

# MOŽNOSTI APLIKACE AKTIVNÍCH PRVKŮ V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH

## POSSIBILITIES OF APPLICATION OF ACTIVE ELEMENTS IN ROLLING STOCK

Josef KOLÁŘ<sup>1</sup>, Jan VRBA<sup>2</sup>

### Abstrakt

Článek představuje příklady použití aktivních prvků v pojezdu kolejových vozidel a výsledky výzkumu prezentované v minulých letech v této oblasti. V článku jsou představeny jednotlivé způsoby zlepšení chodových vlastností kolejových vozidel pomocí aktivně řízených prvků. Autoři se dále zamýšlejí nad budoucím rozvojem aktivních prvků v pojezdech kolejových vozidel v souvislosti se současnými trendy v železničním průmyslu.

### Klíčová slova

aktivní prvek, aktuátor, kolejové vozidlo, pojezd, aktivní natáčení

### Abstract

*This article presents examples of the use of active elements in the rolling stock and research results about this topic presented in recent years. The contribution outlines different ways to improve running characteristics of rail vehicles by application actively controlled elements. The authors also reflect on the future development of active elements in rolling stock running gear in connection with current trends in the railway industry.*

### Keywords

*active element, actuator, rolling stock, running gear, active steering*

## 1 ÚVOD

Aktivní prvek (aktuátor) je silový prvek použitý v konstrukci kolejového vozidla, s jehož pomocí můžeme aktivním způsobem ovlivnit jízdní a silové účinky kolejového vozidla v interakci s tratí.

Ač by se tak mohlo zdát, využití aktivně řízených prvků v pojezdech kolejových vozidel není žádnou novinkou. Vzduchové válce umístěné mezi skříní lokomotivy a rámem podvozku byly použity již v 50. letech 20. století za účelem dosažení mechanického optima na zahraničních (SLM) i domácích lokomotivách (Škoda E 499.0). Prudce se rozvíjející oblasti elektrotechniky, sensoriky či kontrolerů však umožňují využití aktivních prvků v daleko širším rozsahu a podporují tak snahu o vývoj rychlejších, komfortnějších, úspornějších a v neposlední řadě bezpečnějších kolejových vozidel. I přes několik dekád vývoje a výzkumu v oblasti aktivních prvků aplikovaných v pojezdu kolejového vozidla však nelze konstatovat, že by jejich využití bylo v pojezdech nových kolejových vozidel masivněji rozšířeno.

Článek si klade za cíl seznámit čtenáře s využitím aktivních prvků v pojezdech kolejových vozidel, výhodami i výzvami jejich širšího rozšíření a s pracemi publikovanými v posledních letech prezentujícími výstupy výzkumu v této oblasti. V závěru článku je pak představeno krátké zamýšlení, jak ovlivní využití aktivních prvků postupný nástup autonomního řízení kolejových vozidel či další technologický pokrok na Železnici - 4.0.

<sup>1</sup> doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 160 00 Praha 6., e-mail: josef.kolar@fs.cvut.cz

<sup>2</sup> 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

## 2 ROZDĚLENÍ AKTIVNÍCH PRVKŮ V POJEZDU KOLEJOVÉHO VOZIDLA

Rozdělení využití aktivních prvků lze nejlépe provést dle jejich umístění v pojezdu kolejového vozidla na aktivní prvky použité v rámci sekundárního vypružení a v rámci primárního vypružení. Jako speciální podkategorii prvků v sekundárním vypružení je možné označit aktivní prvky využitě k naklápění vozové skříně či koncepce umístění aktivních prvků mezi vozové skříně vlakové jednotky nebo člankové tramvaje ve vertikálním či příčném směru.

Jiný přístup k rozdělení aktivních prvků představuje Stichel a kol. [1] a to dle účelu jejich použití. Takto lze aktivní prvky rozdělit na čtyři kategorie:

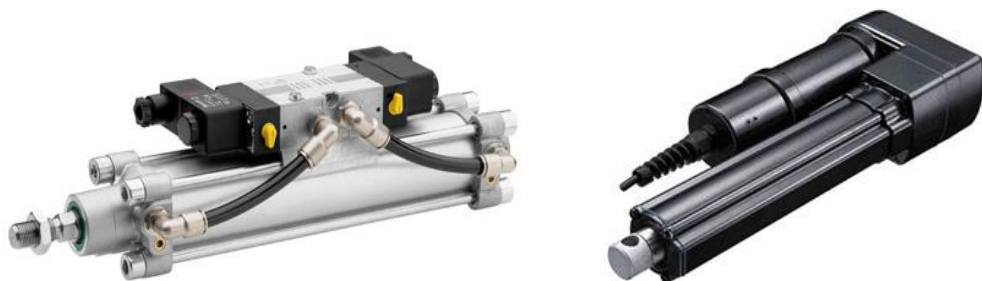
- aktivní prvky izolující skříní vozidla od nerovností koleje (zvýšení jízdního komfortu),
- aktivní prvky ovládající kinematiku podvozku (zajištění stability chodu),
- aktivní prvky natáčející a vedoucí dvojkolí (radiální stavění dvojkolí do oblouku),
- aktivní prvky pro další speciální účely (naklápění vozové skříně, rovnoměrnější zatížení podvozků, dorovnávání výšky podlahy vůči nástupišti, ...).

Aktuátory lze také rozdělit z hlediska výchozího zdroje síly, kterou vyvozují, na pneumatické, hydraulické, elektro-hydraulické či elektrické. Informace ohledně jejich vlastností či technické vyspělosti lze s výhodou čerpat z oboru civilního letectví, kde je využívání aktuátorů mnohem rozšířenější, a ve kterém zatím výrazně převažuje využití hydraulických a elektro-hydraulických aktuátorů.

Hydraulické aktuátory jsou velmi často používané v letectví pro jejich technickou vyspělost, vysokou výkonovou hustotu či díky dobrému zajištění bezpečnosti při poruše. Obvykle jsou aktuátory napájeny z jedné centrální pumpy produkující konstantní tlak oleje a řízení jeho toku probíhá pomocí servoventilů (tzv. koncept „Fly by wire“).

Další často používané aktuátory jsou elektro-hydraulické, které fungují dle konceptu „Power by wire“, kdy má každý aktuátor vlastní servomotor řídící pampu, která produkuje tlak a průtok kapaliny dle aktuální potřeby. Toto řešení přináší snížení hmotnosti, jelikož odpadá nutnost použití rozvodů, reservoáru oleje či ventilů.

Za nejméně technicky ověřený, ale za to velmi nadějný pro budoucí použití lze označit elektro-mechanický aktuátor. Tento typ aktuátoru je nejlépe říditelný, nejlehčí, nejméně náročný na údržbu, avšak může u něho dojít k mechanickému zaseknutí při špatné funkci pohybového šroubu. Tento typ aktuátoru je použit v elektrických jednotkách k naklápění vozové skříně [28], viz Obr. 3.



