



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

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.44>

SNÍŽENÍ OPOTŘEBENÍ KOL A KOLEJNIC POMOCÍ AKTIVNÍHO VEDENÍ DVOJKOLÍ U ČLÁNKOVÉ TRAMVAJE

REDUCING WHEEL AND RAIL WEAR WITH ACTIVE WHEELSET STEERING ON ARTICULATED TRAMS

Jan VRBA^{*)}

1 ÚVOD

Městské tramvajové tratě vedoucí zejména centry měst jsou často z historických důvodů tvořeny směrovými oblouky s velmi malými poloměry (méně než 25 metrů). Oblouky s ještě menšími poloměry (okolo 15 metrů) lze často nalézt také v depech. Při průjezdu vozidla oblouky s takto malými poloměry dochází k vyčerpání příčných vůlí dvojkolí v koleji a ke vzniku velkých skluzových sil v kontaktu kola a kolejnice. Tyto podélné a příčné síly vedou k nežádoucím jevům v podobě vysokého opotřebení kol a kolejnic a emisím hluku a vibrací. Opotřebení kol a kolejnic má za následek velké náklady jak pro správce infrastruktury, tak provozovatele vozidel. Reprofilace kol, kterou je nutné pravidelně provádět kvůli opotřebení jejich jízdního profilu, a následná výměna obručí kol jsou největším nákladem při údržbě tramvajových vozidel a zásadně se tak podílí na servisní složce nákladů životního cyklu vozidla.

Tratě s oblouky o velmi malých poloměrech také limitují nasazení určitých koncepcí moderních vozidel na tyto tratě, zejména pak článkových tramvají s neotočnými podvozky. Článkové tramvaje s neotočnými podvozky přitom mají mnoho výhod oproti koncepcím s podvozky otočnými, jako je nižší cena, vyšší přepravní kapacita, prostornější interiér nad podvozky či lepší dynamické chování při vyšších rychlostech. Pokud by bylo možné redukovat jejich zásadní nevýhodu, kterou je vyšší opotřebení kol a kolejnic při průjezdu oblouky, lze předpokládat snížení nákladů na tramvajovou dopravu a zvýšení komfortu pro cestující.

Zlepšení průjezdu tramvaje i kolejových vozidel obecně směrovými oblouky malých poloměrů je věnována po dlouhá desetiletí velká pozornost výzkumníků i projektantů vozidel po celém světě. Zatímco v minulosti byla pozornost věnována zejména úpravám čistě mechanickým, v dnešní době se pozornost obrací k aktivně řízeným prvkům v pojezdu kolejového vozidla, pomocí kterých můžeme příznivě ovlivnit jeho interakci s tratí.

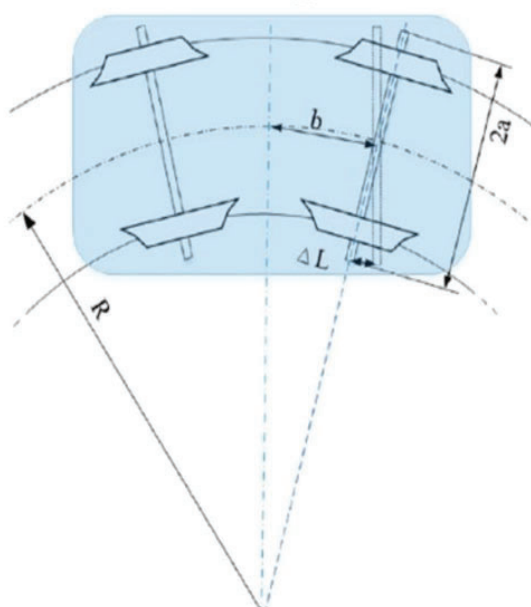
V posledních letech došlo k představení několika zajímavých nových technologií využití aktivních prvků pro natáčení dvojkolí do oblouku. Za zmínku stojí zejména systém LiCAS společnosti Liebherr, který pomocí aktuátoru umístěného v kloubu kyvného ramena vedoucího dvojkolí a rámu podvozku natáčí dvojkolí do oblouku [1,2]. Dle dostupných informací je tento systém, i většina dalších výzkumů, však orientována na klasickou železnici. Výjimku tvoří například výzkum v oblasti aktivního natáčení dvojkolí tramvaje

