



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# PODVOZKY ŽELEZNIČNÍCH SOUPRAV PRO RYCHLOST NAD 200 KM/H

CHASSIS OF RAILWAY GEARS FOR SPEEDS OVER 200 KM/H

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Repka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Martin Repka</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Podvozky železničních souprav pro rychlost nad 200 km/h

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti se v železniční dopravě neustále zvyšuje podíl kolejových vozidel s maximální rychlostí nad 200 km/h. Pro tyto přepravní rychlosti jsou však nezbytné změny jak v uspořádání kolejového svršku, tak na podvozcích kolejových vozidel. Jde o výrazné změny jak v kinematice náprav, způsobu přenosu trakční síly, tak i ve způsobu pružení a tlumení.

Typ práce: rešeršně syntetická

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zpracování uceleného přehledu současného stavu v konstrukci podvozků kolejových vozidel pro přepravní rychlosti nad 200 km/h.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- geograficky uspořádaný přehled provozovaných rychlovlaků a jejich parametrů,
- analýza konstrukčních zvláštností v oblasti trakce, kinematiky spřažení,
- zvláštní zaměření na analýzu způsobu pružení a tlumení náprav.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2019.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

LATA, Michael, 2004. Konstrukce kolejových vozidel II. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 80-719-4696-6.

ZSDM -Pojezdy a podvozky kolejových vozidel, 2010. Plzeň. Prezentace. Západočeská universita.

Railway technical handbook: Volume 2 [online], 2012. Stockholm: SKF. ISBN 978-91-978966-6-5.

Dostupné z: <http://www.skf.com/binary/76-96059/13085EN.pdf>

PĚNKAVA, Dominik, 2015. Sekundární vypružení elektrické lokomotivy. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Josef Kolář.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práca sa venuje rešeršnej štúdií ohľadom železničných podvozkov rýchlovlakov, ktoré majú konštrukčnú rýchlosť viac ako 200 km/h. Špeciálna pozornosť je venovaná pruženiu a tlmeniu podvozkov a ich vplyvu na jazdné parametre podvozka.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Železničný podvozok, rám, vypruženie, vrtenie

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with high speed railway bogies, especially the ones that are designed to run over 200 km/h. Special attention is paid to suspension of the bogies and its influence on the ride behavior of the bogie.

## KEYWORDS

Railway bogie, chassis, suspension, hunting



## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

REPKA, Martin. *Podvozky železničních souprav pro rychlost nad 200 km/h*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. 51 s. Vedoucí práce doc. Ing. Ivan Mazůrek CSc.





## POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať doc. Ing. Ivanovi Mazůrekovi, CSc. za jeho ochotu, trpezlivosť pri vedení tejto práce a za jeho cenné rady v oblasti konštrukcie vlakov. Taktiež by som sa rád poďakoval svojej rodine za morálnu a finančnú podporu počas štúdia a písania tejto práce.

## PREHLÁSENIE AUTORA O PŔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu *Podvozky ťelezničnůch souprav pro rychlost nad 200 km/h* vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Ivana Mazůřeka, CSc. Sůčasne prehlasujem, že vsetky zdroje obrazovůch a textovůch informácii, z ktorůch som čerpal sú riadne citované v zozname použitůch zdrojov

.....  
Martin Repka



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>14</b>
2.1	Komfort	14
2.2	Ekonomika	15
2.3	Bezpečnosť	16
2.4	Vrtenie	17
2.5	Vibroizolačné systémy	18
2.6	Cieľ práce	19
<b>3</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>20</b>
3.1	Rýchlovlak	20
3.1.1	Usporiadanie rýchlovlaku	20
3.1.2	Geografický prehľad rýchlovlakov	21
3.2	Pojazd	24
3.3	Podvozok	25
3.3.1	Stavba podvozka	25
3.3.2	Uchytenie podvozka ku skrini	26
3.4	Redukcia silového pôsobenia na bok hlavy koľajnice	27
3.5	Pasívne vibroizolačné systémy	28
3.6	Semi-aktívne vibroizolačné systémy	31
3.6.1	Regulácia priečnej polohy dvojkoľesia s úmyslom doceliť prostého valenia.	32
3.6.2	Regulácia momentu okolo zvislej osy s úmyslom docielenia prostého valenia	33
3.6.3	Regulácia relatívneho uhlu medzi dvojkoľesiami	33
3.6.4	Tlmenie priečnych vibrácií	34
3.7	Aktívne vibroizolačné systémy	35
3.7.1	ABS	36
3.7.2	AASA	37
3.7.3	ADD	38
<b>4</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>44</b>

<b>7</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>51</b>

# 1 ÚVOD

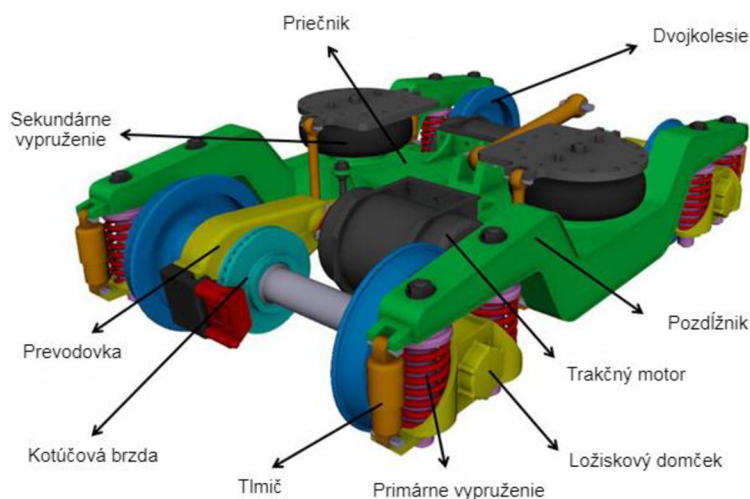
Za rýchlovlak môžeme označiť vlak, ktorému konštrukcia umožňuje prevádzku pri rýchlostiach presahujúcich 200 km/h. Na dosiahnutie vysokých rýchlostí vlakov sú potrebné zmeny v usporiadaní železničného zvršku, skriň a podvozkov koľajových vozidiel. Práve podvozky tvoria dôležitú časť koľajového vozidla, ktorej konštrukcia má významný vplyv na jazdné vlastnosti celého vozidla.

V prípade prevádzky rýchlostných vlakov môžu nedostatky v konštrukcii podvozka spôsobiť ekonomické straty. Snahou je čo najviac odľahčiť konštrukciu vlaku, čo pomôže dosiahnuť úspor jednak spotrebou materiálu potrebného na stavbu vozidiel a z toho plynúcej úspore energie pri jeho výrobe, jednak nižšou spotrebou pri jeho prevádzke. Ľahká konštrukcia sekundárne spôsobuje nižšie opotrebenie dvojkolesí, koľajníc a ďalších komponentov vozidla. Prípadný konštrukčný nedostatok sa taktiež prejaví v podobe vibrácií a hluku, ktoré následne spôsobia úbytok komfortu cestujúceho, zhoršenie jazdných vlastností, čo môže v extrémnych prípadoch vyústiť až do nehody, ktorá má v danej situácii fatálne následky. Nami tri skúmané oblasti záujmu sú ekonomika, komfort a bezpečnosť. Tieto tri oblasti spolu úzko súvisia a preto sa práca sústreďuje na riešenie problémov spoločných pre tieto tri oblasti

V súčasnosti vidíme snahu o vybudovanie vysokorýchlostných železničných koridorov aj v Českej republike a na Slovensku. Zvyšovanie traťovej rýchlosti si však bude vyžadovať obmenu vozidlového parku. Táto obmena sa javí ako potenciál pre miestnych výrobcov železničnej techniky. Vysoká traťová rýchlosť so sebou však nesie nové problémy, ktoré je potrebné vyriešiť.

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

Pre predstavu problémov, ktoré sprevádzajú konštrukciu podvozka je ako prvé potrebné si predstaviť základnú stavbu podvozka. Podvozok sa skladá z rámu, dvoch stupňov vypruženia, dvojkolesí, brzdového ústrojenstva a príp. trakčného motora.



obr. 2-1 Zjednodušený model podvozka [1]

Ďalej je nutné povedať, že tri oblasti, ktoré sú objektom môjho záujmu skúmania spolu úzko súvisia. Pre prehľadnosť analýzy sú však rozdelené vplyvy na komfort, ekonomiku a bezpečnosť do osobitných podkapitol. Z týchto podkapitol následne vyplynie spoločný objekt záujmu, ktorému sa venuje rešeršná časť.

