-vectron-locomotives-news.html>
- [6] KRULICH, P. *Optimalizace dynamických účinků vysokorychlostní elektrické lokomotivy s mezipodvozkovou vazbou*. 2001. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [7] PEREZ, 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.
- [8] SHEN, S. et al. A study of active steering strategies for railway bogie. *Vehicle System Dynamics*. 2004, 41(supplement), 282–291. ISSN: 0042-3114.
- [9] KALIVODA, J. *Simulation of Active Wheelset Steering for an Electric Locomotive*. Bydgoszcz–Tleń/Osie: XXV Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations, 08.–11. 09. 2020.
- [10] TIAN, S., LUO, X., REN, L., XIAO, C. Active radial system of railway vehicles based on secondary suspension rotation angle sensing. *Vehicle System Dynamics*. 2021, **59**(5), 765–784. DOI: 10.1080/00423114.2020.1722183