^{*)} **Ing. Jan VRBA**, doktorand ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 160 00 Praha 6., e-mail: vrba@fs.cvut.cz, (školiitel doc. Ing. Josef Kolář, CSc.).

společnosti Hyundai Rotem či švýcarský start-up Traila [3] se svou koncepcí aktivně vedeného jednonápravového tramvajového podvozku. [4]

Potenciál aplikace technologie aktivního vedení dvojkolí na tramvajová vozidla je však dle názoru autora značný vzhledem k malým poloměrům směrových oblouků, dále jen oblouků, které vozidla musejí často projíždět, i vzhledem k provedení velkého množství tramvají s neotočnými podvozky. Lze se také domnívat, že vzhledem k velkému pokroku v technologiích směřujících k autonomnímu provozu tramvají, jako je například antikolizní systém či využití digitálního dvočete vozidla, bude možné redukovat prozatím trvající obavy o bezpečnost, robustnost či cenu technologie aktivního vedení dvojkolí.

2 KONCEPT PROVOZU



Obr. 1 Výpočet výsunu aktuátoru při průjezdu obloukem [5]

Fig. 1 Calculation of the actuator stroke when passing through a curve [5]

Pro aktivní natáčení dvojkolí tramvaje je uvažováno s dopředným řízením aktuátorů v podvozku vozidla. Jako vstupní veličiny algoritmu řídicího výsunu aktuátorů slouží poloměr oblouku R a rychlost vozidla. Natočení dvojkolí do oblouku je dáno výsunem aktuátoru, který je na základě poloměru oblouku určován dle vzorce (1), ve kterém $2b$ značí rozvor podvozku a $2a$ představuje příčnou vzdálenost aktuátorů natáčejících dvojkolí, viz **obr. 1**.

$$\Delta L = \frac{a \cdot b}{R} \quad (1)$$

Rychlost vozidla je s dostatečnou přesností měřena již na dnešních vozidlech. Poloměr oblouku je pak na základě polohy vozidla na trati získáván z databáze trati, která je nahrána ve vozidle. Databáze trati obsahuje informace o jednotlivých úsecích projížděné trati a může být získána například speciálním měřicím zařízením, kterým je trať projeta, a naměřená data jsou následně zpracována do databáze a nahrána do vozidla.

Poloměr oblouku je tedy získáván na základě lokalizace vozidla na trati. Dostatečně přesné určení polohy vozidla na trati v městském prostředí může být problematická, nicméně lze předpokládat, že v dnešní době již technologie pokročila dostatečně k dosažení potřebných přesností. Využito může být například určování polohy na základě high definition (HD) map v kombinaci s globálním navigačním satelitním systémem (GNSS) a odometrií. Tyto zdroje mohou být pak pro dosažení vyšší přesnosti a robustnosti lokalizace kombinovány přes Kalmanův filtr. Jinou možností může být například využití odometrie a technologie radiofrekvenční identifikace (RFID). [6]

Vzhledem k bezpečnostním rizikům a rizikům zvýšeného opotřebení kol a kolejnic v případě špatné hodnoty vstupní veličiny (poloměru oblouku) do algoritmu řídicího natáčení dvojkolí je vhodné tuto veličinu ověřit z více nezávislých zdrojů. Tento přístup je dlouhodobě aplikován například v leteckém průmyslu. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodné, aby poloměr

nadcházejícího oblouku byl ov erov an pomocí senzoriiky na čele vozidla (LiDAR, kamera). R idic i systém bude schopný z dat ziskanych ze senzoriiky na čele vozidla detekovat kolejnicové pásy a vypo itat poloměr oblouku. Tato technologie je dostupná j i  v dnešní době [7]. Takto ziskany poloměr oblouku bude tedy porovnan s hodnotou v databázi trati, a pokud se hodnoty výrazněji nebudou shodovat, nedojde k natočení aktuátoru a vozidlo projede u sek sni enou rychlostí s aktu ator y v nominální poloze. Lze predpokladat,  e výše zmíněné senzory na čele vozidla budou na vozidle umístěny primárně za jiným u elem (např. antikorozní systém) a nedojde tak ke zvy sen i ceny systému aktivního natáčení.