### 2.1 Komfort

Pocit komfortu na palube vlaku je u cestujúceho výsledkom mnohých faktorov. Či už je to obsluha, alebo vybavenie vlaku, tak komfort je hlavne závislý na vlastnostiach vozidla a trate. Odstredivá sila pri jazde oblúkom pôsobí na cestujúceho a nerovnosti trate sa prenášajú do skrine vozidla cez podvozok v podobe vibrácií. Vibrácie vedia nielen znepríjemniť cestu, ale dokonca vyvolať nevoľnosť a tzv. morskú chorobu. Normou pri vyhodnocovaní vibrácií je v súčasnosti ČSN ISO 2631-1 [2], ktorá sa zaoberá vplyvom vibrácií na ľudské telo. Pri prípadnom kmitaní je dôležité sústrediť sa na frekvenciu a amplitúdu kmitov, ktoré sú prenášané na skriňu od podvozka pomocou druhotného vypruženia. Prípadné riešenie tejto situácie spočíva v eliminácii kmitov podvozka, alebo zabránenie ich prenosu na skriňu vozidla. Tohto riešenia je možné dosiahnuť pomocou tzv. vibroizolačných systémov.

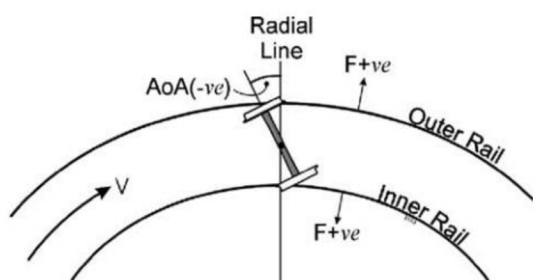
## 2.2 Ekonomika

Pri hodnotení ekonomiky prevádzky predstavujú asi najväčšiu záťaž, energetické straty pri zrýchlení súpravy následkom preklzu, odpor vzduchu pri jazde vysokou rýchlosťou, opotrebenie trate a opotrebenie častí podvozka. Pre rozbeh súpravy je potrebné, aby bola adhézia k povrchu dostatočne veľká, aby umožnila prenos síl pomocou hnacieho ústrojenstva. V železničnom pojmání definujeme adhéziu ako: „*Súhrn fyzikálnych vlastností dotykovej plošky kolesa a koľajnice, ktoré umožňujú prenášať ploškou hnaciu dotyčnicovú silu.*“ [3]. Pri aplikácii príliš veľkej trakčnej sily sa dosahuje sklzu kolies po koľajnici a tým dochádza k veľkým energetickým stratám a opotrebeniu. Pri aplikácii príliš veľkej brzdnjej sily a následnom zablokovaní kolesa dochádza k deformácii kolesa a vytváraniu sa tzv. plochých kolies. V súčasnosti sa pri rozbehu používajú elektronické systémy vyhodnocujúce prešmyk kolesa, a v extrémnych prípadoch sa k zlepšeniu adhézných vlastností vháňa piesok pomocou stlačeného vzduchu do styku koleso-koľajnica. Toto riešenie však ani zďaleka nie je ideálne a to z dôvodu intenzívneho abrazívneho opotrebenia kolesa a koľajnice.

Najviac namáhanou časťou podvozka pri jeho prevádzke je oblasť pri styku koleso-koľajnica. Pri jazde vysokými rýchlosťami je vystavované rázom, ktoré sú následkom nerovností a relatívnych pohybov podvozka po koľaji. Spôsobu degradácie kontaktu koleso-koľajnica sú [4]:

- opotrebenie adhézne,
- opotrebenie abrazívne,
- opotrebenie korózne.

Opotrebenie adhézne predstavuje opotrebenie okolesníka a jazdnej plochy kolesa pri vedení vozidla po koľajovej dráhe následkom kontaktu pri vzájomnom pohybe. Vzniká pri veľkom uhle nábehu na kontakte okolesníka a boku hlavy koľajnice. Uhol nábehu sa chápe ako uhol stáčania dvojkolesia okolo zvislej osi vzhľadom ku koľajnici (Obr. 2-2 zaznačené ako AoA).



obr. 2-2 Uhol nábehu [5]

Jedná sa o najzávažnejšie opotrebenie z hľadiska jazdných vlastností vozidla, keďže zhoršuje vedenie vozidla po koľaji. Riešenie by bolo možné aplikáciou maziva do kontaktu okolesník-bok hlavy koľaje. Aplikácia maziva však výrazne zníži adhézne vlastnosti kolesa a zvýši straty pri zrýchlení súpravy. Ideálne riešenie predstavuje zmenšenie uhlu nábehu kolesa a umožnením jeho samovoľného natáčania, príp. nútene natáčať koleso do oblúka.

Korózne opotrebenie je dôsledok podmienok v akých vlak pôsobí a nie je jej možné predísť. Sme však schopní vrstvu, ktorá je ovplyvnená koróziou odstrániť na sústruhu. Abrazívne opotrebenie predstavuje zložitejší problém keďže je ovplyvnená vrstva väčšia, je potrebný pri sústružení odber väčšieho množstva materiálu. To významne skrakuje celkovú životnosť kolesa a následne je potrebná výmena celého dvojkoľesia. Keďže sa pri abrazívnom a koróznom opotrebení nejedná o opotrebenie na ktoré má vplyv konštrukcia vozidla, ale jedná sa o vlastnosť prostredia a trate, nebude sa táto práca riešením tohto typu opotrebenia ďalej zaoberať.

## 2.3 Bezpečnosť

Bezpečnosť je pri prevádzke rýchlovlaku problematika, ktorej je potrebné venovať najväčšiu pozornosť, keďže prípadné nehody majú fatálne následky. Najrizikovejším javom, s ktorým sa na železnici stretávame je opustenie koľajovej dráhy, tzv. vykoľajenie. V súčasnosti je rozoznávaných niekoľko typov vykoľajenia a podmienok, pri ktorých k nim dochádza.

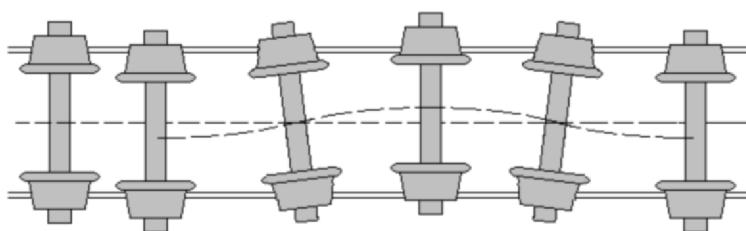
<b>Vykoľajenie spôsobené:</b>	<b>Podmienky pri ktorých dôjde k vykoľajeniu:</b>
Vyšplhaním okolesníka na temeno hlavy koľajnice	Pri príliš veľkom uhle nábehu, najčastejšie pri jazde v oblúku
Zbortením trate	Pri príliš veľkom pôsobení priečných síl
Posunutím koľaje (zväčšením rozchodu)	Pri príliš veľkom pôsobení priečných síl
Pozdĺžnou nestabilitou	Vzniká kmitaním dvojkoľesia okolo rovnovážnej polohy

tab. 2-1 Spôsoby vykoľajenia [4]



