

VÝZKUM A MOŽNOSTI APLIKACE AKTIVNÍHO NATÁČENÍ DVOJKOLÍ PRO MODERNÍ TRAMVAJOVÁ VOZIDLA

THE RESEARCH AND APPLICATION POSSIBILITIES FOR THE WHEELSET ACTIVE STEERING SYSTEM FOR TRAMCARS

Jan VRBA¹, Vojtěch DYBALA²

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252655

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Tento článek se zabývá výzkumem a aplikací technologie aktivního natáčení dvojkolí do oblouku u moderních článkových tramvají. Tramvajové tratě v centrech měst totiž často obsahují oblouky s velmi malými poloměry, což vede k výraznému opotřebení kol a kolejnic, hluku a vibracím. Studie navrhuje integraci aktivního prvku, původně vyvinutého pro vozidla klasické železnice, do podvozků moderních článkových tramvají s neotočnými podvozky a poukazuje na výzvy při takovéto integraci.

Klíčová slova

aktivní rejdivání, aktivní prvek, Multi-Body Simulation (MBS), tramvaj, neotočný podvozek

Abstract

This article deals with the application of an active wheelset steering technology in modern articulated trams. Indeed, tram lines in city centers often contain curves with very small radii, leading to a significant wheel and rail wear, a noise and vibration. The study proposes the integration of an actuator, originally developed for a conventional rolling stock, into the bogie of modern articulated trams with non-pivoting bogies and points out the challenges involved in such integration.

Keywords

active steering, actuator, Multi-Body Simulation (MBS), tram, non-pivoting bogie

1 ÚVOD

Článek se zabývá výzkumem aplikace technologie aktivního vedení dvojkolí do moderních tramvají. Tento segment železniční dopravy byl dlouho dobu ve výzkumu nasazení této technologie opomíjen i přes jeho velký potenciál pro tramvajovou dopravu. Profil tramvajových tratí totiž často zejména v centrech měst není pro moderní článkové tramvaje z hlediska opotřebení kol či emisí hluku a vibrací z daleka ideální. V centrech měst lze často nalézt velmi ostré oblouky, často s poloměry kolem 20 metrů, navíc často bez přechodnic. V takovýchto obloucích dochází k vyčerpání příčné vůle dvojkolí v koleji a k velkým skluzovým silám v kontaktu kol a kolejnice a velkému opotřebení právě kol tramvaje i kolejnic.

¹ Ing. Jan Vrba. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Technická 4, 160 00 Praha, Česká republika, e-mail: vrba@fs.cvut.cz

² Ing. Vojtěch Dybala, Ph.D. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Technická 4, 160 00 Praha, Česká republika, e-mail: vojtech.dybala@fs.cvut.cz

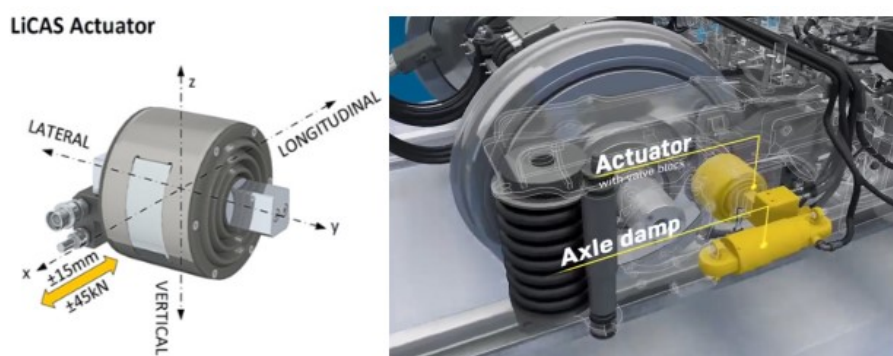
Článek tak představuje koncept využití aktivního prvku vyvíjeného pro konvenční železnici v podvozku moderní článkové tramvaje s neotočnými podvozky. Je představena jednak zástavbová analýza a navržen koncept řízení aktivních prvků vhodný pro tramvajový provoz. Dále jsou představeny MBS simulace porovnávající jízdu vozidla po 10 km dlouhém úseku reálné tramvajové trati s pasivním vedením dvojkolí s jízdou tramvaje s aktivním natáčením dvojkolí. Představené simulace prokazují výrazný přínos ve snížení opotřebení kol a kolejnic při využití aktivního natáčení dvojkolí, a to i při zvolení hodnot maximálního výsuvu aktuátoru, kterých je možné dosáhnout při využití dnešní koncepce tramvajových podvozků.

I přes prokazatelné úspory v opotřebení kol a kolejnic technologie není do současných tramvajových vozidel nasazena. Autoři tohoto článku tak kromě výhod představují i úskalí využití této technologie, kterými jsou zejména prostorové nároky aktuátorů a jejich napájení či řešení vzájemných pohybů dvojkolí vůči primárně vypruženým hmotám.

2 ZVOLENÝ AKTIVNÍ PRVEK, ZPŮSOB ŘÍZENÍ AKTIVNÍHO PRVKU A JEHO MOŽNÁ ZÁSTAVBA DO PODVOZKU TRAMVAJE

Jak mimo jiné dokládá provedená důkladná rešerše [1] výzkumu a využití aktivních prvků v pojezdu kolejových vozidel, jde o technologii zkoumanou a vyvíjenou po dlouhá desetiletí, a to téměř výhradně pro konvenční železnici. I přes velké množství výzkumů, simulací i testování v reálném provozu však nedošlo, vyjma aktivního naklápění vozové skříň, k rozšíření využití aktuátorů v pojezdech kolejových vozidel. Ambici tento stav změnit v posledních letech prezentuje společnost Liebherr s vyvinutým systémem aktivního natáčení dvojkolí LiCAS.