3 MBS VÝPOČET

Pro validaci navrženého konceptu aktivního natáčení byl v programu Simpack vytvořen model článkové tramvaje s neotočnými podvozky s aktivním vedením dvojkolí, který byl propojen s modelem r izen i aktuátorů v programu Matlab Simulink. Tyto dva programy si tak v každém časovém kroku simulace pred avaj i potřebné informace. Z programu Simpack je v každém časovém kroku pred avana informace o poloze vozidla na trati a rychlosti vozidla, z programu Simulink je pak pred avana do programu Simpack hodnota natočení aktuátoru. Princip kosimulace zobrazuje **obr. 2**.



Obr. 2 Princip kosimulace vyu it e k MBS výpočtům

Fig. 2 The principle of cosimulation used for MBS calculations [8]

Pro vyhodnocení vlivu aktivního natáčení bylo využito indexu opotřebení, který je definován dle (2).

$$W = T_x \cdot v_x + T_y \cdot v_y + M_z \cdot \varphi_z, \quad (2)$$

kde T_x je podélná skluzová síla, T_y je p r i n a skluzová síla, v_x je podélný poměrný skluz, v_y je p r i n y poměrný skluz, M_z spinový moment a φ_z poměrný spin, který je u kuželového profilu kola roven úhlu natočení kola kolem osy z. Jednotkou  isla opotřebení je Newton. Při integraci indexu opotřebení po délce tratě lze dostat energii disipovanou v kontaktu kolo-kolejnice.

3.1 Model vozidla

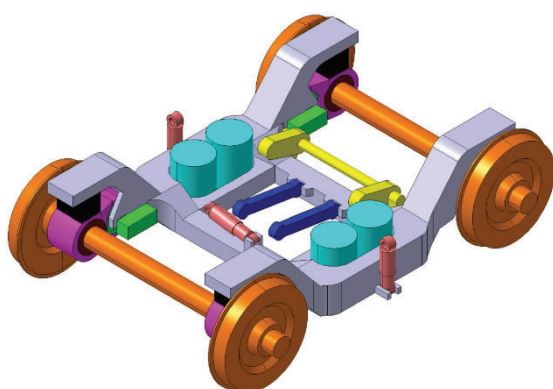
Pro vývoj systému aktivního natáčení bylo vybráno vozidlo koncepce „multigelenk“ tedy vozidlo s pěti články a třemi neotočnými podvozky. Takováto koncepce tramvaje odpovídá jednozna n e nej ast ej simu re e en i moderních článkových nízkopodlažních tramvají ve světě. Toto re e en i tramvaje se také jeví jako nejv yhodn ej si pro aplikaci technologie aktivního natáčení, jelikož radiální stavění dvojkolí do oblouku může v yrazn e zlepšit problémy tohoto vozidla při průjezdu oblouky malých poloměrů, jako jsou velké p r i n e síly v kontaktu kolo-kolejnice  i emise hluku a vibrací. Naopak výhody vozidla, kterými jsou zejména vysoká kapacita,  ir si ulička nad podvozky, ni  si cena oproti vozidlům s otočnými podvozky zůstanou zachovány.

Základní parametry tramvaje pro vytvoření multi-body dynamics simulation (MBS) modelu vozidla na **obr. 3** jsou shrnuty v **TAB 1**. Parametry tramvaje byly určeny na základě základních koncepčních výpočtů, zkušeností autora a z veřejně dostupných zdrojů [9].