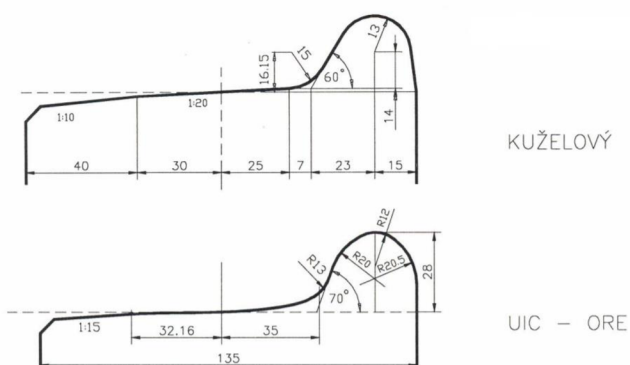
## 2.4 Vrtenie

Ako sa ukazuje tak spoločným rysom pre všetky uvedené spôsoby vykoľajenia vozidla je veľké pôsobenie priečných síl na koľajnicu. Tieto priečne sily môžu vzniknúť následkom veľkého uhla nábehu pri jazde v oblúku, alebo následkom relatívneho pohybu podvozka voči skriní vozidla pri jazde po priamej trati. Tento relatívny pohyb sa najčastejšie prejavuje rotáciou okolo zvislej osi a nazýva sa vrtenie. K vrteniu dochádza pri jazde vozidla po priamej trati vyššou rýchlosťou. Vrtivý pohyb môže konať ako celý podvozok, tak aj samostatné dvojkolesie. Jedná sa o jav, ktorý významne ovplyvňuje ako bezpečnosť, tak opotrebenie a komfort. Práve kvôli tomuto bude hlavným objektom záujmu tejto práce „boj“ s vrtením a zvyšovanie kritickej rýchlosti.



obr. 2-3 Vrtivý pohyb dvojkolesia [6]

Vrtenie je spôsobené kmitavým pohybom dvojkolesia so všeobecne krivkovým jazdným obrysom kolesa v koľajovom kanále. Pre každé koľajové vozidlo je charakteristická jeho tzv. *kritická rýchlosť*, pri ktorej po prekročení dochádza k jeho *nestabilnému chodu*. Pri nestabilnom chode dochádza vplyvom zväčšenia amplitúdy k vyčerpaniu vôle v kanále koľaje a významne sa zvyšuje priečne silové pôsobenie na bočnú plochu hlavy koľajnice. Dôležitým parametrom pri popise kontaktu koleso-koľajnica je tzv. *ekvivalentná kužeľovitost'*. Jedná sa o parameter, ktorý je závislý na amplitúde vlnivého pohybu dvojkolesia a perióde vlnenia. Udáva nám hodnotu kužeľovitosti, ktorú by malo ideálne kužeľové koleso, aby sa amplitúda a dĺžka vlny zhodovala s kolesom, ktoré má všeobecný krivkový obrys. Všeobecne sa dá povedať, že koleso s vyššou ekvivalentnou kužeľovitost'ou je náchylnejšie k nestabilnému chodu ako koleso s menšou ekvivalentnou kužeľovitost'ou [7].



obr. 2-4 Príklad jazdného obrysu [7]

Vrtenie vzniká ako prejav nelinearit v kontakte koleso-koľajnica a to najmä:

- delta-r funkcie, ktorá vyjadruje závislosť veľkosti rozdielov okamžitých valivých kružníc ľavého a pravého kolesa na zmene priečnej polohy dvojkolesia voči koľaji [7],
- sklzovej charakteristiky, ktorá vyjadruje závislosť súčiniteľa adhézie na hodnotách priečného a pozdĺžneho sklzu  $\mu=f(s)$  [8].

Vrtenie je navyše výraznejšie u vysokorýchlostných vozidiel s ľahkou stavbou, keďže je pomer hmotnosti skrine a podvozka väčší. Práve kvôli tomuto je potrebné venovať vrteniu zvýšenú pozornosť pri návrhu podvozka koľajových vozidiel. Spôsoby, ktorými je možné predísť vykoľajeniu sú:

- zväčšením uhla okolesníka sme schopní zvýšiť maximálny pomer priečného a zvislého silového pôsobenia, čo ovplyvní schopnosť kolesa sa vyšplhať na hlavu koľajnice,
- použitie nezávisle sa točiacich kolies pri ktorých je možné kontrolovať uhol nábehu,
- optimalizácia vypruženia vlaku. Vlaky s väčším prvotným vypružením vynikajú nízkym priečnym silovým pôsobením na koľajnicu. Príliš mäkké vypruženie však ohrozuje stabilitu dvojkolesia pri jazde vysokými rýchlosťami,
- zavedenie semiaktívnych/aktívnych prvkov do pojazdu vozidla. Vo všeobecnosti sa požaduje mäkké vypruženie pri jazde úzkym oblúkom, alebo výhybkou a tuhé vypruženie pri jazde po priamej trati,
- monitorovanie jazdných parametrov. Keďže k vykoľajeniu dochádza pri určitom technickom stave vozidla a koľaje, je dôležité monitorovať jazdné parametre a na ich základe prispôbiť jazdu vozidla.

## 2.5 Vibroizolačné systémy

Možnosťou ako predísť účinkom vrtenia dvojkolesia, alebo podvozka a zamedziť tak nestabilnému chodu vozidla je použiť už dnes dostupné tzv. *vibroizolačné systémy*, ktoré pozostávajú z pružín akumulujúcich energiu a tlmičov, ktoré energiu disipujú. Vzhľadom k metóde regulácie týchto systémov ich môžeme rozdeliť na:

- systémy pasívne, pri ktorých sa tlmenie počas prevádzky nedá meniť [9],
- systémy adaptívne, pri ktorých je možné tlmenie meniť, táto zmena je však značne pomalá [9],
- systémy semi-aktívne, tlmenie je možné meniť v reálnom čase regulačným algoritmom [9],
- systémy aktívne, ktoré sú popri tlmení schopné vyvinúť aj vlastnú silu, za nulovej relatívnej rýchlosti zdvíhu tlmiča.

## 2.6 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto práce je vytvorenie uceleného prehľadu o možnosti zvyšovania traťovej rýchlosti z hľadiska podvozkov, ktoré sú primárne určené pre rýchlosť nad 200 km/h. Čiastkové ciele plynúce z analýzy problému sú takéto:

- z hľadiska prenosu trakčnej sily na koľaj vytvoriť prehľad o možnom usporiadaní pojazdu s analýzou výhod a nevýhod, ktoré každé z nich ponúka,
- vytvoriť geografický prehľad prevádzkovaných rýchlovlakov v krajinách, ktoré sú považované za pionierov v železničnej doprave. V rámci objasnenia ponímania pojmu rýchlovlak,
- uviesť spôsoby tlmenia vrtivých pohybov,
- uviesť metódy regulácie semiaktívnych tlmičov,
- uviesť spôsoby aktívneho riadenia podvozkov,
- na základe uvedených informácií načrtnúť vývoj v najbližších rokoch.

## 3 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 3.1 Rýchlovlak

V Európskom pojmání UIC nedefinuje slovo rýchlovlak. Dostupný je iba opis vysokorýchlostnej železnice, ktorý znie podľa UIC [10] „Železnica, ktorá umožňuje dosahovať rýchlosti nad 200 km/h na zmodernizovaných tratiach a nad 250 km/h na tratiach novo vybudovaných“. Z čoho môžeme usúdiť, že rýchlovlak je vlak schopný dosahovať maximálne rýchlosti práve na týchto tratiach. V iných častiach sveta je však definícia rýchlovlaku odlišná a práve z tohto dôvodu je v tejto práci uvedený aj geograficky usporiadaný prehľad prevádzkovaných rýchlovlakov.

#### 3.1.1 Usporiadanie rýchlovlaku

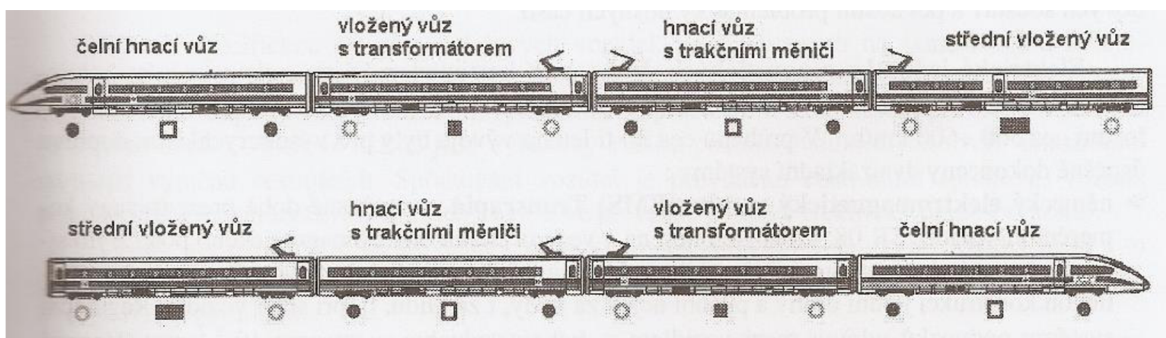
Vo všeobecnosti rozlišujeme dve koncepcie usporiadania, a to: súpravy s distribuovaným výkonom a elektrickou výzbrojou skrátene EMU a tzv. Push-pull súpravy.