Aktuátor LiCAS je hydraulický prvek, který je součástí celého systému umožňujícího aktivní rejdivání dvojkolí, viz obr. 1. Jedná se o komplexní systém, který kromě samotného aktuátoru zahrnuje řídicí jednotku, agregáty zajišťující potřebné množství a tlak média, které aktuátor ovládá, hydraulické hadice pro transport média a nápravový tlumič. Ten funguje jednak jako záložní prvek z hlediska bezpečnosti provozu vozidla v případě selhání aktuátoru, kde přebírá funkci vedení dvojkolí, a zároveň je vybaven čidlem pro měření výsuvu dvojkolí, se kterým pracuje zpětnovazební regulace aktuátoru. [2]



Obr. 1 Vizualizace aktuátoru LiCAS firmy Liebherr [2]



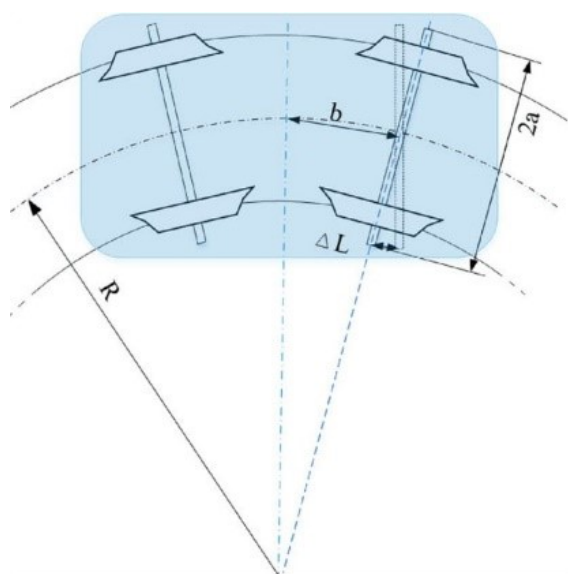
Obr. 2 Zástavba systému LiCAS do železničního podvozku [3]

Firma Liebherr systém LiCAS primárně navrhla pro železniční vozidla a také jej funkčně otestovala na podvozku osobního vozu v Anglii, viz obr. 2. Aktuátor je určený k montáži do kyvného ramene na jedné straně dvojkolí namísto standardního silentbloku vedení kyvného ramene. Z toho pak plynou omezení směřující k aplikaci v tramvajových podvozcích, kterým je věnována kapitola 3. Již zde je vhodné čtenáře upozornit, že se jedná o koncepční studii zastavitelnosti v kontextu podvozků tramvají firmy Škoda Transportation, které jsou ve výrobě či ve vývoji současných nebo budoucích projektů.

Aktuátory natáčejí dvojkolí jsou u systému LiCAS řízeny zpětnovazebně na základě pohybů mezi podvozkem a skříní vozidla. Tento způsob řízení je však pro tramvaje nevhodný, jelikož řada současných tramvají využívá podvozky neotočné, které se natáčejí společně se skříní článku tramvaje. Pro tramvaje s neotočnými podvozky navíc technologie aktivního natáčení dvojkolí do oblouků může přinést výrazně větší benefity než u tramvají s podvozky otočnými. Navíc ani u tramvají s otočnými podvozky není tento princip příliš vhodný, jelikož vzhledem k velmi malému poloměru i délce oblouků na tramvajových tratích a poměrně dlouhé době výsuvu aktuátoru, by aktuátor nestíhal dvojkolí dostatečně natočit a technologie by nebyla tolik přínosná jako u konvenční železnice. Další odlišností od konvenčních tratí je fakt, že některé oblouky na tramvajových tratích v centrech měst nemají přechodnice a křivost je tak měněna skokově.

Pro aktivní natáčení dvojkolí tramvaje je tak v návrhu počítáno s dopředným řízením aktuátorů v podvozku vozidla. Jako vstupní veličiny algoritmu řídicího výsuvu aktuátorů slouží poloměr oblouku R a rychlost vozidla. Natočení dvojkolí do oblouku je dáno výsuvem aktuátorů ΔL , který je na základě poloměru oblouku určován dle vzorce (1), ve kterém b značí polovinu rozvoru podvozku a a představuje polovinu příčné vzdálenosti aktuátorů natáčejí dvojkolí, viz obr. 3.

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



Obr. 3 Výpočet výsuvu aktuátoru při průjezdu obloukem [4]

Rychlost vozidla je s dostatečnou přesností měřena již na dnešních vozidlech. Poloměr oblouku je pak na základě polohy vozidla na trati získáván z digitální mapy trati, která je nahrána ve vozidle. Digitální mapa trati obsahuje informace o jednotlivých úsecích projížděné trati a může být získána například speciálním měřicím zařízením (obr. 4), kterým je trať projeta, a naměřená data jsou následně zpracována do databáze a nahrána do vozidla. Na základě znalosti polohy vozidla a parametrů uložených pro daný úsek trati v digitální mapě jsou pak řízeny aktuátory natáčejí dvojkolí.

Dostatečně přesné určení polohy vozidla na trati v městském prostředí může být problematické. Jako nejlepší z hlediska robustnosti, bezpečnosti, nákladů i přesnosti lokalizace se jeví však metoda RFID, která je již používána v některých pokročilých tramvajových provozech. Vozidlo je lokalizováno na trati pomocí štítků umístěných na trati a čtečky těchto štítků umístěných na vozidlech (viz obr. 4 vpravo). Tento

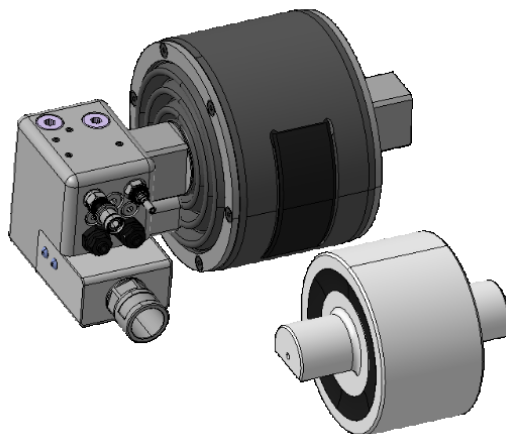
systém je využíván již dnes pro hlášení zastávek, kontrolu rychlosti vozidla či pro mazání okolků například Dopravním podnikem hl. města Prahy (dále DPP) [5]. Jednalo by se tak v zásadě pouze o rozšíření funkcionality již provozovaného systému.