TAB. 1 Základní parametry MBS modelu vozidla

TABLE 1 Basic parameters of the MBS vehicle model

Hmotnost vozidla (ELE / EL4)	44,8 / 56,8 t	Podélná a vertikální tuhost silentbloku kyv. ramene	25 kN/mm
Vertikální tuhost pružiny sekundárního vypružení	500 N/mm	Příčná tuhost silentbloku kyvného ramene	5 kN/mm
Příčná a podélná tuhost pružiny sek. vypruž.	300 N/mm	Torzní tuhost silentbloku kyvného ramene	60 Nm/deg
Příčné a podélné tlumení sekundárního vypružení	29 000 Ns/mm	Tlumení pružiny primárního vypružení	5000 Ns/m
Celková torzní tuhost torzního stabilizátoru	600 kNm/rad	Příčné tlumení pružiny primárního vypružení	300 Ns/mm
Vertikální tuhost pružiny primárního vypružení	2 200 N/mm	Podélné tlumení pružiny prim. vypružení	600 Ns/mm
Podélná tuhost pružiny primárního vypružení	200 N/mm	Rozvor podvozku (2b dle Obr. 1)	1 800 mm
Příčná tuhost pružiny primárního vypružení	60 N/mm	Příčná báze umístění aktuátorů (2a dle Obr. 1)	1 170 mm



Obr. 3 Zjednodušený model podvozku pro MBS výpočty

Fig. 3 Simplified bogie model for MBS calculations

Podvozek je řešen jako neotočný, s vedením dvojkolí pomocí kyvného ramene. Aktuátor aktivně natáčející dvojkolí do oblouku je umístěn v kloubu spojujícím kyvné rameno s rámem podvozku. Toto řešení umístění a technického řešení aktivního silentbloku představila v nedávné době firma Liebherr ve svém systému aktivního natáčení LiCAS [1,2]. Primární vypružení je uvažováno pomocí pryžokovových pružin. Základní parametry vypružení jednotlivých částí podvozku jsou shrnuty v **TAB. 1**. Rychlost výsuvu aktuátoru je uvažována 7 mm/s dle [2]. Model aktuátoru nebyl pro dále představené simulace více

rozpracován a bude zpřesňován v dalších fázích výzkumu. Maximální hodnota výsuvu aktuátoru nebyla omezena.

3.2 Model trati

Aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího odladění a nastavení algoritmu řídicího aktivní prvky v pojezdu tramvaje byla pro dynamické simulace vytvořena mapa trati, která svým profilem odpovídá reálné tramvajové trati. Jako vhodná trať pro zkoušení algoritmu aktivního natáčení byla zvolena pražská tramvajová trať Václavské náměstí – Národní Divadlo – Újezd - Sídliště Řepy. Tuto trať lze považovat za reprezentanta klasické tramvajové trati, která vede z periferie do centra města, a je na ní velká přepravní poptávka.

Valná v ešina trati je tvořená pr ımými úseky  i úseky s velkými poloměry oblouku, nicméně zejména v centru města se na trati nachází oblouky s velmi malými poloměry (R20). Právě pro takovou trať se jeví jako vhodné použití vozidla zvolené koncepce „multigelenk“ v p ıpad e, že by takové vozidlo bylo schopno projíždět oblouky s malými poloměry bez zvyšen eho opotřebení kol a kolejnic. Horizontální i vertikální profil trati byl v SW Simpack vytvořen na základě výkresů trati zisk an ych od Dopravního podniku hl. města Prahy (DPP). Délka úseku převedeného do programu Simpack je 10 641 metrů. Horizontální profil trati z hlediska délky oblouků různých poloměrů a k nim p ıslušn ych přechodnic zobrazuje **TAB. 2**.