Obr. 1 Elektro-hydraulický aktuátor (vlevo), elektro-mechanický aktuátor (vpravo)

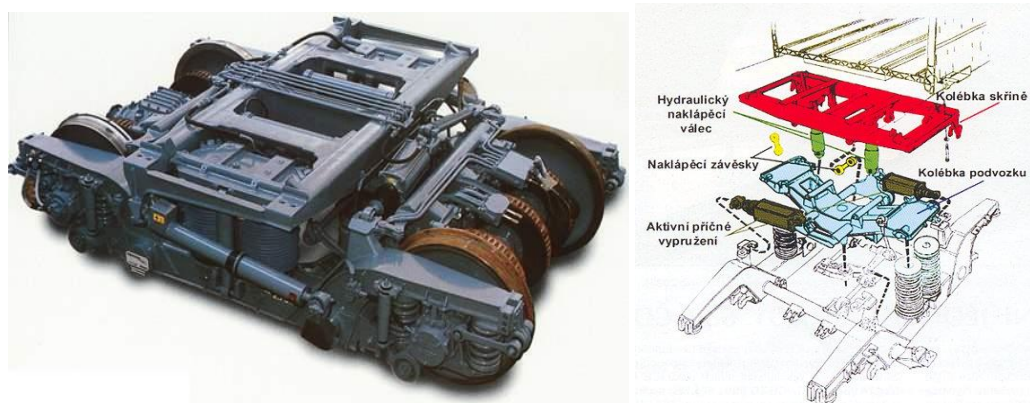
## 3 VYUŽITÍ AKTIVNÍCH PRVKŮ V SEKUNDÁRNÍM VYPRUŽENÍ

Aktivní prvky v sekundárním vypružení jsou aplikovány primárně za účelem zlepšení jízdního komfortu, umožnění zvýšení rychlosti při stejné kvalitě trati či zachováním komfortu jízdy při špatné kvalitě trati [1]. Vzhledem k tomu, že tyto požadavky je ve valné většině případů schopno zajistit

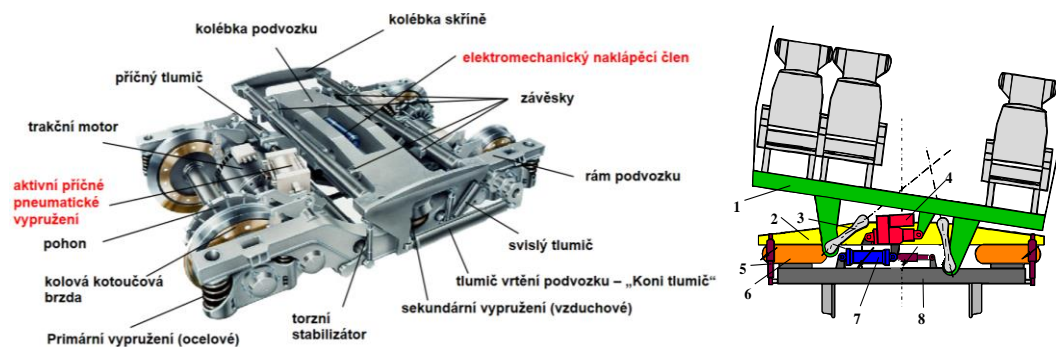
i pasivní sekundární vypružení, není využití aktivních prvků v sekundárním vypružení věnována taková pozornost jako aktivním prvkům v primárním vypružení. Výjimku pak tvoří pouze aktuátory, které jsou umístěny na místo tlumičů vrtivých pohybů podvozku pod vozovou skříní, s cílem zlepšit průjezd vozidla oblouky malých poloměrů a stabilizovat chod vozidla na přímé trati.

### 3.1 Aktivní prvky sekundárního vypružení pro zlepšení jízdního komfortu

Jednou z prvních aplikací, kde našly aktivní prvky své využití, je aktivní naklápění vozové skříně vozidla do oblouku. To umožňuje redukcí příčné síly působící na cestujícího a tím pádem zvyšuje jízdní komfort pro cestující, případně umožňuje zvýšení maximální rychlosti při průjezdu vozidla směrovými oblouky menších poloměrů. Aktivní naklápění vozové skříně je již dosti prozkoumaná i aplikovaná technologie (patent Fiat z roku 1967, v pravidelném provozu od roku 1976) a je využíváno od poloviny 70. let 20. století, viz Obr. 2 a Obr. 3.



**Obr. 2** Podvozek VT 610 jednotky Pendolino s hydraulickými aktuátory naklápění a s pneumatickými aktuátory příčného vypružení



**Obr. 3** Podvozek SF 600 s elektromechanickým aktuátorem naklápění a pneumatickým aktuátorem příčného vypružení

V roce 2007 bylo poprvé implementováno i do rychlovlaku v Japonsku, a to do Shinkansenu Series N700 [1,2].

Umístění aktivních prvků v sekundárním vypružení lze provést buď do série či paralelně s pasivními prvky vypružení, případně pasivní prvky nahradit aktivně řízenými. Vzhledem k bezpečnosti při selhání aktivního prvku a vzhledem k dynamickým charakteristikám různých aktuátorů, se jeví jako výhodnější použít aktivně řízené prvky spolu s těmi pasivními. Při jejich umístění paralelně s aktuátory mohou pasivní prvky přenášet statická a kvazistatická zatížení, což

snižuje požadavky na dimenzování aktuátorů [1]. V případě použití aktivních prvků v sérii s pasivními, mohou pasivní pružiny izolovat vysokofrekvenční buzení, na které by aktivní prvky nebyly schopny účinně reagovat.

Výzkumu využití aktivních prvků v sekundárním vypružení byla věnována pozornost mnoha výzkumných týmů již od osmdesátých let minulého století. Postupně bylo představeno jak mnoho koncepcí umístění a konstrukčního řešení aktivních prvků, tak hlavně způsobů jejich řízení. Aplikovány do komerčních vozidel jsou zatím však jen aktivní prvky příčného vypružení, které byly použity například v italských vysokorychlostních jednotkách ETR 1000 [1]. Širšímu rozšíření aplikace do vozidel brání především vysoká cena implementace, náročná údržba a otázky ohledně bezpečnosti vozidla v případě poruchy aktivního prvku.

Komplexní návrh využití příčných elektromagnetických aktuátorů v sekundárním vypružení, který je přívětivější z hlediska ceny, údržby i bezpečnosti, představil v nedávné době Park a kol. [3]. Cílem navrženého řešení je snížení přenosu příčných zrychlení od nerovností trati na skříň vozidla při vyšších rychlostech a tím zvýšit jízdní komfort. Za pozornost také stojí představené bezpečnostní schéma v případě poruchy. V prvním kroku je porovnávána rychlost vozidla a teplota v aktuátoru s limitními hodnotami daných veličin. Pakliže rychlost vozidla je nižší než nastavený limit, je aktuátor vypnut z funkce pro snížení spotřeby energie, předejít poruše aktuátoru či nevhodnému působení aktuátoru v obloucích s velkým stavebním převýšením. Teplota aktuátoru má dva limitní stavy. Při dosažení prvního limitu je snížena síla aktuátoru na 60 %, v druhém limitním stavu je pak aktuátor deaktivován. Vozidlo je taktéž vybaveno dalšími senzory, jejichž výstupy jsou porovnávány s výstupy senzorů použitých pro řízení aktivního prvku. Dále jsou paralelně s aktuátory řazeny příčné hydraulické pasivní tlumiče. Výsledky simulací, testů na kladkovém stavu i na běžných vozidlech ukazují zlepšení jízdního komfortu a zároveň byla ověřena i bezpečnost při selhání aktivního prvku či jeho řízení.