Push-pull súpravy, alebo súpravy so sústredeným výkonom a elektrickou výzbrojou sú charakteristické tým, že na začiatku, na konci, príp. na oboch koncoch je prítomný rušeň, ktorý poháňa danú súpravu. V prípade prítomnosti iba jedného rušňa v súprave, je na druhý koniec súpravy umiestnený riadiaci vozeň, ktorý umožňuje vzdialené ovládanie rušňa z druhého konca vlaku. Výhoda tohto usporiadania spočíva v možnosti úpravy dĺžky súpravy podľa momentálnych potrieb a v jednoduchosti údržby. Nespornou výhodou tohto usporiadania je možnosť rýchlej výmeny rušňa v prípade poruchy. Nevýhoda spočíva v hmotnosti rušňa, nerovnomernej distribúcii hmotnosti a trakcie. Typickým predstaviteľom takéhoto usporiadania je napr. francúzska súprava TGV, alebo rakúska súprava Railjet (obr. 3-1).



obr. 3-1 Rušeň ES64U4 Taurus (1216 ÖBB) na čele súpravy Railjet [11]

V súprave s distribuovaným výkonom a elektrickou výzbrojou sú trakčné podvozky rozmiestnené rovnomerne naprieč súpravou. Výhody tohto usporiadania spočívajú v absencii rušňa v súprave, keďže celá súprava je hnaná rovnomerne a lepších adhézných pomeroch a mernej hmotnosti vozidla vyjadrenej v t/sedadlo. Miesto v riadiacom vozni je možné využiť napr. pre umiestnenie sedadiel pre cestujúcich. Na druhú stranu zaberá trakčný motor a výzbroj miesto pod súpravou, ktoré by mohlo byť za normálnych okolností využité ako miesto pre cestujúcich. Typický predstaviteľ tejto koncepcie je súprava DB s označením ICE 3.



obr. 3-2 Radenie BR 407 Velaro D (DB ICE 3) [12]

### 3.1.2 Geografický prehľad rýchlvlakov

Kvôli rôznemu pojímaniu termínu rýchlvlak vo svete považujem za vhodné uviesť prehľad súprav a ich základných parametrov, s ktorými sa čitateľ môže v svetových krajinách stretnúť. Z dostupných údajov z roku 2015 môžeme sledovať, že 98 % zo svetovej vysokorýchlostnej železnice sa koncentruje v dvoch oblastiach a práve preto sa moja rešeršná činnosť bude venovať práve im [13]. Tieto dve oblasti sú:

- západná Európa: 60 %,
- východná Ázia: 38 %.

Vo východnej Ázii sa za posledných 10 rokov asi najdramatickejšie zvýšil podiel Číny na celosvetovom trhu vysokorýchlostnej železničnej dopravy. Z pôvodných 0 % zastúpených v roku 2005 sa do roku 2015 podarilo zvýšiť podiel vysokorýchlostnej železnice na 20 % z celkovej svetovej produkcie. V súčasnosti sa trh zameriava na zavádzanie nových súprav, príp. na vývoj nových súprav, ktoré sú pripravované na novobudované trasy. Japonský trh predstavuje druhé najväčšie zastúpenie vo východnej Ázii a je zameraný skôr na obmenu súčasných starnúcich súprav, keďže niektorým z nich bude v blízkej dobe končiť životnosť. Práve Japonsko stálo za zrodom rýchlej železnice v 60. rokoch, keď vznikla prvá ucelená jednotka známa ako *Shinkansen*.

V západnej Európe má najširšie siete Francúzsko a Nemecko. Cieľom trhu bolo donedávna rozširovanie a zväčšovanie súčasnej flotily rýchlolakov, v súčasnosti sa k nim pridáva potreba obmeny vozového parku, ktorý postupom času prestal vyhovovať štandardom v daných krajinách. Španielsko naproti tomu stále buduje nové trasy a nakupuje nové súpravy. Španielsko a Portugalsko je špecifické podmienkami, ktoré sú kladené na rýchlolaky pôsobiace v tejto oblasti, hlavnou z nich je duálny rozchod. Zatiaľ čo historicky sa v Španielsku používala širokorozchodná železnica (1 668 mm), na novo budovaných trasách vedúcich do Francúzska je použitý už normálny rozchod (1 435 mm). Práve z tohto dôvodu musí byť použité na rýchlolakoch dvojkolesie s meniteľným rozchodom, čo predstavuje výzvu pre vlakových konštruktérov. Zaujímavý trh predstavuje Taliansko, kde vytvára štátnemu dopravcovi *Trenitalia* konkurenciu súkromný dopravca *NTV*, jedná sa o prvého neštátneho dopravcu na svete, ktorý ponúka služby rýchlolakov zákazníkom. Ruská federácia a Spojené kráľovstvo majú v súčasnosti vo výbave súpravy odvodené od súprav používaných v krajinách vyššie spomenutých. V prípade Ruskej federácie sú to jednotky *Sapsan*, vyrobené spoločnosťou Siemens Mobility, vychádzajúcich zo súprav ICE 3 používaných DB. Spojené kráľovstvo má zas v prevádzke súpravy triedy 395 *Javelin*, odvodených od jednotky Shinkansen 400, a súpravy triedy 390 *Pendolino*, odvodených od talianskej jednotky s obdobným názvom.

Krajina, výrobca	Značenie súpravy	Max. rýchlosť, Rozchod	Komentár:
Nemecko/ Holandsko Siemens	ICE 3	320 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2000, Oproti predošlej generácii sa prešlo od Push-pull konfigurácie k EMU konfigurácii [14]
Nemecko Siemens	ICE 4	250 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2017, Oproti predošlej generácii znížená max. rýchlosť, navýšená kapacita súpravy, o 22 % nižšia spotreba energie [15]
Francúzsko Alstom	TGV POS	320 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2006, Push-pull konfigurácia, Nízka hmotnosť (cca. 400t v prípade 10 voz. súpravy), použité bežné jakobsove podvozky Držiteľ svetového rekordu ako najrýchlejšie pozemné koľajové vozidlo (574,8 km/h) [14]
Taliansko Alstom	AGV	360 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2006, prechod k EMU konfigurácií, použité hnané jakobsove podvozky [16]
Taliansko/ Poľsko Alstom	ETR 600 Pendolino	250 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2015, EMU konfigurácia, systém nakláňania skriň umožňuje prejazd oblúka vyššou rýchlosťou [17]
Španielsko Talga S.A.	Talgo 250	250 km/h 1 432- 1 520- 1 668 mm	V prevádzke od r. 2015, Push-pull konfigurácia, unikátny systém prirodzeného nakláňania skriň, meniteľný rozchod náprav, nezávisle zavesené kolesá, použitý jednonápravový jakobsov podvozok[18].
Čína CRRC	CRH380A	350 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2010, EMU konfigurácia, jedná sa o jeden z prvých rýchlovlakov navrhnutých čínskym výrobcom CRRC bez kooperácie s inými firmami [19]
Japonsko Hitachi	W7 Shinkansen	260 km/h 1 435 mm	V prevádzke od r. 2013, EMU konfigurácia, zatiaľ posledný zo série Shinkansen [20]

tab. 3-1 Rýchlovlaky

Z tab. 1 je povšimnutiahodné, že súpravy budované v súčasnosti majú častokrát nižšiu maximálnu rýchlosť ako ich predchodcovia. Jedná sa o podobnú situáciu, aká nastala v letectve po príchode lietadiel *Concorde*. Trendom sa javí skôr hľadanie optimálneho pomeru zisku a výdavkov. Namiesto slepého nasledovania vidiny navýšenia rýchlosti sa v súčasnosti stretávame skôr so snahou maximalizácie kapacity súprav a minimalizácie výdavkov. Podvozok predstavuje pre túto snahu kľúčový prvok, keďže väčšina výdavkov je spojená práve s ním.