TAB. 2 Horizontální profil trati – zastoupení oblouků a přechodnic

TABLE 2 Horizontal profile of the line - distribution of curves and transitions

Interval poloměrů [m]	Délka oblouků [m]	Délka přechodnic [m]
R20 – R30	103	0
R30 – R50	67	30
R50 – R80	183	53
R80 – R150	318	188
R150 – R300	798	363
R300 - R600	1227	252
R600 - R1000	331	92
> R1000	590	11
P�ırn�a trať	6035	

3.3 Okrajov e podmínky MBS simulací

Simulace p rıjezdu vozidla zkušební trati  i jednotlivými oblouky byly v ždy provedeny vícekrát za různých okrajových podmínek výpočtu, aby bylo možné urc ıt jejich vliv na snížení opotřebení kol pí porovnání pasivního a aktivního vedení dvojkolí. Simulace jízdy vozidla daním úsekem tak byla provedena v ždy celkem 16 krát. Simulován byl p rıjezd vozidla úsekem za r uzn e kombinace okrajových podmínek jak pí pasivním tak aktivním vedením dvojkolí. M en enými okrajovými podmínkami byly rychlost vozidla – simulován p rıjezd vozidla konstantní rychlostí 15 km/hod a poté rychlostí odpovídající nevykompenzovan emu p rıčn emu zrychlení 1 m/s² p ıpadn e maximální rychlosti vozidla 70 km/hod, koeficient t ření v kontaktu kolo-kolejnice (f) – byly pou ıty limitní hodnoty 0,15 a 0,4, naložení vozidla – prázdné vozidlo (ELE), provozně obsazené vozidlo pí úvaze 4 stojících cestujících na m² (EL4). Simulace byly provedeny se  ıl abkovou kolejnicí s profilem NT1 a profilem kola odpovídajícímu profilu pou ıvan em DPP.

4 VÝSLEDKY SIMULAC ı

4.1 P rıjezd jednotlivými oblouky

Na základě analýzy směrových poměrů na výše popsáné trati S ıdl ıst e Řepy – Václavské náměstí bylo zjištěno, že vyjma oblouků, které představují odbočení trati na k rı ovatk ach v centru města, a oblouků s velk ım poloměrem (nad 500 m) jsou v šechny ostatní oblouky tvořený přechodnicí, je ı  pr ım ern a délka dosahuje 15 metrů. Nebyla nalezená korelace mezi délkou přechodnice a poloměrem oblouku. Na základě těchto zjištění byly zkoumány p rınosy aktivního vedení dvojkolí tramvaje na sérii úseků tvořených p ırn ımou trati, 15 metrů dlouhou přechodnicí, obloukem o délce odpovídající změně směru jízdy o 90 stupnů, přechodnicí a p ırn ımou trati. Souhrnn e výsledky porovnvaj ıc ı index

opotřebení v kontaktu kola a kolejnice při jízdě s pasivním vypružením a při jízdě s aktivně vedenými dvojkolními za různých okrajových podmínek zobrazuje graf na **obr. 4**. Každý sloupec grafu představuje součet indexu opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice na prvním podvozku vozidla pro 8 simulací průjezdu oblouku za různých okrajových podmínek popsaných v kapitole 3.3.



Obr. 4 Index opotřebení v kontaktech kola a kolejnice na prvním podvozku za různých okrajových podmínek

Fig. 4 Wear index at wheel-rail contacts on the first bogie under various boundary conditions

TAB. 3 Redukce disipované energie v procentech v kontaktu kolo-kolejnice na prvním podvozku vozidla při průjezdu obloukem R50R20R50 oproti pasivnímu vedení dvojkolí

TABLE 3 Percentage reduction of dissipated energy in wheel-rail contact on the first bogie of the vehicle when passing through a R50R20R50 curve compared to passive wheelset guidance

		ΦE [°]					
		1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0
ΦL [°]	0	59,5	59,7	59,2	58,0	55,9	53,2
	0,2	62,2	62,6	62,0	60,9	58,8	56,1
	0,4	63,2	63,4	63,0	61,7	59,7	57,0
	0,6	62,5	62,7	62,2	61,0	58,9	56,3
	0,8	59,3	59,6	59,1	57,9	55,8	53,2
	1,0	55,0	55,2	54,7	53,5	51,6	48,9