Využití vertikálních aktivně řízených prvků v sekundárním vypružení je výrazně menší. Rozsáhlý výzkum jejich aplikace byl proveden na zmenšeném modelu rychlovlaku Shinkansen. Postupnými testy bylo dosaženo řešení, kdy bylo využito aktivní řízení vzduchového vypružení, tak aby nedošlo k rezonanci prvního tvaru ohybového kmitání a protiběžné frekvence houpání vozidla. Aktivní vypružení je tak řízeno pomocí změny tlaku ve vzduchových pružinách na základě dat z akcelerometrů umístěných na okrajích a ve středu skříň vozidla. S tímto řešením bylo dosaženo na zmenšeném zkušební stavu uspokojivých výsledků jízdního komfortu [1, 4].

Testům aktivního vertikálního sekundárního vypružení na trati se věnovali Qazizadeh a kol. [5]. Na vysokorychlostní jednotce Regina 250 (Bombardier) byly na místo vertikálních i příčných tlumičů sekundárního vypružení použity aktivně řízené elektro-hydraulické aktuátory. Testy probíhaly na dvouvozové jednotce, kde jeden vůz byl vybaven aktivními prvky vypružení a druhý nikoliv. Na základě testů na několika švédských tratích s maximální rychlostí 200 km/hod bylo dosaženo zlepšení jízdního komfortu až o 38 %. Dále bylo zjištěno, že aktivní vertikální vypružení je účinnější při vyšších úrovních vibrací, což znamená další možnosti zlepšení jízdního komfortu pro vyšší rychlosti či horší kvalitu trati.

### **3.2 Aktivní prvky sekundárního vypružení pro zlepšení chodových vlastností**

Na rozdíl od výše zmíněných aplikací aktivních prvků v sekundárním vypružení kolejových vozidel, umístění aktuátoru namísto tlumiče vrtivých pohybů nesleduje primárně zlepšení jízdního komfortu, ale snížení vodících sil při průjezdu oblouky malých poloměrů, zlepšení stability chodu a zvýšení kritické rychlosti vozidla. Aplikací takto umístěných aktuátorů je snaha dosáhnout obdobných cílů jako u aktivního primárního vypružení. Samotný efekt natáčení podvozku do oblouku není tak účinný jako při použití aktuátorů v primárním vypružení, nicméně zlepšuje stabilitu chodu vozidla, což má za následek i možnost snížení podélné tuhosti primárního vypružení, což se pozitivně projeví právě na snížení úhlu náběhu jednotlivých dvojkolí [26].

Využití aktivně řízených tlumičů vrtivých pohybů podvozku bylo zkoumáno na začátku tisíciletí na kladkovém stavu reálné velikosti a bylo prokázáno snížení kvazistatických příčných sil v kontaktu kolo-kolejnice i zlepšení stability chodu vozidla [6]. Za účelem snížení kvazistatických sil v kontaktu kolo-kolejnice v obloucích malých poloměrů byl u čtyřnápravových vysoce výkonných lokomotiv Siemens (ES64F4, ES64U2) nejdříve zkušebně implementován aktivní tlumič vrtivých pohybů, vyvinutých společností Liebherr, a k sériovému použití tohoto aktivního tlumiče došlo u nové řady lokomotiv Vectron [7], viz Obr. 4 [32].



Obr. 4 Elektrohydraulický aktuátor Liebherr a jeho zástavba do podvozku lokomotivy Vectron

V roce 2020 bylo výzkumnými pracovníky z VUT Brno a ze Škody Transportation a.s. vyzkoušeno použití semiaktivního magnetoreologického tlumiče vrtivých pohybů v pojezdu elektrické lokomotivy 109 E, viz Obr. 5 [31]. Toto experimentálně testované řešení může představovat dobrý kompromis mezi aktivním a pasivním řešením tlumení vrtivých pohybů, neboť proti aktuátoru přináší zjednodušení a zmenšení velikosti tlumiče, zvýšení spolehlivosti a jednodušší zajištění bezpečnosti jízdy vozidla při poruše aktivního řízení tlumiče (aktuátoru).



Obr. 5 Magnetoreologický tlumič a jeho zástavba do pojezdu lokomotivy ř. 109 E

V roce 2021 publikovaná práce [8] pak představuje semiaktivní řešení hydraulického tlumiče vrtivých pohybů podvozku s cílem zvýšit maximální rychlost vysokorychlostní jednotky. Představené řešení opět nabízí dobrý kompromis mezi aktivním a pasivním řešením řízení vrtivých pohybů podvozků. V práci jsou porovnány pomocí kosimulace MBS softwaru a matematického modelu řízení různé způsoby řízení semiaktivního prvku i řešení s klasickým tlumičem vrtivých pohybů.

Obdobných cílů se snaží dosáhnout i tým ze Southwest JiaoTong University [9]. Na rozdíl od předchozího řešení, však bylo zvoleno příčné umístění dvou aktuátorů na přední a zadní čelník rámu podvozku. Provedené simulace potvrdily výrazné zlepšení stability chodu vozidla u obou zmíněných projektů. V druhém případě autoři výsledky simulací potvrdili i na experimentálním kladkovém stavu.

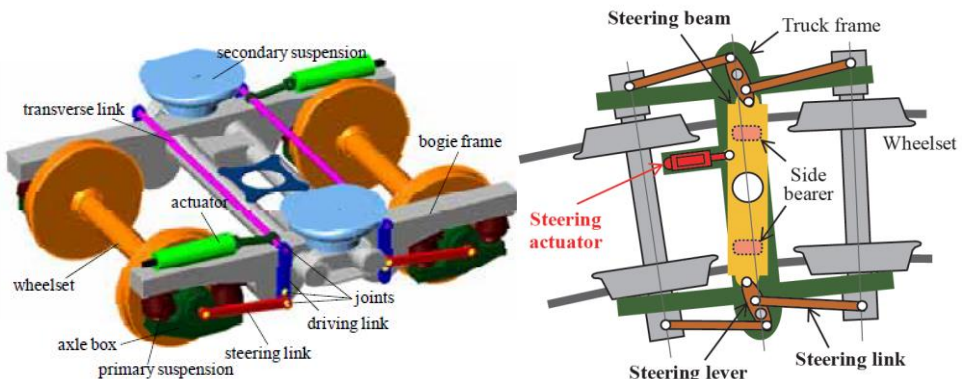
## 4 VYUŽITÍ AKTIVNÍCH PRVKŮ V PRIMÁRNÍM VYPRUŽENÍ

Umístění aktivního prvku v rámci primárního vypružení může vést k nejmarkantnějšímu zlepšení chodových vlastností kolejových vozidel, a to zejména ve dvou oblastech. První oblastí je průjezd oblouky malých poloměrů, kdy profil kol dvojkolí již nevládá fungovat jako přirozený diferenciál a dochází k výrazným skluzovým silám, které vedou ke zvýšenému opotřebení kol a kolejnic a emisím hluku a vibrací. Druhou oblastí je pak jízda vysokou rychlostí, kdy dvojkolí ztrácí svoji stabilitu chodu v koleji a může dojít k vykolejení vozidla. Snížením opotřebení kol a kolejnic lze výrazně snížit náklady na železniční provoz a je zde tedy nejlepší možnost komercializace případného úspěchu. Mimo jiné i z tohoto důvodu je vývoji aktivních prvků umístěných v rámci primárního vypružení a momentovému řízení nezávisle otočných kol věnována v posledních letech největší pozornost.