Obr. 4 Měřící zařízení průjezdu trati (vlevo). Sledovací RFID tag a čtečka (vpravo) [5]

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 ověřován pomocí senzoriky na čele vozidla (LiDAR, kamera). Řídicí systém bude schopný z dat získaných ze senzoriky na čele vozidla detekovat kolejnicové pásy a vypočítat poloměr oblouku. Tato technologie je dostupná již v dnešní době a bude nasazena například na nových tramvajích Škoda 52T pro Prahu. Takto získaný poloměr oblouku bude tedy porovnán s hodnotou v digitální mapě trati, a pokud se hodnoty výrazněji nebudou shodovat, nedojde k natočení dvojkolí a vozidlo projede úsek sníženou rychlostí s aktuátory v nominální poloze. Lze předpokládat, že výše zmíněné senzory na čele vozidla budou na vozidle umístěny primárně za jiným účelem (např. antikolizní systém jako u 52T) a nedojde tak ke zvýšení pořizovací ceny systému aktivního natáčení.

Vzhledem k malé délce oblouků s nejmenším poloměrem byl algoritmus řídicí natáčení dvojkolí nastaven tak, aby dvojkolí bylo natáčeno ještě před vjezdem do oblouku, a naopak rovnáno z části před výjezdem z oblouku a z části až v přímé trati po výjezdu z oblouku. Řízení natáčení dvojkolí bylo takto nastaveno na základě velkého množství provedených simulací dle minima dosaženého celkového indexu opotřebení. Detailně je nastavení algoritmu řídicího dvojkolí popsáno v [6].

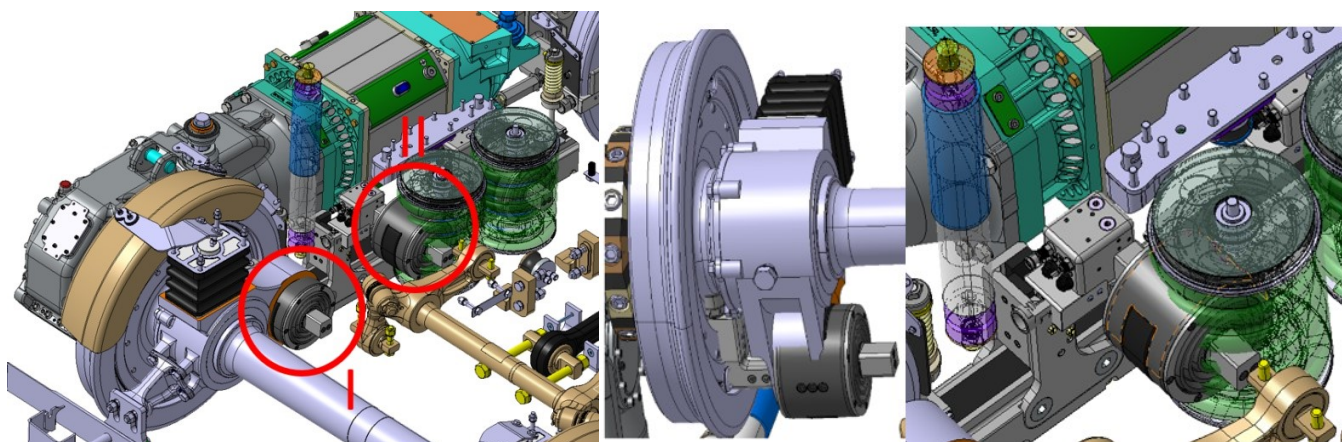


Obr. 5 Proporcionální srovnání velikosti aktuátoru LiCAS a běžného silentbloku vedení kyvného ramene

3 LIMITACE A OMEZENÍ VYUŽITÍ AKTIVNÍHO PRVKU

Jak již bylo uvedeno v dřívější kapitole, první zásadní výzvou z hlediska zastavitelnosti do tramvajového podvozku představují rozměry aktuátoru LiCAS. Ten je totiž významně větší než běžně používané silentbloky vedení kyvných ramen. Pro srovnání lze odkázat na obr. 5. K základnímu posouzení zastavitelnosti do podvozku byla vytvořena 3D rozvaha (obr. 6) rozmístění hlavních komponent podvozku, tj. dvojkolí a prvky jeho vedení, komponenty vypružení, brzd a pohonu dvojkolí. Konstrukční předpoklad této rozvahy byl, že samotný rám podvozku by se navrhl s ohledem na funkční uspořádání výše zmíněných konstrukčních skupin.

Pozice umístění aktuátoru I dle obr. 6, tedy prosté nahrazení za běžný silentblok vedení, se jeví jako nemožná, neboť aktuátor svými rozměry koliduje s kolem dvojkolí, jak je vidět na obr. 6 uprostřed. Zástavbově lepší by bylo umístění ve větší vzdálenosti s významně delším kyvným ramenem – pozice II. Z detailu na obr. 6 vpravo je sice také zjevná kolize s díly sekundárního vinutí, kolejnicovou brzdou, a též vyvstává problém s vedením hydraulických hadic, pro které by bylo potřeba vytvořit prostor, nicméně v tomto ohledu se jedná o realističtější variantu pro vývoj nekonvenčního tramvajového podvozku.