vyjede z oblouku příliš natočené do přímé trati. Na druhou stranu, pokud aktuátor začne dvojkolí natáčet až při vjezdu do oblouku, je dosaženo radiální polohy dvojkolí pouze na krátký moment a aktuátor opět začíná dvojkolí rovnat zpět do nenatočené polohy při výjezdu z oblouku. Aby bylo možno určit optimální bod natočení dvojkolí při vjezdu a výjezdu do respektive z oblouku, byly zvoleny parametry ΦE , ΦL . Parametr ΦE představuje úhel natočení dvojkolí při vjezdu do oblouku a ΦL pak úhlový rozdíl mezi natočením dvojkolí při radiální pozici dvojkolí v oblouku a natočením dvojkolí při vjezdu do přímé trati. Začátek natáčení až při vjezdu do oblouku R50 a naopak opuštění oblouku v nenatočené pozici je tedy reprezentováno hodnotami $\Phi E=0^\circ$ a $\Phi L=1^\circ$, naopak vjezd i výjezd do a z oblouku v radiálním postavení dvojkolí odpovídá úhlům $\Phi E=1^\circ$ a $\Phi L=0^\circ$.

Speciální pozornost byla věnována průjezdu tramvaje odbočeními na křižovatkách, které jsou složeny z krátkých úseků (kolem 5m) oblouku R50 s vloženým obloukem R20, a které mají největší vliv na opotřebení kol na zvolené testovací trati. Vzhledem k relativně pomalému výsuvu aktuátoru a potřebě velkého natočení dvojkolí pro dosažení radiální polohy u oblouku o malém poloměru bylo testováno natáčení dvojkolí již před vjezdem do oblouku a rovnání dvojkolí z části či úplně až po výjezdu z oblouku. Při přílišném natočení v přímé trati dochází k nárůstu příčné síly v kontaktu kola a kolejnice a k výraznému zvýšení indexu opotřebení, stejně tak, pokud dvojkolí

Rychlost vozidla, která má vliv na optimální hodnoty těchto parametrů byla nastavena na 15 km/hod, což odpovídá maximální dovolené rychlosti v pražské tramvajové síti pro oblouky s velmi malý poloměry. Koeficient tření mezi kolem a kolejnici byl nastaven na 0,4 a simulace proběhly s obsazeným vozidlem. **TAB. 3** pak predstavuje procentuální snižení disipované energie v kontaktu kolo-kolejnice na prvním podvozku vozidla oproti průjezdu vozidla s pasivním vypru en m v závislosti na hodnotách Φ_E , Φ_L . Jak je z tabulky patrn o, nejlepších výsledků bylo dosaženo pro hodnoty u hl u $\Phi_E=0,8^\circ$, $\Phi_L=0,4^\circ$. Při těchto u hlech bylo dosaženo nejlepších výsledků u obou dvojkolí podvozku, přičemž u prvního dvojkolí bylo dosaženo snižení disipované energie o 72,8 %, na druh m dvojkolí pak o 51,3%. Pro další simulace průjezdu vozidla po výše popsané trati byl algoritmus řidicí natáčení dvojkolí nastaven tak, aby při průjezdu těmito nejost rejs imi oblouky natáčel dvojkolí již před vjezdem a při výjezdu z oblouku p rav e na tyto parametry.

Z hodnot v **TAB. 3** lze také vyvodit, že i pokud dojde k nepřesnému určení polohy vozidla a tudíž dvojkolí začnou být natáčena  i naopak rovn na dříve  i pozd ej než v optimálním momentu, nedojde k výraznému snižení přínosu aktivního natáčení na opotřebení kol. Zvolený krok u hlu natočení dvojkolí v **TAB. 3**  inic i 0,2 stupně odpovídá zhruba 1,25 metru ujeté dráhy vozidla při zvolené rychlosti vozidla a výsuvu aktuátoru. Podrobnější zkoumání vlivu přesnosti určení polohy vozidla na trati bude provedeno v dalších f azich výzkumu, nicméně již tyto výsledky naznačují, že i při hodnotách chyby určení polohy, jakých je možné dosáhnout pomocí běžných metod určování polohy, bude přínos pro snižení opotřebení kol stále značný.