### 4.1 Aktivní natáčení klasických dvojkolí

Natáčení dvojkolí je u klasických dvounápravových podvozků možné provádět více způsoby v závislosti na umístění a typu aktuatorů, nicméně jeden způsob aktivního vedení dvojkolí převažuje. Jedná se umístění aktuatorů podélně na obě strany dvojkolí, případně obdobně umístěných mechanismů ovládaných aktuatorem umístěným na rámu podvozku, tak, že aktivní prvek či táhla mechanismu zajišťují přenos tažných sil z dvojkolí na rám podvozku. Samotná dále představená řešení se pak liší z hlediska konstrukce zejména v počtu použitých aktuatorů. Aktivní prvek v tomto uspořádání přemáhá podélnou tuhost primárního vypružení, kterou nelze u pružin, ať už pryžokovových či vinutých šroubových, plně odstranit. To vede k nutnosti dimenzovat aktivní prvek na větší síly a dochází tak i ke zvětšení zástavbových rozměrů aktivních prvků. Na druhou stranu v případě poruchy aktivního prvku a jeho vyřazení bude vozidlo schopné jízdy, pakliže bude jeho primární vypružení mít dostatečnou podélnou tuhost. To zvyšuje bezpečnost použití aktivního natáčení dvojkolí.

Hlavními problémy využití aktivních prvků v primárního vypružení do reálných vozidel jsou stále otázky zajištění bezpečnosti provozu vozidla při poruše aktivního prvku či jeho řízení, cena, náročná údržba aktuatorů a dále pak problém s relativními pohyby mezi dvojkolím a rámem podvozku. Tyto pohyby způsobují komplikace v konstrukci kotoučové brzdy i pohonu.



**Obr. 6** Podvozek s mechanismem aktivního natáčení dvojkolí se dvěma aktuatory (vlevo) [10] a s jedním aktuatorem (vpravo) [11]

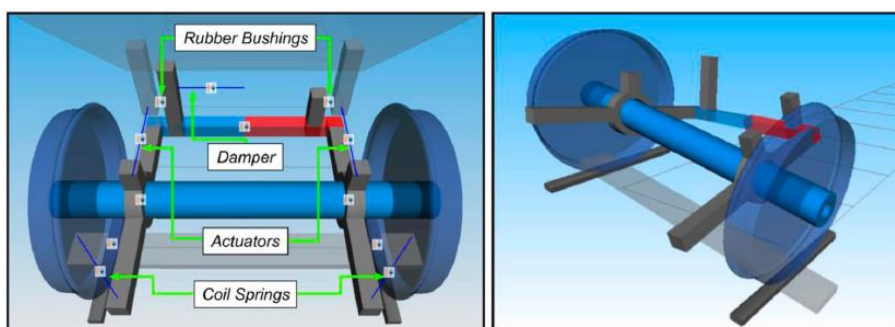
Park a kolektiv [10] představili pro elektrickou městskou jednotku řešení běžného podvozku s aktivním natáčením dvojkolí. Mechanismus aktivního radiálního stavění dvojkolí do oblouku (Obr. 6 vlevo) se skládá z aktuatoru umístěného na rámu podvozku, příčného propojení, vertikálních táhel a táhel kloubově upevněných na ložiskové komory. Na každé straně dvojkolí je toto táhlo uchyceno v jiné poloze k vertikálnímu táhlu, aby bylo docíleno správného ovlivnění polohy dvojkolí. U druhého

dvojkolí podvozku je tento systém aktivního natáčení aplikován zrcadlově. Autoři na základě provedených výpočtů uvádějí snížení indexu opotřebenění na takto aktivně řízeném podvozku až o 80% oproti klasickému podvozku. Provedené testy na zmenšeném experimentálním vozidle prokázaly snížení příčných sil až o 70%.

Redukci počtu řídicích prvků pro dvounápravový podvozek na jeden představil Umehara a kol. [11]. Použití pouze jednoho aktivního prvku vede ke zvýšení ovládací síly a tlaku v aktuátoru, což vede ke zvětšení aktuátoru a možným problémům s jeho umístěním na rám podvozku. Na druhou stranu je zde možnost zlevnění a zlepšení spolehlivosti celého systému. Pomocí v článku představeného mechanismu (Obr. 6 vpravo) je dosaženo snížení úhlu náběhu obou dvojkolí podvozku pouze pomocí jednoho elektro-hydraulického aktuátoru, který je navrhnut již s implementací bezpečnostního hydraulického okruhu zajišťujícího bezpečnost vozidla při jeho poruše. Provedené testy na reálném voze vybaveném jedním podvozkem s aktivním natáčením a druhým klasickým podvozkem prokázaly snížení příčných sil na přechodnici až o 60% při využití maximální síly aktuátoru.

Ještě dále se dostali se svým konceptem aktivního natáčení dvojkolí Hur a kol. [12], kteří provedli testy za běžného provozu. Autoři se věnují návrhu podvozku městské elektrické jednotky s aktivním natáčením dvojkolí do oblouku. Vedení obou dvojkolí v podvozku je provedeno pomocí dvou aktuátorů umístěných podélně na stranách rámu podvozku. Každý aktuátor natáčí zároveň obě dvojkolí. Podvozek je také opatřen měřicí jednotkou, která je schopna detekovat poloměr oblouku. Systém aktivního natáčení je vybaven autodiagnostickou funkcí a fail-safe funkcí, která při poruše systému zajistí přechod do módu pasivního vedení dvojkolí. Při měření na experimentální dráze bylo zjištěno jednak snížení úhlu náběhu na čtvrtinu, což vedlo k radikálnímu snížení příčných sil v kontaktu kolo kolejnice a redukcí indexu opotřebenění na třetinu oproti podvozku s pasivním vedením dvojkolí. Při testech za běžného provozu elektrické jednotky bylo po ujetí 1000 km zkontrolováno opotřebenění, a zatímco u třetího vozu šestivozové jednotky s aktivním vedením dvojkolí nebylo opotřebenění zjištěno, u referenčního čelního vozu bylo naměřeno opotřebenění kol 0,54 mm.

Návrhem spolehlivého řídicího algoritmu pro inovativní dvounápravový vůz madridského metra se zabývá Stichel a kol. [13]. Vozidlo by mělo mít pouze jeden stupeň vypružení, aktivní vedení dvojkolí by zajišťovala dvojice aktuátorů upevněných na kompozitní rám, který slouží jednak jako nosný prvek, ale také jako součást vypružení vozidla – torzní stabilizátor.