## 3.2 Pojazd

Najdôležitejším prvkom moderného rýchlovlaku, na ktorom závisí jeho maximálna rýchlosť a schopnosť vedenia vozidla v koľajovom kanále je jeho podvozok. Práve kvôli tomuto sa zvyšok tejto práce bude venovať práve podvozkom rýchlovlakov.

Za podvozok sa podľa ČSN 28 0001 [21] označuje: „*Pojezd , alebo část pojezdu s vlastním nosním rámem, schopná natáčení kolem svislé, příp. i vodorovné osy vůči spodku (hlavnímu rámu)*“. Rozlišujeme ďalej podvozky trakčné, ktoré sú hnané motorom, a podvozky bežné, ktoré hnané nie sú. Špeciálnym druhom podvozka je tzv. „Jakobsov“ podvozok. Jedná sa o podvozok, na ktorom sú umiestnené dve skrine a zastáva úlohu podvozka a spriahadla.



obr. 3-3 Jakobsov podvozok na vozidle STADLER EC 250 (RABe 501 SBB) [22]

V minulosti sa používalo tzv. rámové usporiadanie pojazdu, pri ktorom bolo vedenie dvojkolesia osadené priamo do pozdĺžnika hlavného rámu vozidla. Postupom času sa však ukázalo, že najlepšie vlastnosti má 2 podvozkové usporiadanie s 2 nápravovým podvozkom na oboch koncoch vozidla.

Výhody podvozkového usporiadania sú:

- lepšia priechodnosť oblúkom,
- možnosť umiestniť viac stupňov vypruženia,
- menší uhol nábehu kolesa,
- menšie opotrebenie okolesníka,
- zmenšenie zaťaženia kolesa, kvôli rozloženiu hmotnosti na nápravy.

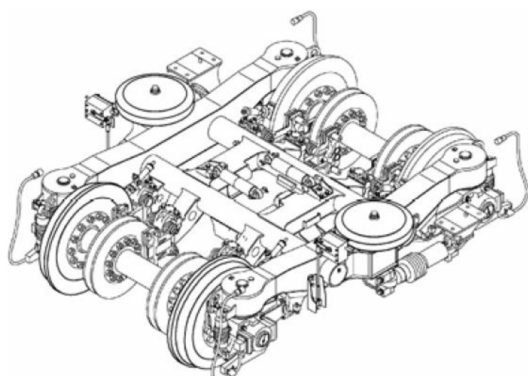


## 3.3 Podvozok

Počas svojej služby musí podvozok plniť 4 hlavné úlohy:

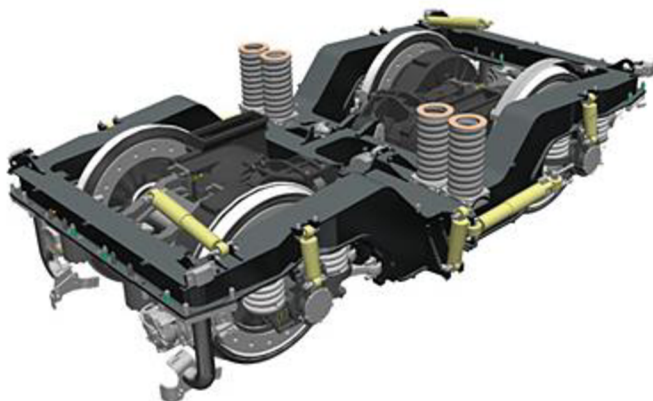
- nesenie skrine vozidla,
- prenos dynamických síl,
- vedenie vozidla po koľajovej dráhe,
- umožňovanie prenosu ťažných a brzdoých síl.

### 3.3.1 Stavba podvozka



obr. 3-4 Podvozok súpravy CRH2 [23]

Základ každého podvozka tvorí jeho rám. Pri konštrukcii ucelených jednotiek sa dostalo k presunu el. výstroja z rušňa pod podlahu súpravy, čo značne obmedzilo priestor, ktorý bol pôvodne určený pre podvozok. Z tohto dôvodu sa prišlo ku konštrukcii tzv. H-rámu (obr. 3-4). H-rám podvozka má najčastejšie konštrukciu, ktorá je zvarená z dvoch ponížených pozdĺžnikov a jedného priečnika. Pri podvozkoch starších rýchlovlakov, alebo aj pri podvozkoch moderných rušňov sa stretávame hlavne s konštrukciou uzavretého rámu s dvoma čelníkmi na oboch koncoch podvozka (obr. 3-5). Táto konštrukcia sa javí ako vhodnejšia pri trakčných podvozkoch, ktoré prenášajú veľký výkon. Deje sa tak často iba pod rušňom, kým to pri ucelených súpravách je možné výkon distribuovať medzi viacero trakčných podvozkov.

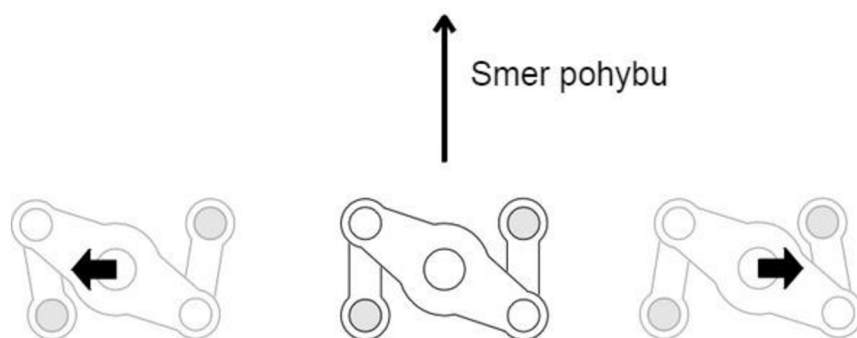


obr. 3-5 Podvozok rušňa Vectron [24]

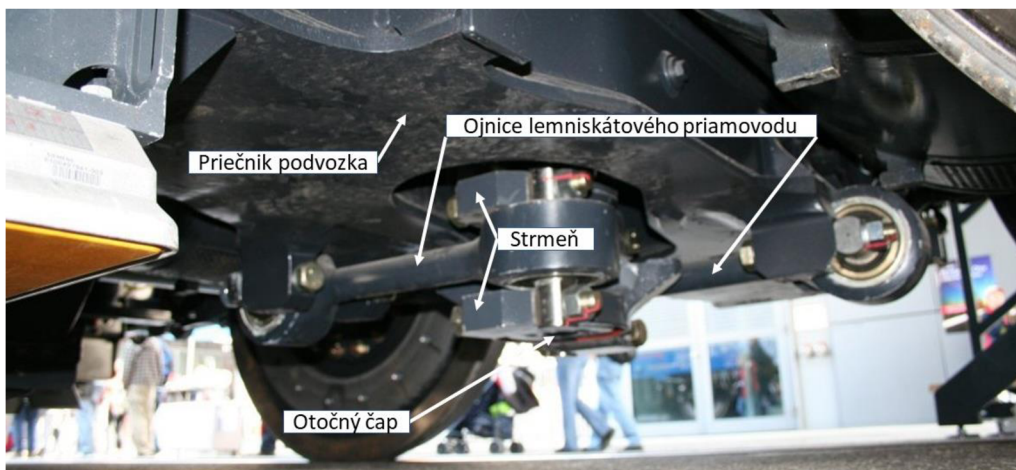
Kolesá podvozka sú spolu spojené pevnou osou a spolu tvoria tzv. dvojkolesie. To je pripevnené k rámu podvozka pomocou vedenia dvojkolesia. To pozostáva z ložiskovej skrine a tzv. kývačky, ktorá funguje na podobnom princípe ako zadná náprava motocyklu. Pri konštrukcii rušňov je používané vedenie ložiskových skriň ojnicou a flexi-coil pružinami. Je tu umiestnený aj prvotný stupeň vypruženia, ktorý má priamy vplyv na vedenie dvojkolesia po koľajovej dráhe.