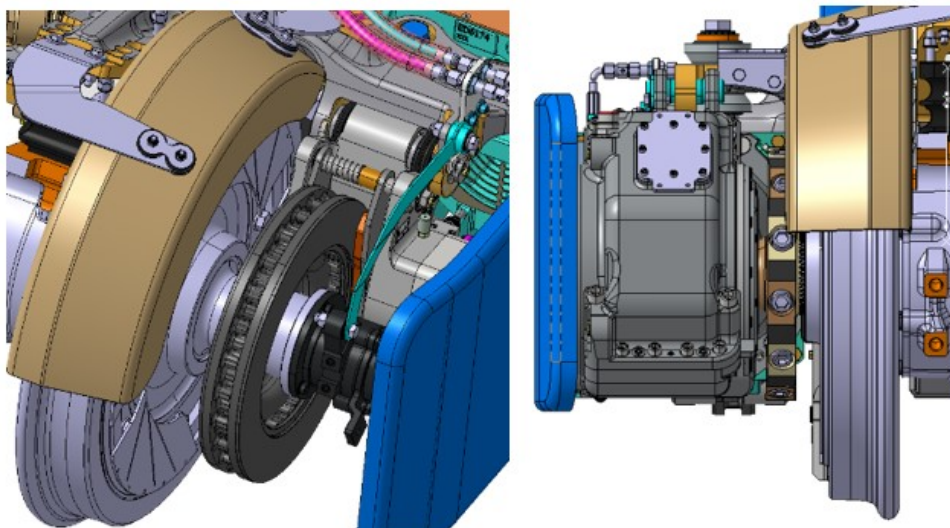
Obr. 6 Rozvaha o umístění aktuátoru LiCAS v podvozku (vpravo), pozice aktuátoru I (uprostřed), II (vpravo)

Kromě náročné zástavby aktuátoru je také zásadní věcí posouzení vlivu samotného rejdivání na funkci ostatních konstrukčních skupin v podvozku, neboť vynucený posuv dvojkolí v hodnotách ± 15 mm na úrovni primárního vypružení představuje zároveň mezní hodnoty funkce primárního vypružení ve svislém směru. Čili aktivní rejdivání vnáší do standardního zatížení podvozku a jeho komponent další enormní zatížení. Podstavy podvozku postižené tímto efektem jsou:

- provedení primárního vypružení – pružina, která je standardně navrhována na mezní hodnoty podélné deformace cca. ± 5 mm, bude muset být umístěna svisle, viz obr. 6,
- kotoučová brzda (obr. 7 vlevo) – v případě kotouče umístěného na konci nápravy bude efekt rejdivání ještě zesílen větší vzdáleností kotouče vůči středu dvojkolí. Kotouč tak bude vůči brzdíči a brzdovým destičkám vykonávat významně větší parazitní pohyb jak posuvný, tak úhlového natočení,
- spojení pohon-dvojkolí (obr. 7 vpravo) – tato vazba je realizována pomocí spojek, jejichž současné konstrukce umožňují maximální statické deformace vyvolané již pohybem v primárním vypružení v rámci jeho svislých mezních pohybů a další přídatnou deformaci v podélném směru nezvládnou.

Tyto funkční vlivy směřují vývoj nekonvenčního podvozku s aktivním rejdiváním dále i v rámci dodavatelského řetězce, kdy by bylo nutné, aby se začali vývojem nových spojek, brzd, primárních pružin zabývat i výrobci těchto komponent. Vývoj nekonvenčního tramvajového podvozku by měl být podmíněn také vývojem na straně aktuátoru, který bude směřovat k redukci jeho vnějších rozměrů.

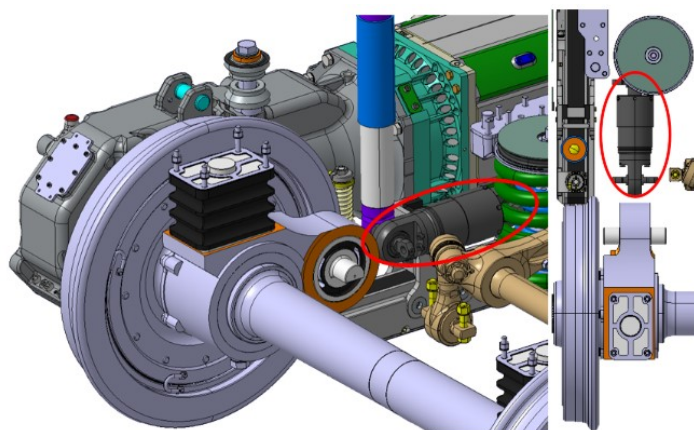
Výše nastíněná problematika aplikace aktuátoru definuje základní konstrukční výzvy pro řešení takového podvozku, který by byl od základu vyvíjen se snahou umožnit co největší nebo alespoň v kontextu tohoto výzkumu optimální úroveň rejdivání, tedy podélného posuvu na úrovni primárního vypružení ± 15 mm.



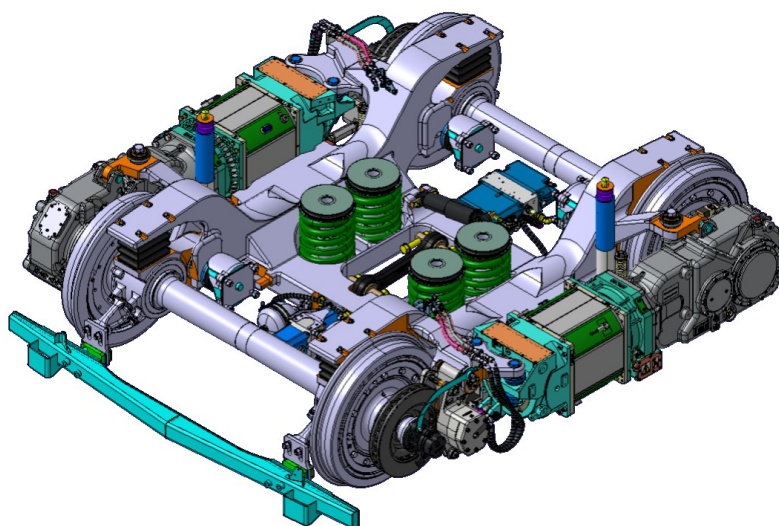
Obr. 7 Vazba konců dvojkolí na mechanickou brzdou (vlevo) a výstupní spojku pohonu (vpravo)