**Obr. 7** Model inovativního podvozku v prostředí Simpack [13]

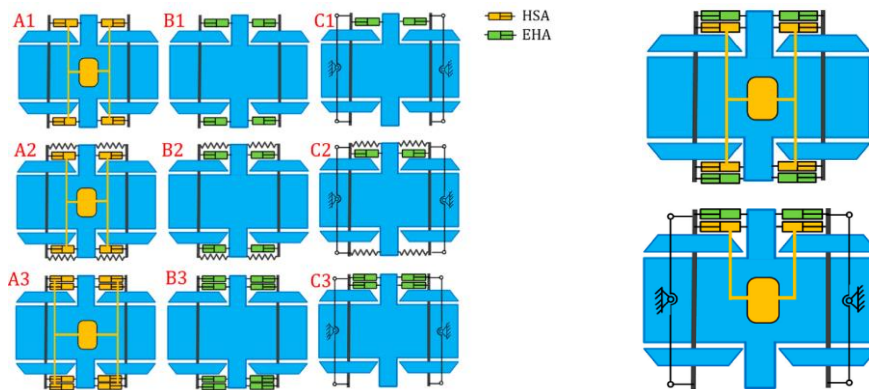
Autoři na základě velkého množství jízdních simulací v MBS softwaru porovnávají různé způsoby zpětnovazebního řízení aktuátorů. Na základě definované nákladové funkce, která jednak zohledňuje síly v kontaktu kola a kolejnice, existenci druhého dotykového bodu mezi kolem a kolejnicí, ale také potřebnou velikost síly vyvozenou aktivním prvkem, autoři dokazují, že výhodnost jednotlivých způsobů zpětnovazebního řízení se výrazně mění s ekvivalentní konicitou, poloměrem projížděného oblouku a dalších faktorech. Ve snaze najít univerzální řešení způsobu řízení pro všechny případy provozu vozidla, které by vyhovovalo výše popsaným požadavkům, představují

autoři článku řízení pomocí dopředné regulace. Rozložení sil aktuátorů je determinováno pomocí dříve zmíněné nákladové funkce. Vstupem do regulačního řetězce jsou informace o nevykompenzovaném příčném zrychlení a o poloměru projížděného oblouku.

Navržené dopředné řízení podrobili autoři simulacím, do kterých byly zahrnuty i nerovnosti koleje. Výsledky simulačních výpočtů ukazují velký pokles disipované energie při použití aktivního natáčení dvojkolí do oblouku. V závislosti na poloměru oblouku, a zda se jedná o zadní či přední dvojkolí bylo dosaženo poklesu disipované energie v rozmezí 75-99 %.

Využití aktivních prvků pro natáčení dvojkolí představila společnost CRRC na vozidlech metra Cetrovo. Natáčení dvojkolí je provedeno pomocí hydraulických servo aktuátorů. Potřebný pohyb aktuátoru je vypočítáván na základě znalosti poloměru projížděného oblouku. Tuto informaci získává řídicí systém vozidla z databáze prostředí v kooperaci s technologií lokalizace. První testování v provozu ukazují výrazné snížení řídicích sil v kontaktu kolo-kolejnice a taktéž snížení hlukových emisí [1, 14].

Velmi důležitou otázkou bezpečnosti využití aktivních prvků v primárním vypružení kolejového vozidla se zabývají Fu a Bruni [28], kteří porovnali devět různých schémat aplikace aktivních prvků v rámci primárního vypružení (Obr. 8 vlevo). Pro hodnocení odolnosti proti poruše systému se autoři inspirovali v leteckém průmyslu, který je v tomto odvětví výrazně dále, a využili porovnání z hlediska čísla priority rizika a navrhli metodiku způsobu hodnocení schopnosti odolávat poruchám. Číslo priority rizika je určováno na základě dvou hlavních kritérií, závažnosti poruchy ve smyslu ekonomických ztrát či zranění osob a pravděpodobnosti, že dojde k selhání. Třetím doplňkovým kritériem může být schopnost detekovat poruchu pomocí monitorovacího systému, která v této práci nebyla zahrnuta, avšak lze předpokládat, že pro samotné uplatnění aktivních prvků bude hrát klíčovou roli. Efekty možných poruch, jako jsou nulová síla v aktuátoru, vyvození opačné maximální síly jedním či všemi aktuátory atp. byly simulovány pomocí MBS simulací.



**Obr. 8** Navržená možná schémata aplikace aktivních prvků (vlevo), nejvhodnější schémata z hlediska bezpečnosti (vpravo), HSA – hydraulický aktuátor, EHA – elektro-hydraulický aktuátor [28]

Z hlediska nejnižší hodnoty čísla priority rizika vychází nejlépe navržené schéma C3, do výpočtu však nebyla zvažována porucha mechanických částí mechanismu aktivního natáčení dvojkolí. Při hodnocení poruchovosti pro schémata s redundantními akčními členy bylo dále předpokládáno, že každý akční člen může pracovat samostatně. Za určitých okolností však mohou příčiny, které vedou k selhání jednoho z aktuátorů, ovlivnit i ten záložní. Z tohoto důvodu je v takovém případě vhodnější pro dva kanály jiný řídicí software a různé typy aktuátorů. Autoři tak závěrem navrhnou nejvhodnější schéma aplikace aktuátorů z hlediska bezpečnosti, které kombinuje hydraulický a elektro-hydraulický aktuátor (Obr. 8 vpravo). V leteckém průmyslu je integrace hydraulického a elektro-hydraulického aktivního prvku přijata jako běžně používané technické řešení.



## 4.2 Aktivní řízení nezávisle otočných kol

Omezeními klasického dvojkolí jsou primárně nestabilita chodu při vysokých rychlostech a velké skluzové síly při průjezdu oblouky malých poloměrů, kdy dvojkolí nezvládá fungovat jako přirozený diferenciál. Další nevýhodou klasických dvojkolí je složitá realizace nízkopodlažních vozidel. Tyto problémy řeší použití nezávisle otočných kol (NOK), kdy nejsou kola na obou stranách podvozku spojena torzní vazbou a mohou mít tak různé úhlové rychlosti. Čisté odvalování tak není závislé na příčné výchylce dvojkolí, což redukuje opotřebenění kol i kolejnic.

I přes výhody využití NOK došlo k jejich výraznějšímu rozšíření pouze u tramvajových vozidel, která často projíždějí oblouky velmi malých poloměrů a je zde také velká snaha o nízkopodlažnost v celém prostoru vozidla. Nevýhodami využití NOK je ztráta schopnosti sinusového chodu dvojkolí v kolejovém kanále, horší komfort jízdy [15], ale také větší náchylnost na šplhání okolku při příčných i svislých nerovnostech trati, a tedy i vyšší požadavky na kvalitu geometrické polohy koleje (GPK).

I u NOK se na přelomu tisíciletí zabýval Goodall a kol. [18] natáčením nápravnice s NOK pomocí přivedení momentu vyvozeného aktuátorem připevněným k rámu podvozku. Přestože simulační výpočty prokázaly zlepšení kvality chodu vozidla (o 17 % oproti vozidlu s pasivními prvky vypružení) nebyl tento způsob aktivního vedení nápravnice s NOK dále, až na níže uvedenou výjimku, příliš rozvíjen a větší pozornost je v současné době věnována momentovému řízení trakčních motorů.

Problémy spojené s použitím NOK se výzkumníci snaží řešit řízením hnacího momentu jednotlivých trakčních motorů, které umožňuje, aby na každé kolo působil jiný hnací moment, čímž by byly ovlivňovány jízdní vlastnosti vozidla. Pro řízení každého motoru zvlášť je však zapotřebí mít pro každý motor vlastní trakční měnič, což výrazně prodražuje koncepci pohonu vozidla.