4.2 Průjezd celou tratí

Po analyzování průjezdu jednotlivý oblouky a optimalizací průjezdu odbo en imi na křížovatkách byly provedeny simulace průjezdu vozidla celou výše popsanou tratí Václavské n m. - Sídliště Řepy. Bylo provedeno 16 simulací za různých okrajových podmínek popsaných v kapitole 3.3. Dosažené výsledky v podobě indexu opotřebení v kontaktu kol a kolejnice u v sich kol vozidla zobrazuje **TAB. 4**.

Z dosažených hodnot je patrn e, že dle předpokladů největší snižení indexu opotřebení a tedy i opotřebení kol a kolejnice dojde při vysokém koeficientu tření. Výraznějšího procentuálního snižení bylo dosaženo při jízdě konstantní rychlostí 15 km/hod, což lze vysvětlit zejména dostate n m časem pro natáčení aktuátorů do každého oblouku i delší dobou průjezdu oblouky a tedy delším působením p r chn ych a podélných skluzových sil v kontaktu kolo-kolejnice. I pro okrajov e podmínky z druhé strany provozního spektra přinesla technologie významný přínos. V průměru došlo ke snižení indexu opotřebení na v sich kolech tramvaje o 73 % při jízdě s aktivním nat a en m dvojkolí oproti jízdě s klasick m vypru en m.

TAB. 4 Výsledky simulací průjezdu zkušební trati
TABLE 4 Achieved results of simulations of passage through the test track

vedení dvojkolí	rychlost	zatížení	třecí koef.	Index opotřebení [N]	Snížení [%]
pasivní	max	EL4	0,4	1 124 368	
pasivní	max	EL4	0,15	342 539	
pasivní	max	ELE	0,4	886 817	
pasivní	max	ELE	0,15	266 268	
pasivní	15	EL4	0,4	1 525 949	
pasivní	15	EL4	0,15	617 168	
pasivní	15	ELE	0,4	1 512 409	
pasivní	15	ELE	0,15	496 158	
aktivní	max	EL4	0,4	338 534	70
aktivní	max	EL4	0,15	141 621	59
aktivní	max	ELE	0,4	270 397	70
aktivní	max	ELE	0,15	111 156	58
aktivní	15	EL4	0,4	381 586	75
aktivní	15	EL4	0,15	167 917	73
aktivní	15	ELE	0,4	304 153	80
aktivní	15	ELE	0,15	134 726	73

5 ZÁVĚR

Článek představuje výzkum přínosů aplikace aktivně řízených prvků do podvozku článkové nízkopodlažní tramvaje za účelem aktivního vedení dvojkolí. Dostatečné robustnosti navrženého systému napomáhá, že jako vstupní veličiny do algoritmu řízení aktivních prvků vstupují pouze veličiny, které je možné bezpečně měřit v dostatečné přesnosti a bez zvýšení nákladů na vybavení vozidla sensorikou. Veličinu ovlivňující natočení dvojkolí, tedy poloměr oblouku, je pak navrženo získávat z databáze trati a ověřovat její hodnotu pomocí sensoriky na čele vozidla. Pro natáčení byl využit koncept aktivního silentbloku inspirovaný systémem LiCAS od firmy Liebherr pro vozidla těžké železnice. Takto koncipovaný způsob natáčení dvojkolí je dle názoru autora reálné zastavět i do tak prostorově omezené konstrukce, jakou současné podvozky nízkopodlažních tramvají mají.

Představený systém byl aplikován do modelu článkové tramvaje koncepce „multigelenk“ a byl simulován průjezd vozidla s aktivním i pasivním vedením dvojkolí jednotlivými oblouky i po trati Václavské náměstí – Sídliště Řepy. Při porovnání aktivního a pasivního vedení dvojkolí bylo dosaženo velmi dobrých výsledků za různých okrajových podmínek výpočtu. U jednotlivých oblouků bylo dosaženo redukce indexu opotřebení v rozmezí 67-97 % v závislosti na poloměru oblouku. Při simulaci průjezdu vozidla celým traťovým úsekem za různých okrajových podmínek došlo ke snížení indexu opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice v průměru o 73 % oproti vozidlu s klasickým vypružením.