Z hlediska praktické stránky technického řešení podvozku, ale také reálného provozu na tramvajových tratích, je vhodné také zvážit omezení na straně funkčnosti aktuátoru. Konkrétně na hodnotu ± 5 mm, což je hodnota běžně definovaných limitů podélného pohybu dvojkolí v rámci návrhu primárního vypružení. Kontext reálného provozu pak může být principálně daný specifickou lokací provozu tramvajového vozidla, kdy se na tratích bude nacházet statisticky malé množství oblouků s malými poloměry. S výstavbou nových tratí, které již vedou mimo centra měst a mají díky tomu výrazně přímější horizontální profil, by bylo možné optimalizovat i požadavky na aktivní rejdivání, a tedy i funkčnost aktuátoru a náročnost technického řešení podvozku jako celku. Tento pohled byl též vzat v úvahu, neboť právě z konstrukčního hlediska by směřoval k výrazně méně komplikovanému řešení podvozku, jehož základní rozvahu lze vidět na obr. 9. Budeme-li vycházet ze současných konvenčních konstrukcí bylo by možné použít současných brzd a pohonů. Kyvné rameno by mohlo být navrženo se základními rozměry v rozsazích již používaných řešení. Silentblok vedení kyvného ramene by vyžadoval snížení tuhosti v podélném směru, což ale dle vyjádření dodavatelů těchto komponent není pro ně neznámé řešení a je velmi pravděpodobně konstrukčně proveditelné bez významných komplikací i pro tramvajový podvozek. Konstrukčně nejzásadnější a nejkomplikovanější uzly zde budou:

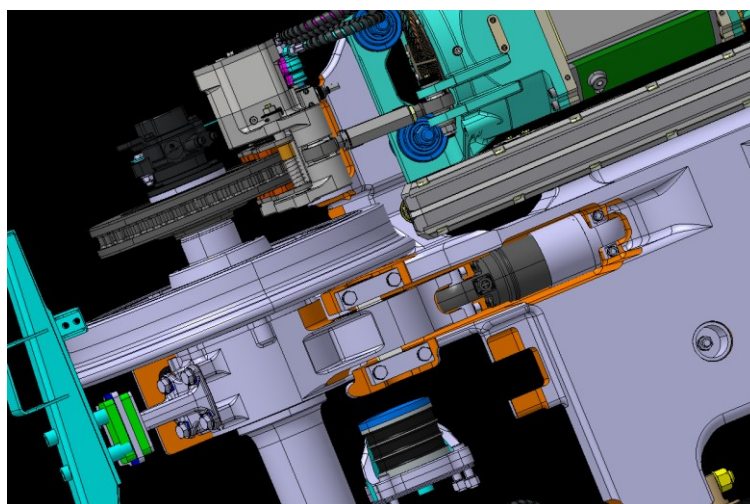
- samotný aktuátor, který by dle předpokladů byl osového/tlumičového typu. Princip fungování by mohl vycházet z řešení aktivních tlumičů, které již potenciální dodavatelé mají,
- pružiny sekundárního vypružení, respektive potřeba je umístit z důvodu potenciální kolize s aktuátorem osového/tlumičového typu,
- konstrukce samotného rámu, který bude složitý právě v oblasti okolo aktuátoru a rozhraní s výše uvedenými díly a konstrukčními uzly.



Obr. 8 Vizualizace rozvahy s aktuátorem osového/tlumičového typu



Obr. 9 Studie podvozku s prvky aktivního rejdivání tlumičového typu



Obr. 10 Detail využití aktuátoru tlumičového typu pro rejdivání dvojkolí

Studie tohoto podvozku respektující výše uvedené předpoklady je vizualizována na obr. 8–10. Obr. 9 představuje pohled na celý podvozek včetně navrženého rámu. Obr. 10 pak uvádí detail montáže aktuátoru tlumičového typu, který je pomocí šroubových spojů z jedné strany upevněn do rámu podvozku a z druhé strany k nálitku na kyvném rameni vedoucím dvojkolí.

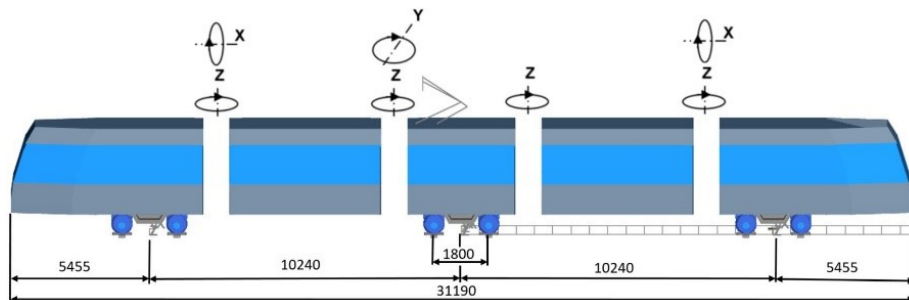
4 MBS SIMULACE

Pro ověření přínosu aplikace technologie aktivního natáčení dvojkolí do pojezdu tramvaje byl v MBS programu Simpack vytvořen model článkové tramvaje s neotočnými podvozky s aktivním vedením dvojkolí, který byl propojen s modelem dopředného řízení aktuátorů v programu Matlab Simulink. Tyto dva programy si tak v každém časovém kroku simulace předávají potřebné informace. Z programu Simpack je v každém časovém kroku předávána informace o poloze vozidla na trati a rychlosti vozidla, z programu Simulink je pak předávána do programu Simpack hodnota natočení aktuátorů.

Pro vyhodnocení vlivu aktivního natáčení dvojkolí bylo využito čísla opotřebení, který je definován dle (2). V rovnici (2) T_x značí podélnou skluzovou sílu, T_y je příčná skluzová síla, v_x je podélný poměrný skluz a v_y je příčný poměrný skluz. Jednotkou čísla opotřebení je Newton. Při integraci čísla opotřebení po délce tratě lze dostat energii disipovanou v kontaktu kolo – kolejnice, která je úměrná míře opotřebení.