### 3.3.2 Uchytenie podvozka ku skrini

Medzi skriňou vozidla a podvozkom sa nachádza druhotné vypruženie, ktoré nesie hmotnosť vozidla. V súčasnosti sa pri vysokorychlostných súpravách používajú vzduchové pružiny, ktoré nahradili staršie vinuté pružiny. Naproti tomu sa pri moderných rušňoch môžeme stretnúť s vinutými flexi-coil pružinami. Flexi-coil je označenie pre pružiny, ktoré je možné zaťažiť pomerne veľkou priečnou silou, čím preberajú funkciu aj priečneho vypruženia. Prenos pozdĺžnych síl medzi skriňou a podvozkom je realizovaný pomocou tzv. lemniskátového mechanizmu (viď. obr 3-6), ktorý je pomerne malý a umožňuje priečny pohyb a takmer presné kinematické vedenie pri malých výchylkách podvozka. Prenos pozdĺžnych síl pomocou lemniskátového mechanizmu si môžeme všimnúť napr. pri podvozkoch od firmy Siemens, alebo Škoda (obr. 3-7). Pre zaistenie pozdĺžnej polohy podvozka voči skrini sa používa otočný čap, ktorý má v pozdĺžnom smere pomerne malú vôľu, v priečnom smere má však značnú vôľu, ktorá umožňuje podvozku relatívny pohyb voči skrini. Pri trakčných podvozkoch je taktiež používané riešenie tzv. ťažne-tlačnou tyčou. Toto usporiadanie je použité napr. pri trakčných podvozkoch rušňov od firmy Bombardier.



obr. 3-6 Schématický nákres lemniskátového mechanizmu [25]



obr. 3-7 Lemniskátový mechanizmus na rušni ŠKODA 109E1 (ČD 380) [26]

### 3.4 Redukcia silového pôsobenia na bok hlavy koľajnice

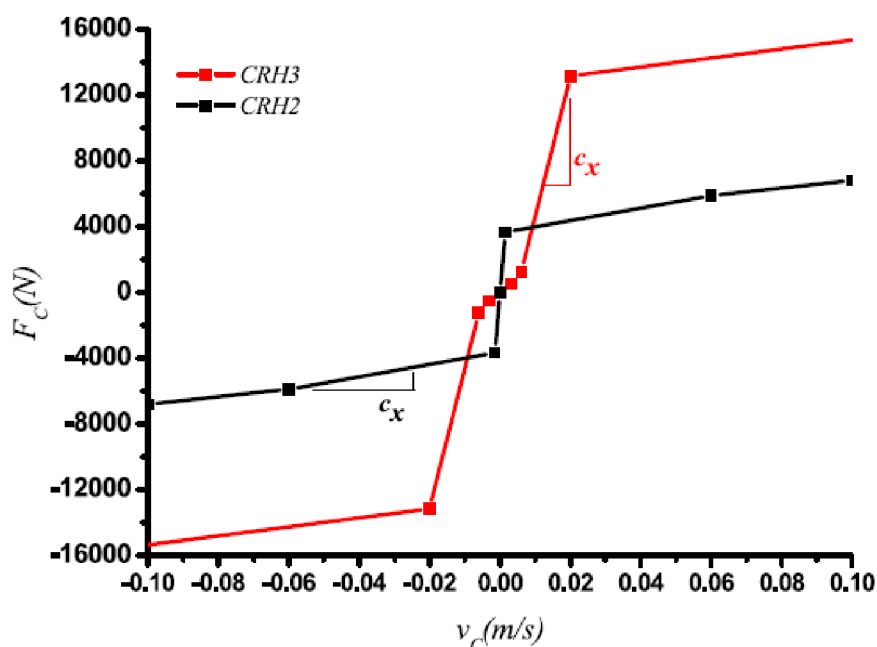
Hlavnou úlohou tlmiča vrtivých pohybov je znižovať účinok kmitania spôsobeného vrtením na podvozok a zabrániť tak nestabilnému chodu vozidla (dosiahnutia kritickej rýchlosti). Potreba tlmičov vrtenia sa ukázala až s príchodom tzv. *bezkolískových* podvozkov. Pri podvozkoch s kolískou bolo tlenie vrtenia realizované trecou väzbou medzi kolískou a skriňou vozidla. Táto väzba bola najčastejšie riešená formou plochého otočného čapu (plochej torne) a 2 postranných klzníc, ktorých úlohou bolo popri nesení skrine aj tlenie vrtivých pohybov podvozka. Pri bezkolískových podvozoch prvky sekundárneho vypruženia sprostredkovávajú popri prenose zvislého zaťaženia taktiež prenos priečných síl z podvozka na skriňu vozidla. Rozhodujúcimi parametrami sú pri návrhu tlmiča amplitúda a frekvencia vrtenia. Frekvencia vrtivého pohybu sa obvykle pohybuje okolo 3 až 8 Hz a veľkosť amplitúdy zdvihu tlmiča je v rádoch jednotiek milimetrov [12]. Tieto prevádzkové parametre treba brať v úvahu návrhu tlmiča.



obr. 3-8 Tlmič vrtivých pohybov na jednotke Siemens Velaro D BR 407 [27]

### 3.5 Pasívne vibroizolačné systémy

Jedným z prístupov, ako redukovať účinky vrtenia a s ním spojených problémov je zahrnutie konvenčného tlmiča (sústavy tlmičov) do konštrukcie podvozka vlaku (obr. 3-8). Kvôli malej frekvencii vrtenia a malého zdvihu tlmiča je potrebné aby dosiahol tlmič vysokej tlmiacej sily už pri malých rýchlostiach zdvihu tlmiča. Táto závislosť sa tiež nazýva F-v charakteristika. Preto sa F-v charakteristika tlmiča vrtivých pohybov vyznačuje prudkým vzostupom tlmiacej sily pri malých rýchlostiach a ustálením tlmiacej sily pri vyšších rýchlostiach zdvihu tlmiča. Konkrétne rýchlostné charakteristiky tlmičov vrtenia sú na obr. 3-8, kde je pre porovnanie znázornený rýchlostný priebeh na tlmiči vrtivých pohybov zo súpravy CRH3, ktorý je odvodený od jednotky ICE 3 (Siemens) a CRH2, odvodeným od jednotky Shinkansen E2 (Kawasaki Heavy Industries) [28].



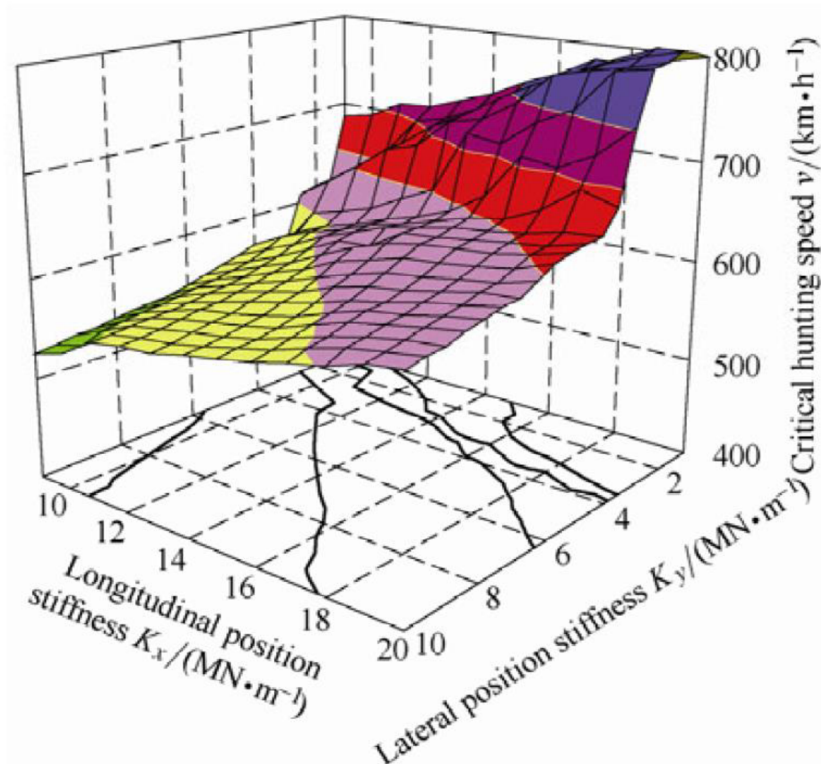
obr. 3-9 F-v charakteristika tlmiča vrtivých pohybov [28]

Na kritickú rýchlosť vozidla má okrem vlastností tlmičov vplyv taktiež tuhosť vypruženia podvozka. Vo všeobecnosti platí, že tuhosť primárneho vypruženia dosahuje rádovo vyššie hodnoty, ako tuhosť sekundárneho vypruženia. Je to spôsobené tým, že hlavnou úlohou primárneho vypruženia je vedenie dvojkolesia v koľajovom kanále a zaistenie stability dvojkolesia. V tab. 3-2 je možné vidieť porovnanie vertikálnej tuhosti vypruženia vysokorýchlostných súprav používaných v Číne. Hodnoty do tabuľky boli brané z viacerých zdrojov. Hlavnou úlohou sekundárneho vypruženia je zaistenie komfortu a bezpečnosti v skrini vlaku. Práve z tohto dôvodu sa v konštrukcii podvozkov nákladných vlakov nepoužíva sekundárne vypruženie a celkové pruženie spočíva na vypružení primárnom.