Myšlenkou využití trakčního motoru jako aktivního prvku řízení NOK se zabývá velká řada výzkumných týmů. Konowrocki a kol. [16] porovnává metody řízení dle počtu použitých trakčních měničů a také varianty řízení s i bez generování brzdného momentu v případě, že je rychlost kola vyšší než rychlost vypočtená matematickým modelem. Nejlepších výsledků simulačních výpočtů bylo dosaženo z hlediska velikosti příčných sil v kontaktu kolo-kolejnice a šplhání kola po okolku u varianty řízení, kdy jsou trakční motory na jedné straně podvozku napájeny z jednoho trakčního měniče. Tento způsob tak redukuje počet trakčních měničů na polovinu oproti běžně uvažovaným řešením.

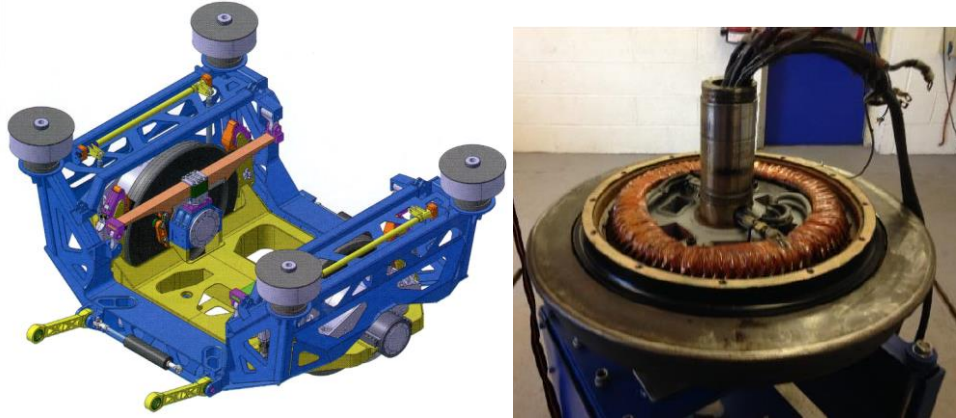
Další z nedávno publikovaných článků zkoumajících momentové řízení NOK představil Liang a kol. [19], který validoval výsledky simulačních výpočtů i na zmenšeném kladkovém stavu. Testy na kladkovém stavu navrženého řízení podvozku s NOK řízenými synchronními motory s permanentními magnety (dále PMSM) pro mělce zahloubené metro se zabývá Ahn a kol. [20]. Čapek pak představil ve své disertační práci [15] způsob řízení NOK, kde vstupní veličinou jsou pouze úhlové rychlosti jednotlivých kol a poloměr oblouku, což výrazně zjednodušuje aplikaci takového řízení do reálných podmínek. V práci je dále upozorněno na fakt, že při jízdě vpřímé trati není hodnota přídatného momentu, který je přičítán k pro všechna kola stejnému hnacímu momentu, nikterak vysoká, ale při průjezdu obloukem však může dosahovat až hodnoty maximálního momentu motoru.

Zmenšené experimentální vozidlo použil Lu a kol. [21] pro ověření svého robustního návrhu řízení pohonu tramvaje s NOK. Řízení funguje na kontrole nulové příčné výchylky, která je měřena pomocí senzoru vířivých proudů na obou stranách podvozku. Měření na experimentálním vozidle i simulační výpočty prokázaly snížení opotřebenění, úhlu náběhu a schopnost řízení se vyrovnat s nerovnostmi na trati a dalšími problémovými stavy.

Na rozdíl od budování kladkového stavu či experimentálního vozidla a dráhy využil Oh a kol. [22] metodu hardwaru ve smyčce pro studium chování kolových motorů v reálném čase. Testovací stav se skládá z trakčního motoru, který je připojen k motoru simulujícímu zátěž. Pro simulaci chování vozidla je pak použit lineární model v MBS softwaru. Řízení pohonu je navrženo na regulaci nulové příčné výchylky portálové nápravy.

S myšlenkou využití volně otočných kol s momentovým řízením trakčních PMSM se dále zabývá výzkumný tým v rámci projektu „Next generation train“ [23, 27]. Autoři zde pracují s myšlenkou

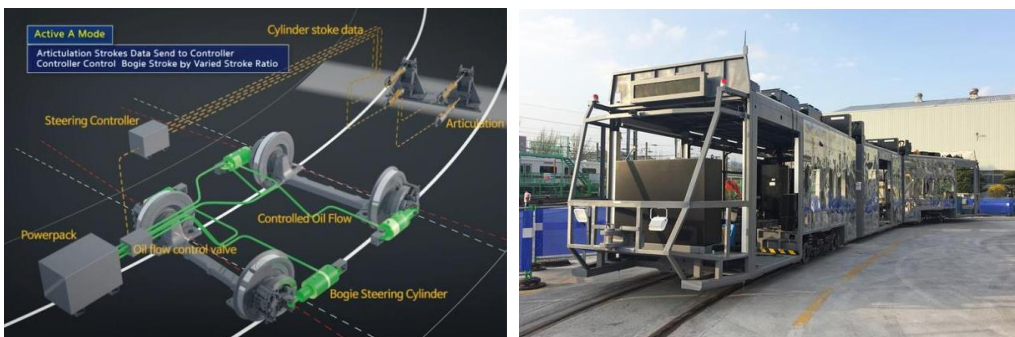
rychlouku skládajícího se z čelních vozů s dvounápravovými podvozky a vložených vozů s jednonápravovými podvozky (Obr. 9 vlevo). Výhodou nastíněného řešení je možnost navržení dvoupodlažní vysokorychlostní jednotky s oběma podlažními plně průchozími po celé délce vlaku. Použití momentově řízených NOK dále přinese stabilitu jízdy i při vysokých rychlostech a snížení příčných sil při projíždění S-oblouky při vjezdech do nádraží.



**Obr. 9** Model jednonápravového podvozku NGT [27] (vlevo), kolový motor vyvinutý společností SET Ltd. [24] (vpravo)

Myšlenkou aplikace momentově řízených kolových PMSM se také zabývá Goodall a kol. [24], který navrhl podvozek tramvajového vozidla s aktivně řízenými kolovými motory vyvinutými společností SET Ltd. (Obr. 9 vpravo). Prototyp podvozku bude testován na historické tramvaji Blackpool tramcar 636.

Ve stejném roce jako bylo představeno metro Cetrovo s aktivním natáčením dvojkolí, představila společnost Hyundai Rottem tramvaj s aktivním řízením průjezdu vozidla obloukem. Systém se skládá z odlišných řešení pro trakční a pro běžný podvozek. U trakčního podvozku s NOK je aplikováno individuální momentové řízení trakčních motorů. Vstupní veličinou pro řízení trakčních motorů je rychlost vozidla a příčná výchylka dvojkolí měřená laserovými senzory a jednotkou měřící úhel natočení dvojkolí. U běžného podvozku rovněž s NOK je natáčení dvojkolí realizováno pomocí čtveřice hydraulických aktuátorů, které jsou řízeny na základě relativního natočení článků vozidla snímaného v mezičláňkovém spojení. V prezentovaném řešení je uvažováno i přibrzdování jednotlivých kol na vnitřní straně projížděného oblouku, které taktéž napomáhá lepšímu průjezdu vozidla obloukem.