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

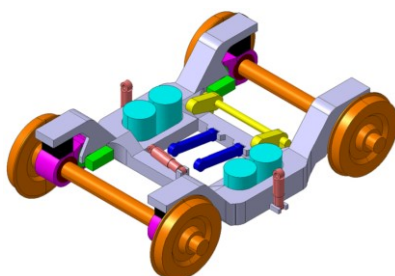
Pro vývoj systému aktivního natáčení bylo vybráno vozidlo koncepce „multigelenk“ tedy vozidlo s pěti články a třemi neotočnými podvozky. Takováto koncepce tramvaje odpovídá nejčastějšímu řešení moderních článkových nízkopodlažních tramvají ve světě. Toto řešení tramvaje se také jeví jako nejvýhodnější pro aplikaci technologie aktivního natáčení, jelikož radiální stavění dvojkolí do oblouku může výrazně zlepšit problémy této koncepce vozidla při průjezdu oblouky malých poloměrů, jako jsou velké příčné síly v kontaktu kolo – kolejnice či emise hluku a vibrací. Naopak výhody vozidla, kterými jsou zejména vysoká kapacita, širší ulička nad podvozky či nižší cena oproti vozidlům s otočnými podvozky zůstanou zachovány.



Obr. 11 Ukázka koncepce tramvaje typu „Multigelenk“

Zjednodušený model podvozku pro MBS simulace je tak řešen jako neotočný, avšak díky dorazům s progresivní charakteristikou je umožněno natočení podvozku oproti skříni vozidla o ± 2 stupně. Vedení dvojkolí je řešeno pomocí kyvného ramene. Aktuátor aktivně natáčející dvojkolí do oblouku je umístěn v kloubu spojujícím kyvné rameno s rámem podvozku na obou stranách dvojkolí. Jedná se tak o zjednodušený model zástavby aktuátoru LiCAS do dnes využívaného tramvajového podvozku. Parametry vozidla i podvozku využitých pro MBS simulace jsou uvedeny v [7].

Aby bylo reálné porovnat opotřebení kol tramvaje při jízdě s pasivním vedením oproti aktivnímu vedení dvojkolí i vliv hodnoty maximálního výsuvu aktuátoru, byl na základě stavebních výkresů získaných od DPP vytvořen model odpovídající svým profilem reálnému úseku z pražské tramvajové sítě. Model trati pro simulace odpovídá úseku Václavské náměstí – Národní divadlo – Újezd – Anděl – Sídliště Řepy a je dlouhý 10,6 km. Tento úsek trati odpovídá zhruba 60 % délky linky č. 9, jedné z nejvytíženějších pražských tramvajových linek. Úsek je tvořen zejména přímou tratí či oblouky s velkými poloměry s přechodnicemi. Na trati se však nachází též 4 z pohledu opotřebení kol a kolejnic kritická místa. Jedná se o křižovatky, kde jsou z prostorových důvodů instalovány oblouky o poloměru 20 metrů bez přechodnic. Detailní rozbor horizontálního profilu trati obsahuje [7].



Obr. 12 Schématické znázornění neotočného podvozku pro MBS simulace



Obr. 13 Vizualizace simulované trati

Simulace průjezdu vozidla zkušební tratí či jednotlivými oblouky byly vždy provedeny vícekrát za různých okrajových podmínek výpočtu (výpočtových scénářů), aby bylo možné určit jejich vliv na snížení opotřebení kol při porovnání pasivního a aktivního vedení dvojkolí.

Jednotlivé výpočtové scénáře byly voleny tak, aby měněné parametry postihovaly hodnoty z obou okrajů provozního spektra. Simulován byl průjezd vozidla úsekem za různé kombinace okrajových podmínek jak při pasivním, tak aktivním vedením dvojkolí. Měněnými okrajovými podmínkami byly:

- rychlost vozidla – simulován průjezd vozidla konstantní rychlostí 15 km/hod a poté rychlostí odpovídající nevykompenzovanému příčnému zrychlení 1 m/s^2 případně maximální rychlosti vozidla 70 km/hod,
- koeficient tření v kontaktu kolo-kolejnice (f) – byly použity limitní hodnoty 0,15 (mokrá kolejnice) a 0,4 (suchá kolejnice),
- obsazenost vozidla – prázdné vozidlo (ELE), provozně obsazené vozidlo při úvaze 4 stojících cestujících na m^2 (EL4).

5 VÝSLEDKY SIMULACÍ

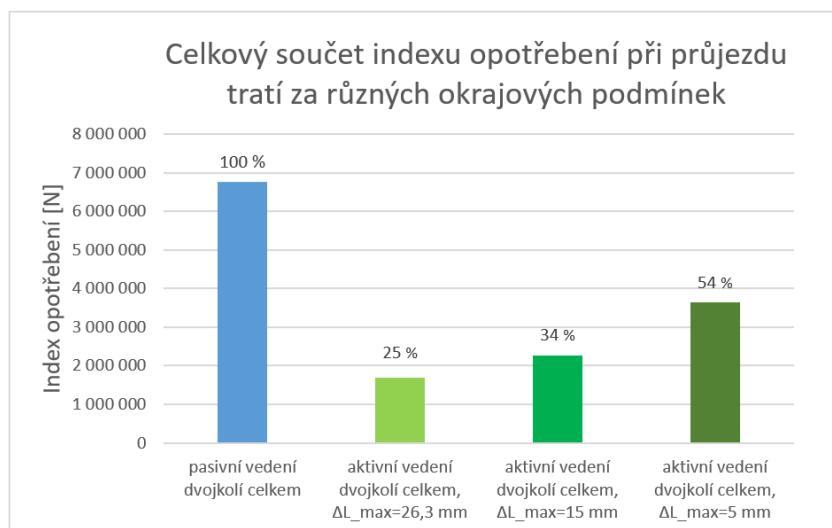
Vzhledem k tomu, že při detailní analýze zástavbových možností aktuátoru i potřebných dalších komponent, které by umožnily optimální hodnotu natáčení aktuátoru, bylo zjištěno, že pro současné tramvajové podvozky je třeba volit natočení daleko od optimální maximální hodnoty, byly simulace provedeny pro tři hodnoty maximálního výsuvu aktuátoru:

- $\Delta L_{\max} = 26,325 \text{ mm}$ – hodnota odpovídající radiálnímu postavení dvojkolí v oblouku s nejmenším poloměrem (20 metrů) na projížděném traťovém úseku,
- $\Delta L_{\max} = 15 \text{ mm}$ – maximální výsuv aktuátoru LiCAS, umožňující radiální postavení dvojkolí v obloucích do minimálního poloměru 35 metrů,
- $\Delta L_{\max} = 5 \text{ mm}$ – hodnota jeví se jako realizovatelná při zachování stávající koncepce podvozků.