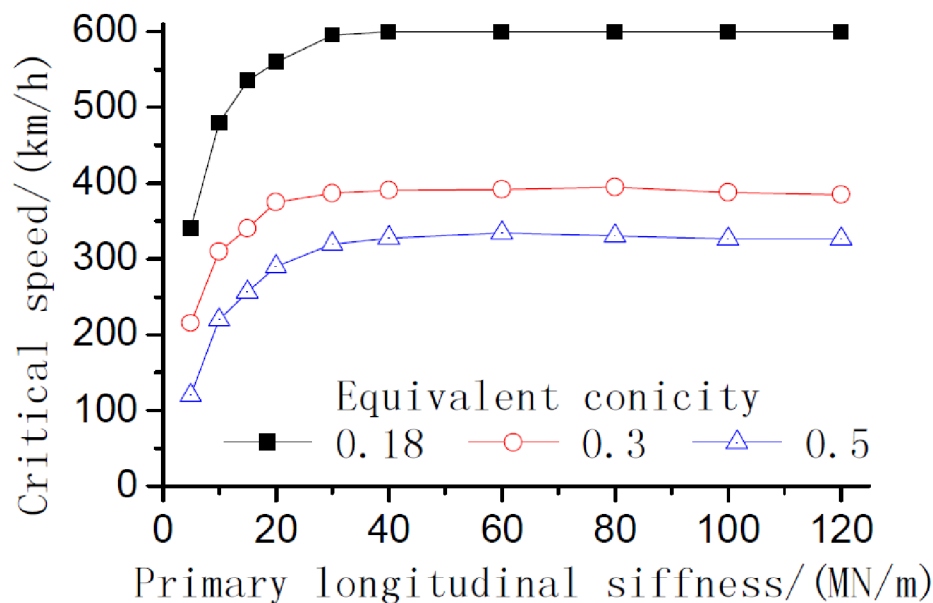
Označenie vlaku	Hmotnosť skrine	Hmotnosť dvojkoľesia	Vertikálna tuhosť vypruženia	
			Primárneho	Sekundárneho
[-]	[kg]	[kg]	[N/m]	[N/m]
CRH 3 (ICE 3)	48 000	2 400	1 040 000	400 000
CRH 2 (E2)	39 600	2 000	1 176 000	392 000
CRH 380	38 900	1 520	1 770 000	450 000

tab. 3-2 Príklad parametrov podvozka [29], [30], [31]

Ako pri primárnom, tak aj pri sekundárnom vypružení však rozoznávame ich pozdĺžnu, priečnu a vertikálnu tuhosť. Priamy vplyv na kritickú rýchlosť má však len tuhosť primárneho pozdĺžneho a primárneho priečného vypruženia. Vertikálna tuhosť vypruženia má vplyv skôr na komfort a vibrácie v skrii vozidla. Problematike kritickej rýchlosti sa venoval vo svojej práci D. Cui a kol. [23], ktorý určil kritickú rýchlosť ako závislosť na pozdĺžnej a priečnej tuhosti primárneho vypruženia. Pokiaľ sa pozrieme na kritickú rýchlosť ako závislosť týchto dvoch veličín, môžeme sledovať, že zvyšovaním tuhosti sa kritická rýchlosť zvyšuje [23] (obr. 3-10). Pri určitej hodnote tuhosti je však badateľné, že kritická rýchlosť stráca citlivosť na zmenu parametrov tuhosti primárneho vypruženia (obr. 3-11), kde boli brané v úvahu parametre vypruženia použité na podvozkoch súp ravy CRH 3.



obr. 3-10 Závislosť kritickej rýchlosti vozidla od tuhosti primárneho vypruženia [23]



obr. 3-11 Závislosť kritickej rýchlosti vozidla od tuhosti pozdĺžneho primárneho vypruženia a ekvivalentnej kužeľovitosti kolesa [28]

Je nutné povedať, že prílišné zvyšovanie priečnej a pozdĺžnej tuhosti vedie síce k zvyšovaniu hodnoty kritickej rýchlosti, ale pri vjazde do oblúka príliš tuhé primárne vypruženie vedie k veľkým hodnotám uhlu nábehu, čo následne výrazne zvýši opotrebenie okolesníka a priečne silové pôsobenie na koľaj, čo zvyšuje riziko vykoľajenia. V prípade tlmiča vrtivých pohybov má ideálna F-v charakteristika tlmiča pri malých rýchlostiach zdvihu nízku hodnotu tlmiacej sily, čo odpovedá vjazdu vlaku do prechodovej oblasti medzi priamou traťou a oblúkom. Pri väčších rýchlostiach zdvihu však potrebujeme prudký nárast tlmiacej sily, keďže predpokladáme, že podvozok sa dostáva na svoju kritickú rýchlosť (obr. 3-9, červená charakteristika). Dosiahnutie tejto charakteristiky je možné použitím adaptívnych tlmičov, ktorých však hlavnou nevýhodou je pomerne dlhý reakčný čas. Je teda na mieste venovať sa semiaktívnym, príp. aktívnym prvkom implementovaným vo vypružení podvozka, ktoré sú schopné prispôbiť svoje parametre na základe momentálnych jazdných parametrov vozidla a trate.

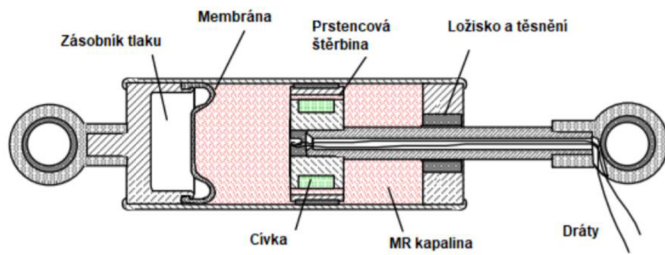
### 3.6 Semi-aktívne vibroizolačné systémy

Ďalším evolučným krokom je zavedenie semi-aktívnych prvkov do konštrukcie podvozka. Oproti adaptívnym prvkom sa semi-aktívne vyznačujú kratším reakčným časom medzi režimami minimálneho a maximálneho tlmenia. Táto zmena je realizovaná pomocou regulačného algoritmu, ktorý vo vhodnom čase zapína a vypína tlmenie a tým sa dosiahne požadovanej charakteristiky tlmiča [9]. Táto zmena sa častokrát deje aj viacej krát za sekundu. Dostupné je napríklad riešenie pomocou semi-aktívnych tlmičov s bežným tlmičovým olejom. Pri tomto type tlmiča sú pomocou elektromagnetu menené rozmery prietokového kanála a tým pádom aj veľkosť tlmiacej sily. Dvojstavový tlmič na tomto princípe ponúka komerčne firma Alstom pod označením Dispen [33], ktorý využíva na svojich súpravách AGV (obr. 3-12).



obr. 3-12 Alstom Dispen Bi-mode damper [33]