**Obr. 10** Model principu natáčení dvojkolí do oblouku na běžném podvozku Hyundai Rottem [30] (vlevo), Zkušební vozidlo Hyundai Rottem s aktivním řízením průjezdu obloukem [29] (vpravo)

Pro ovládnutí algoritmu řízení byla provedena simulace pomocí metody hardwaru ve smyčce. Poté byly zkoušky prováděny na tříčlánkovém vozidle (Obr. 10 vpravo) s trakčním podvozkem pod prvním článkem a běžným podvozkem pod třetím článkem. Výsledky ukazují schopnost průjezdu vozidla obloukem o poloměru 15 m a snížení příčných sil v kontaktu kolo-kolejnice až o 30 %. [29,30]

### 4.3 Zlepšení komfortu jízdy pomocí aktivních prvků v primárním vypružení

Ač se všechna výše představená řešení s aktivními prvky v primárním vypružení věnují zlepšení chodových vlastností vozidla pomocí snížení skluzových sil, lze nalézt i řešení zabývající se primárně zlepšením komfortu jízdy pomocí aktivního prvku ve svislém primárním vypružení. Sugahara a Kojima [25] nedávno představili práci založenou na využití aktivně řízeného svislého tlumiče v primárním vypružení za účelem snížení ohybových vibrací vozové skříň. Kontrolér řídí tlumící sílu na základě informací z akcelerometrů umístěných na rámu podvozku. V článku jsou dále představeny výsledky testů na trati s metrovým rozchodem, které prokazují snížení kmitání skříň vozidla oproti použití vertikálního pasivního hydraulického tlumiče.

### 4.4 Porovnání jednotlivých přístupů ke zlepšení chodových vlastností

Farhat a kol. [26] důkladně porovnal různé koncepty aktivního řízení vozidel z hlediska opotřebení kol a kolejnic či potřebné síly v aktuátorech, jako základ k porovnání použil vozidlo s pasivními prvky vypružení. Práce porovnáva pomocí kosimulace matematického modelu řízení a jízdních simulací v MBS softwaru výše představené koncepty: umístění aktuátoru místo tlumiče vrtivých pohybů, umístění aktuátorů podélně v rámci primárního vypružení a momentové řízení volně otočných kol. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro volně otočná kola (NOK) s momentovým řízením jednotlivých trakčních motorů, u kterých bylo dosaženo nejlepších výsledků příčných sil v kontaktu kolo-kolejnice i opotřebení kol. Z hlediska snižování příčných sil a opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice se jeví koncept s umístěním aktuátoru místo tlumiče vrtivých pohybů podvozku jako nepříliš vhodný, jelikož v obloucích velkých poloměrů a při jízdě na přímé trati dosahuje horších výsledků než klasické pasivní řešení. Při průjezdu oblouky menších poloměrů pak prokazuje nejmenší zlepšení ze všech porovnávaných konceptů aktivního řízení.

## 5 ZÁVĚR

Přestože výhody využití aktivních prvků v pojezdu kolejového vozidla lze považovat za dostatečně prokázané zejména v oblastech snížení opotřebení kol a kolejnic, emisí hluku a vibrací při průjezdu oblouky malých poloměrů, zvýšení maximální rychlosti vozidel či zlepšení jízdního komfortu, zůstává zde stále velká otázka nad bezpečností jejich použití, cenou či náročností údržby. V příspěvku byla představena některá řešení, která berou všechna tato jednotlivá kritéria v úvahu, nicméně je jasné, že je třeba dalšího výzkumu v této oblasti. K dořešení bezpečnostních otázek se jeví jako vhodná inspirace civilním letectvím, u kterého je obor aktivních prvků výrazněji rozvinutý. Dalším poměrně málo dořešeným problémem mohou být vzájemné relativní pohyby dvojkolí a pohonu či brzd.

Nedořešenými otázkami u aktivně řízených volně otočných kol jsou pak primárně velikost řídicího momentu při průjezdu obloukem malých poloměrů, cena a počet trakčních měničů, či nalezení správného algoritmu řízení, aby nedocházelo ke šplhání kol po okolku při nerovnostech koleje či na přechodnicích, jak nastiňují představené odborné práce.

Vzhledem k vývoji autonomního řízení kolejových vozidel lze předpokládat, že dojde k dalšímu rozvoji aktivních prvků, jelikož vozidla budou muset být vybavena senzorkou zajišťující podporu systémů autonomního řízení, jako jsou antikolizní systém či lokalizace vozidla na trati. Lze tak předpokládat zdokonalení systému určování polohy vozidel a jeho propojení s databází trati, ve které

se budou nacházet informace důležité pro autonomní řízení vozidla, a tedy i informace o poloměru směrových oblouků, stavebním převýšení a další informace, které budou moci být dále využity jako vstupy pro řízení aktivního prvku. Je tedy patrné, že při aplikaci těchto systémů budou mít velkou výhodu algoritmy řízení, které budou jako vstupní veličinu využívat poloměr oblouku a další neměnné parametry trať, které lze získat z databáze prostředí a jejich platnost pouze validovat méně přesnými senzory umístěnými na vozidle primárně za jiným účelem (antikolizní systém, high definition mapping atp.). Lze tedy předpokládat, že řízení založené na měření příčné výchylky dvojkolí v koleji bude hůře aplikovatelné vzhledem k náročnosti měření v tak provozně složitém prostředí jako je pojezd kolejového vozidla a potřebě speciálních senzorů [32].

Dalším faktorem nahrávajícím širšímu rozšíření aktivních prvků v pojezdu kolejových vozidel je snaha o snižování hmotnosti jednak mechanických částí, ale hlavně elektrické výzbroje. Lze předpokládat, že využití PMSM, SiC prvků v trakčních měničích a dalších inovací v oboru elektrotechniky, nových materiálů či postupů návrhu, jako je například topologická optimalizace mechanických částí vozidla, povedou k výraznému snížení hmotnosti kolejových vozidel a umožní větší využití jednonápravových podvozků, pro které bude aktivní vedení dvojkolí velmi vhodné či téměř nutné.

Vliv na další rozvoj aktivního natáčení dvojkolí do oblouku budou mít zajisté také normativní požadavky na maximální kvazistatickou příčnou sílu v kontaktu kolo-kolejnice, které již dnes mají některá současná vozidla problémy splnit. Čím dál větší vliv v zakázkách na nová vozidla také dostává kritérium LCC (life cycle costs), jehož hodnota by šla spolehlivým aktivním řízením vozidel výrazně zlepšit, jelikož by nedocházelo k tak časté reprofilaci kol a výměně obručí.

Výzkum a příspěvek vznikl za finanční podpory Technologické agentury ČR, projekt č. TE0100026 "Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky" a v rámci grantu SGS21/112/OHK2/2T/12.