Tato hodnota umožňuje radiální postavení dvojkolí v obloucích do minimálního poloměru 105 m.

Hodnoty jízdy s aktivním natáčením dvojkolí za různých okrajových podmínek byly porovnány s jízdou tramvaje s pasivním vedením dvojkolí za obdobných okrajových podmínek. Dosažené výsledky MBS simulací zobrazuje tab. 1.

Jak je patrné z výsledků v tab. 1 či grafu na obr. 13, MBS simulace prokázaly výrazné snížení indexu opotřebení při aktivním natáčení dvojkolí oproti jízdě vozidla s klasicky vedenými dvojkolími. Při maximálním výsuvu aktuátoru došlo k průměrnému snížení indexu opotřebení o 75 %, při současné hodnotě výsuvu aktuátoru LiCAS o 66 % a při maximálním výsuvu aktuátoru pouze 5 mm došlo ke snížení indexu opotřebení kol a kolejnic o 46 %. Největšího vlivu na snížení opotřebení je dle očekávání dosaženo při koeficientu tření odpovídající suché kolejnici.



Obr. 13 Grafický přehled výsledků MBS simulací

Tab. 1 Výsledky MBS simulací

Vedení dvojkolí	Rychlost [km/h]	Naložení	Třecí koef.	Max. výsuv aktuátoru [mm]	Index opotřebení [N]	Snížení indexu opotř.	Disipovaná energie [J]	Snížení disip. Energie
pasivní	max	EL4	0.4	0	1 122 630	-	7 460 732	-
pasivní	max	EL4	0.15	0	342 539	-	2 517 519	-
pasivní	max.	ELE	0.4	0	886 817	-	5 922 422	-
pasivní	max.	ELE	0.15	0	266 268	-	1 937 006	-
pasivní	15	EL4	0.4	0	1 512 409	-	6 301 704	-
pasivní	15	EL4	0.15	0	617 168	-	2 571 533	-
pasivní	15	ELE	0.4	0	1 525 949	-	6 358 121	-
pasivní	15	ELE	0.15	0	496 158	-	2 067 325	-
aktivní	max	EL4	0.4	26.325	304 242	73%	1 586 185	79%
aktivní	max	EL4	0.15	26.325	128 599	62%	969 207	62%
aktivní	max.	ELE	0.4	26.325	242 519	73%	1 251 477	79%
aktivní	max.	ELE	0.15	26.325	101 251	62%	748 571	61%
aktivní	15	EL4	0.4	26.325	350 097	77%	1 458 738	77%
aktivní	15	EL4	0.15	26.325	158 841	74%	661 838	74%
aktivní	15	ELE	0.4	26.325	277 522	82%	1 156 342	82%
aktivní	15	ELE	0.15	26.325	126 900	74%	528 750	74%
aktivní	max	EL4	0.4	15	433 794	61%	2 127 923	71%
aktivní	max	EL4	0.15	15	165 811	52%	1 123 541	55%
aktivní	max.	ELE	0.4	15	337 395	62%	1 647 935	72%
aktivní	max.	ELE	0.15	15	129 075	52%	864 397	55%
aktivní	15	EL4	0.4	15	480 540	68%	2 002 763	68%
aktivní	15	EL4	0.15	15	196 571	68%	818 819	68%
aktivní	15	ELE	0.4	15	374 077	75%	1 557 975	75%
aktivní	15	ELE	0.15	15	155 223	69%	646 790	69%
aktivní	max	EL4	0.4	5	731 913	35%	3 819 880	40%
aktivní	max	EL4	0.15	5	238 216	30%	1 577 192	37%
aktivní	max	ELE	0.4	5	569 507	36%	2 886 528	51%
aktivní	max	ELE	0.15	5	186 284	30%	1 220 164	37%
aktivní	15	EL4	0.4	5	808 462	47%	3 367 925	47%
aktivní	15	EL4	0.15	5	266 159	57%	1 108 946	57%
aktivní	15	ELE	0.4	5	635 199	58%	2 646 673	58%
aktivní	15	ELE	0.15	5	210 051	58%	875 086	58%
pasivní vedení dvojkolí celkem					6 769 938		35 136 362	
aktivní vedení dvojkolí celkem, $\Delta L_{\max}=26,3$ mm					1 689 971	75%	8 361 107	76%
aktivní vedení dvojkolí celkem, $\Delta L_{\max}=15$ mm					2 272 486	66%	10 790 143	69%
aktivní vedení dvojkolí celkem, $\Delta L_{\max}=5$ mm					3 645 791	46%	17 502 394	50%

Konkrétní procentuální hodnoty snížení indexu opotřebení lze však považovat spíše za pozitivněji vyznívající, než jaký se dá očekávat reálný přínos. V rámci simulací tramvaj projížděla oblouky s minimálním poloměrem nejvyšší povolenou rychlostí, zatímco v reálném provozu jsou tyto oblouky projížděny vozidly s neotočnými podvozky většinou rychlostmi nižšími.

6 PRAKTICKÁ INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Zobrazené výsledky MBS simulací jasně ukazují velký potenciál pro snížení opotřebení kol a kolejnic u tramvajových vozidel při využití aktivního natáčení dvojkolí do oblouků. Výrazných úspor tak pomocí této technologie jde dosáhnout zejména v rámci údržby kolejnic, údržby kol vozidel, kdy nebude tak často nutné provádět reprofilaci kol vozidla a následně i výměnu obručí kol tramvaje. Dále dojde ke snížení energie, která disipuje v kontaktu kola s kolejnicí a lze tak snížit energetickou náročnost vozidla.

Velkým přínosem může být též umožnění nasazení vozidel s neotočnými podvozky na obloukovité tratě, kde by s pasivním vypružením dosahovala příliš vysokého opotřebení kol a kolejnic. Tato vozidla jsou vzhledem k menšímu počtu podvozků levnější a kapacitnější.