Samotný model aktivního natáčení i jeho řízení budou dále zpřesňovány a vylepšovány, nicméně prezentované výsledky jasně ukazují, že technologie aktivního natáčení je pro moderní článkové tramvaje velmi vhodná a může přispět k dalšímu rozvoji tramvajové dopravy. Hlavními benefity technologie je snížení opotřebení kol a kolejnic, což přinese výrazné úspory dopravním podnikům a bude mít tak velký vliv na náklady životního

cyklu vozidla. Dalšími velkými výhodami jsou úspory trakční energie či snížení emisí hluku a vibrací při průjezdu oblouky. Jako nadstavbové výhody lze chápat možnost dalšího rozšíření počtu vozidel s neotočnými podvozky, která jsou levnější, kapacitnější a pro cestující z hlediska interiéru vozidla komfortnější.

Další vývoj bude zaměřen zejména na zpřesnění modelu aktuátoru, výzkum vlivu nepřesné lokalizace vozidla na dosažené výsledky a na otestování navrženého algoritmu řízení na zkušebním kladkovém stavu v laboratořích Fakulty strojní, ČVUT.

Poděkování

The paper was created with the financial support of the Technology Agency of the Czech Republic, project No TE01020054 "Bozek Vehicle Engineering - National Competence Center".

Literatura

[1] *LiCAS passes test successfully* [online]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/latest-news/news-press-releases/detail/licas-passes-test-successfully.html>. [2] *Electrohydraulic Controlled Axle Steering (eCAS)* [online]. In: . [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/transportation/downloads/products/liebherr-electrohydraulic-controlled-axle-steering-ecas.pdf> [3] *Traila* [online]. [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.traila.ch/en/> [4] **VRBA, J. and KOLÁŘ, J.**. Možnosti aplikace aktivních prvků v kolejových vozidlech. *Nová železniční technika*. 2022, 2022(4), 24-32. ISSN 1210-3942. [5] **FU, Bin a Stefano BRUNI**. Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2022, 60(3), 810-834. doi:10.1080/00423114.2020.1838563 [6] **KUUTTI, Sampo, Saber FALLAH, Konstantinos KATSAROS, Mehrdad DIANATI, Francis MCCULLOUGH a Alexandros MOUZAKITIS**. A Survey of the State-of-the-Art Localization Techniques and Their Potentials for Autonomous Vehicle Applications. *IEEE Internet of Things Journal* [online]. 2018, 5(2), 829-846. ISSN 2327-4662. [7] **RISTIĆ-DURRANT, Danijela, Marten FRANKE a Kai MICHELS**. A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways. *Sensors* [online]. 2021, 21(10) [cit. 2023-06-21]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21103452 [8] **SCHINDLER, Christian, Ashwin WALAWALKAR a Nureddin BENNETT**. *Payload Estimation in Excavators: Model-Based Evaluation and Comparison of Current Payload Estimation Systems*. [9] **ČIHÁK, Stanislav**. *Optimalizace parametrů článkové nízkopodlažní tramvaje*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jan Kalivoda.



Resumé

Článek představuje koncepci využití technologie aktivního natáčení pro moderní článkové nízkopodlažní tramvaje s neotočnými podvozky. V článku jsou dále představeny a diskutovány výsledky provedených MBS výpočtů simulujících jízdu vozidla vybaveného aktivním vedením dvojkolí jednotlivými oblouky i po konkrétní trati v rámci pražské tramvajové sítě. Při porovnání průjezdu celou tratí vozidla s aktivním a pasivním vedením dvojkolí došlo ke snížení indexu opotřebení v průměru o 73 %.

Summary

The paper presents the concept of using active wheelset steering technology for modern articulated low-floor trams with rigid bogies. The contribution also presents and discusses the results of MBS calculations simulating the travel of a vehicle equipped with active

wheelset steering technology through individual curves and on a specific line within the Prague tram network under different boundary condition. In a comparison of passive and active wheelset guidance, a reduction in wear index of 73% on average was achieved.