#### Literatura

- [1] FU, B., GIOSSI, R.L., PERSSON, R., STICHEL, R., BRUNI, S., GOODALL, R.. Active suspension in railway vehicles: a literature survey. In: *Railway Engineering Science* [online]. 2020, s. 3-35. ISSN 2662-4745.
- [2] KITADA, H., History of air spring development for Shinkansen trains. *SEI Tech Rev* 84:114-119
- [3] PARK, J., SHIN, Y., HUR, H. a YOU, W.. A practical approach to active lateral suspension for railway vehicles. *Measurement and Control* [online]. 2019, **52**(9-10), 1195-1209 [cit. 2021-6-4]. ISSN 0020-2940.
- [4] KAMADA, T., MAKINO, T. Active vertical elastic vibration suppression of railway vehicle by air spring suspension. In: *Proceedings of the 23rd international symposium on dynamics of vehicle on roads and tracks (IAVSD 2013)*, s. 1–7
- [5] QAZIZADEH, A., PERSSON, R., STICHEL, S. On-track tests of active vertical suspension on a passenger train. In: *Vehicle System Dynamics* [online]. 2015, s. 798-811 [cit. 2021-6-4]. ISSN 0042-3114.
- [6] QAZIZADEH, A., STICHEL, S., FEYZMAHDAVIAN H.R. Wheelset curving guidance using  $H_{\infty}$  control. In: *Vehicle System Dynamics* [online]. 2017, s. 461-484 [cit. 2021-6-4]. ISSN 0042-3114.
- [7] MICHÁLEK, J., ZELENKA, T. Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements. In: *Appl Comput Mech* 5(2): s. 187-196 [cit. 2021-6-4].
- [8] WANG, X., LIU, B., DI GIALLEONARDO, E., KOVACIC, I., BRUNI, S. Application of semi-active yaw dampers for the improvement of the stability of high-speed rail vehicles: mathematical

- models and numerical simulation. In: *Vehicle System Dynamics* [online]. s. 1-28. ISSN 0042-3114.
- [9] YUE, H., YADONG, S., GUOSONG, W., YUN, L., YUAN, Y. Simulation and Experimental Study on the Active Stability of High-Speed Trains [online]. In: *Comput Sci Eng*. 2019, s. 72-82 [cit. 2021-6-4]. ISSN 1521-9615.
- [10] PARK, J-H., KOH, H-I., HUR, H-M., KIM, M-S., YOU, W-H. Design and analysis of an active steering bogie for urban trains. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2010, s. 1353-1362 [cit. 2021-6-4]. ISSN 1738-494X.
- [11] UMEHARA, Y., KAMOSHITA, S., ISHIQURI, K., YAMANAQA, Y. Development of electro-hydraulic actuator with fail-safe function for steering system. In: *Q Rep RTRI* 55(3). 2014. s. 131-137
- [12] HUR, H., SHIN, Y., AHN, D., HAM, Y. Steering Performance Evaluation of Active Steering Bogie to Reduce Wheel Wear on Test Line. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2019, s. 1591-1600 [cit. 2021-6-4]. ISSN 2234-7593.
- [13] GIOSSI, R.L., PERSSON, R., STICHEL, S. Improved curving performance of an innovative two-axle vehicle: a reasonable feedforward active steering approach. In: *Vehicle System Dynamics* [online]. s. 1-24 [cit. 2021-6-4]. ISSN 0042-3114.
- [14] CRRC Announces Global Release of CETROVO Carbon-fibre Metro Vehicles. *Railway News* [online]. [cit. 2021-6-4]. Dostupné z: <https://railway-news.com/crrc-global-release-cetrovo-carbon-fibre-metro-vehicles/>
- [15] ČAPEK, J., Optimalizace jízdních vlastností nízkopodlažních tramvají. Praha, 2013. Disertační práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Rus, L.
- [16] KONOWROCKI, R., KALINOWSKI, D., SZOLC, T., MARCZEWSKI, A.. Identification of safety hazards and operating conditions of the low-floor tram with independently rotating wheels with various drive control algorithms. In: *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2021, s. 21-33. ISSN 15072711.
- [17] PEREZ, J., MAUER, L., BUSTURIA, L. Design of Active Steering Systems for Bogie-Based Railway Vehicles with Independently Rotating Wheels. In: *Veh Sys Dyn* [online]. 2016, s. 209-220. ISSN 0042-3114.
- [18] MEI, T.X., GOODALL, R.M. Practical Strategies for Controlling Railway Wheelsets Independently Rotating Wheels. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* [online]. 2003, s. 354-360 [cit. 2021-6-4]. ISSN 0022-0434.
- [19] LIANG, B., IWICKI, S. D. Independently Rotating Wheels with Induction Motors for High-Speed Trains. In: *Journal of Control Science and Engineering*. 2011, s. 1-7 ISSN 1687-5249.
- [20] AHN, H., LEE, H., GO, S., CHO, Y., LEE, J. Control of the Lateral Displacement Restoring Force of IRWs for Sharp Curved Driving. In: *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2016, s. 1042-1048. ISSN 1975-0102.
- [21] LU, ZG., YANG, Z., HUANG, Q., WANG, XC. Robust active guidance control using the  $\mu$ -synthesis method for a tramcar with independently rotating wheelsets. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, s. 33-48. ISSN 0954-4097.
- [22] Oh, YJ., Lee, JK., Liu, HC., Cho, S., Lee, J., Lee, HJ. Hardware-in-the-Loop Simulation for active control of tramcars with independently rotating wheels. 2019. IEEE Access 7:71252-71261
- [23] Kurzeck, B., Valente, L. A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing. In: 9th world congress railway research, 2011. s. 1-10
- [24] STOW, J., COONEY, N., GOODALL, R.M., SELICK, R. The use of wheelmotors to provide active steering and guidance for a light rail vehicle. In: The Stephenson Conference: Research for Railways, 25th-27th April 2017, London, UK.
- [25] SUGUHARA, Y., KOJIMA, T. Suppression of vertical vibration in railway vehicle carbodies through control of damping force in primary suspension: presentation of results from running tests with meter-gauge car on a secondary line. WIT Trans Built Environ. 2018. s. 181:329-337

- [26] FARHAT, N., WARD, C.P., GOODALL, R.M., DIXON, R. The benefits of mechatronically-guided railway vehicles: A multi-body physics simulation study. In: *Mechatronics*. 2018, s. 115-126. ISSN 09574158.
- [27] KRÜGER, D., LÜDICKE, D., HECKMANN, A., ALVES, C.G. Next Generation Train Bogie: Production of a Prototype Axle Bridge for the "NGT Bogie Research Facility" (FuN). In: *ZEVrail*. 2021, 145(1-2), s. 42-49.
- [28] BIN, F., BRUNI, S. (2020): Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system, In: *Vehicle System Dynamics*. 2020, DOI:10.1080/00423114.2020.1838563
- [29] Advanced bogie keeps LRVs ahead of the curve. *International Railway Journal* [online]. 2018, 03.11.2018 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: [https://www.railjournal.com/in\\_depth/advanced%E2%80%88bogie-keeps-lrvs-ahead-of-the-curve](https://www.railjournal.com/in_depth/advanced%E2%80%88bogie-keeps-lrvs-ahead-of-the-curve)
- [30] Tramwaje przestaną hałasować na łukach?. *Transport Publiczny* [online]. 2017, 17.07.2017 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/tramwaje-przestana-halasowac-na-lukach-55779.html>
- [31] Tlumič rychlejší než mrknutí oka umožní zvýšit rychlost vlaků a šetřit koleje [online]. 2020 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vut/f19528/d202021>
- [32] Kalivoda, J.; Bauer, P.; Novák, Z. Assessment of Active Wheelset Steering System Using Computer Simulations and Roller Rig Tests. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 11727. <https://doi.org/10.3390/app112411727>