Na druhou stranu lze očekávat výrazně navýšenou cenu vozidla o systém aktivního natáčení a též zvýšené náklady na údržbu vozidla, jelikož se v podvozku vozidla bude nacházet hydraulický systém.

Je tedy velkou otázkou, zda při využití aktuátorů s menší hodnotou maximálního výsuvu do podvozků současné konstrukce by přineslo výraznější snížení nákladů životního cyklu vozidla. Lze předpokládat, že při takovémto využití technologie aktivního natáčení bude vliv na náklady životního cyklu velmi záležet na konkrétním konceptu vozidla, tratích, pro které je určeno a dalších okrajových podmínkách provozu.

Naopak při využití plného potenciálu aktivního natáčení dvojkolí, které by znamenalo přijít s novou konstrukcí tramvajového podvozku lze předpokládat, že dojde k výraznému snížení nákladů životního cyklu vozidla.

7 ZÁVĚR

Článek představuje komplexní pohled na problematiku využití technologie aktivního rejdivání dvojkolí pomocí aktuátorů umístěných v podvozku v rámci primárního vypružení. Autoři pracují s myšlenkou implementace již vyvinutého aktuátoru pro konvenční železnici i do tramvajových vozidel.

Vzhledem ke specifickým tramvajového provozu však autoři pracují s jiným způsobem řízení aktuátoru. V článku je představen koncept dopředného řízení na základě digitální mapy trati a polohy vozidla. Tento koncept vychází z již v některých tramvajových provezech využívané technologie a přináší relativně jednoduchý a zároveň dostatečně robustní způsob řízení aktivních prvků. Dvojkolí je pak natáčeno ještě před vjezdem do oblouku, aby byl přínos aktivního natáčení maximalizován.

Dále je v článku představena rozměrová analýza a analýza dopadů aktivního rejdivání dvojkolí na další prvky pojezdu. Z této analýzy je patrné, že bude krajně problematické aplikovat zvolené aktuátory do podvozků moderních tramvají současné konstrukce, a to zejména z důvodu větších rozměrů aktivního prvku oproti nynějším klasickým silentblokům umístěných v kyvných ramenech vedoucích dvojkolí. Druhým stěžejním důvodem je poté velmi složitě dosažitelné umožnění vzájemných pohybů dvojkolí a primárně vypružených hmot. Pro umožnění těchto pohybů by bylo třeba vyvinout zcela nové primární vypružení, u kterého lze předpokládat též větší rozměry, a tedy i velmi komplikovatelnou zastavitelnost do velmi omezeného prostoru v podvozku nízkopodlažní tramvaje. Vzhledem k výše provedené analýze autoři docházejí k závěru, že současné vypružení je modifikovatelné bez výraznějších zásahů do současné konstrukce podvozků, tak aby bylo umožněno aktivního natáčení dvojkolí o ± 5 mm.

Na základě simulací jízdy článkové tramvaje s pasivním i aktivním vedením dvojkolí v podvozcích po trati odpovídající reálnému úseku z pražské tramvajové sítě je ukázán přínos aktivního natáčení dvojkolí. Dle zvoleného maximálního výsuvu aktuátorů došlo ke snížení indexu opotřebení za různých okrajových podmínek simulace v průměru o 75 %, 66 % či o 46 % pro maximální výsuv aktuátoru 26,325 mm, 15 mm respektive 5 mm oproti vozidlu s pasivním vedením dvojkolí.

I přes relativně velký přínos ke snížení opotřebení kol a kolejnic i u varianty s dnešní konstrukcí podvozků dosažitelným natočením dvojkolí, je třeba zmínit, že vývoj takového systému do vozidla a následně i pořizovací cena vozidla s aktivním vypružením bude natolik vysoká, že aby došlo ke snížení nákladů životního cyklu vozidla, bude vždy záležet na konkrétním využití vozidla.

Jako optimální varianta se jeví využití již vyvinutého aktivního prvku s nasazením nového řízení a vývojem nové konstrukce podvozku, který by umožnil výsuv aktuátorů o ± 15 mm. V této variantě nebude třeba vyvíjet nový aktuátor a zároveň bude dostatečně využit potenciál technologie aktivního natáčení dvojkolí pro většinu tramvajových provozů.

Příspěvek byl vytvořen s finanční podporou Technologické Agentury České republiky, projekt č. TE01020054 "Bozek Vehicle Engineering – National Competence Center".



Literatura

- [1] VRBA, J., KOLÁŘ, J. Možnosti aplikace aktivních prvků v kolejových vozidlech. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech: XXV. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: DFJP Univerzity Pardubice, 2021, s. 121–130. ISBN 978-80-7560-377-7.

- [2] Liebherr. *Liebherr – Controlled Axle Steering (LiCAS)*. Online. YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uutTVgqnc0Y>. [citováno 2025-06-02]
- [3] *LiCAS passes test successfully*. Online. Liebherr. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/latest-news/news-press-releases/detail/licas-passes-test-successfully.html>. [citováno 2025-06-02]
- [4] FU, B., BRUNI, S. *Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system*. Online. Vehicle System Dynamics. Vol. 60 (2022), no. 3, s. 810–834. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1838563>. [citováno 2025-06-02]
- [5] HORŇÁK, R. EMA umí mazat či omezit rychlost. *DP Kontakt*. Roč. 23 (2018), č. 1, s. 12–14.
- [6] VRBA, J. Optimalizace algoritmu aktivního natáčení dvojkolí kloubové tramvaje v obloucích s velmi malými poloměry. In: *Sborník příspěvků konference ŽELVA 2024*. Praha: ČVUT v Praze, 2024, s. 73–85. ISBN 978-80-01-07332-2. Dostupné z: https://konferencezelva.cz/soubory/SBORNIK_final_ZELVA_2024.pdf. [citováno 2025-06-02]
- [7] VRBA, J. Reduction of wheel and rail wear by application of actuators in the primary suspension of an articulated tram. In: *IRSA 2023: Tagungsband/proceedings*. Hamburg: DVV Media group Eurailpress, 2024, s. 248–263.

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

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: doc. Ing. Ján Dižo, PhD. (Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta), doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).