Poslednú dobu vzbudzuje záujem inžinierov z rôznych odvetví technológia magneto-rheologických tlmičov (ďalej len MR tlmič). Princíp funkcie MR tlmiča spočíva v tom, že kvapalina v ňom obsiahla je schopná vplyvom magnetického poľa v zlomku sekundy zmeniť svoje viskózne vlastnosti a tým meniť jeho tlmenie. Jeho hlavná výhoda spočíva v kratšom reakčnom čase oproti adaptívnemu tlmiču a pomerne jednoduchšej montáži. Oproti aktuátoru sa MR tlmič vyznačuje taktiež nízkou energetickou spotrebou, nižšími nákladmi na obstaranie a prevádzku a nevyžaduje výrazný zásah do konštrukcie podvozka. Komerčné uplatnenie MR tlmičov sa už našlo v automobilovom priemysle. Ich rozšírená aplikácia však koľajovú dopravu ešte nepostihla. Je to následkom toho, že vo vysokorýchlostnej železničnej doprave sa už desaťročia používajú aktívne prvky (aktuátory) napr. pri naklápaní súprav. O použití MR tlmičov v koľajovej doprave sú dostupné zatiaľ len návrhy tlmičov, štúdie zahrňujúce numerické modelovanie a testovanie rôznych konfigurácií. Pre predstavu možných riešení uvediem niektoré z nich.



obr. 3-13 Jednoplášťový MR tlmič [34]

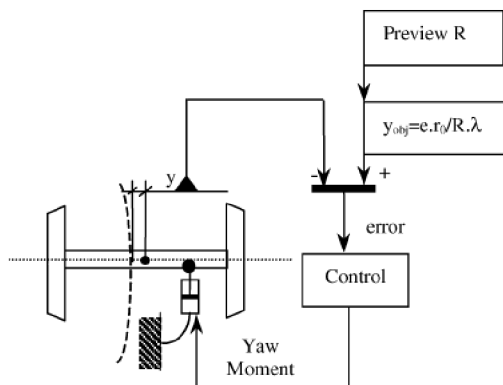
Príklady regulácie primárneho vibroizolačného systému pri jazde v oblúku uviedol vo svojom článku napr. J. Pérez [35]. Kde sa zaoberá prvkami aktívneho riadenia. Autor ponúka tri možnosti riadenia a ich vstupných parametrov, tými sú:

### 3.6.1 Regulácia priečnej polohy dvojkolesia s úmyslom docieľiť prostého valenia.

Prosté valenie je jav pri ktorom nevznikajú účinkom sklzu kolies po koľajnici pozdĺžne sklzové sily. Dá sa toho docieľiť nastavením priečnej polohy dvojkolesia. Autorom požadovaný priečný posuv je daný vzťahom,

$$y = \frac{er_0}{\lambda R}, [35]$$

kde  $e$  predstavuje polovičnú veľkosť rozchodu dvojkolesia (0,7 m),  $r_0$  predstavuje polomer kolesa (0,455 m),  $\lambda$  označuje kužeľovitosť kolesa a  $R$  predstavuje polomer oblúku.



obr. 3-14 Diagram regulácie pomocou priečného posuvu dvojkolesia [35]

Potencionálny problém ale môže predstavovať skutočnosť, že pri tejto metóde riadenia je potrebná znalosť o aktuálnom polomere oblúku. Autor navrhuje riešenie pomocou pozičného systému, ktorý sa v súčasnosti používa pri prevádzke naklápacích súprav. Ako príklad pozičného systému môžeme uviesť sústavu Eurobalízy (obr. 3-15), ktoré sú súčasťou zabezpečovacieho systému ETCS. Po prejení vlaku nad eurobalízou dostáva vlak pomerne presnú informáciu o svojej polohe príp. informáciu o polohe ďalšej eurobalízy na trati, o sklonových pomeroch na trati, alebo príp. obmedzeniach.

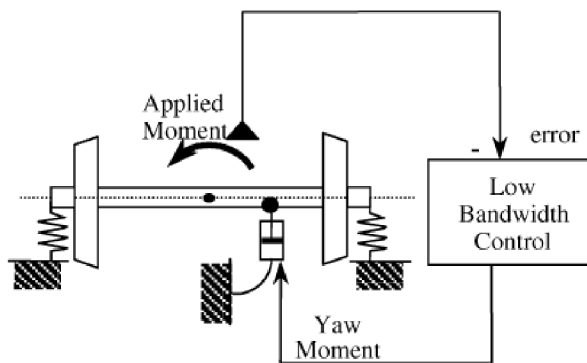




obr. 3-15 Eurobaliza [36]

### 3.6.2 Regulácia momentu okolo zvislej osy s úmyslom docielenia prostého valenia

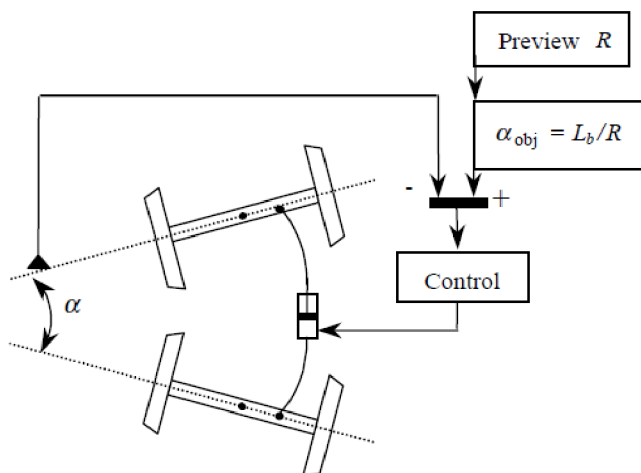
Inú formuláciu prostého valenia ponúka Shen a Goodall [37]. *Pri vybočení dvojkolesia zo svojej ideálnej polohy dochádza k sklzu vonkajšieho a vnútorného kolesa. Tento sklz vyvoláva tzv. sklzové sily, ktoré sa prejavujú na dvojkolesí momentom okolo zvislej osy. Jediná situácia pri ktorej je tento moment nulový je pokiaľ dochádza k prostému valeniu.* Snahou tejto metódy je docielenie nulového momentu pôsobiaceho na dvojkolesie pomocou semi-aktívnych, príp. aktívnych členov.



obr. 3-16 Diagram regulácie pomocou aplikácie momentu okolo zvislej osy [35]

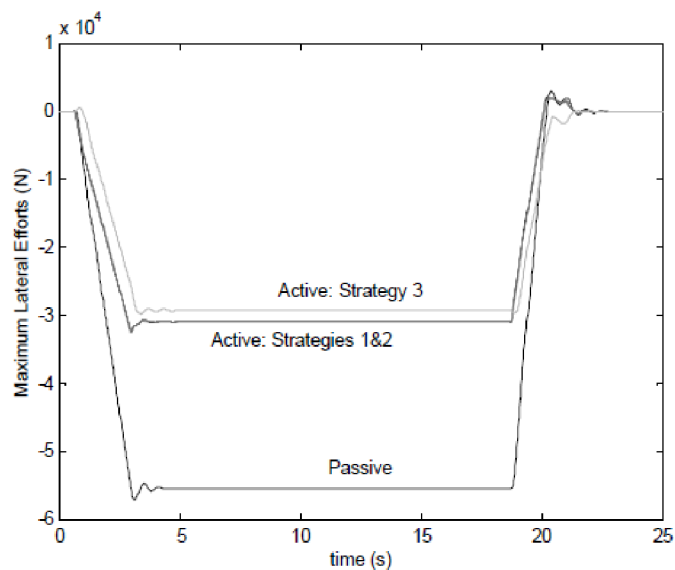
### 3.6.3 Regulácia relatívneho uhlu medzi dvojkolesiami

Táto metóda sa snaží kompenzovať odstredivé silové pôsobenie, pôsobením priečnych sklzových síl. Tieto sily sú závislé hlavne na veľkosti uhla nábehu. Preto sa autor snaží doceliť rovnakého uhla nábehu na prednom a zadnom dvojkolesí. Cieľom tejto metódy tak nie je predísť priečnemu silovému pôsobeniu na koleso, ale rozdistribúovať ho na viacero dvojkolesí. Distribúcia priečneho silového zaťaženia by spôsobila nižší kontaktný tlak na bok koľaje od predného dvojkolesia v podvozku, ktoré je v súčasnosti namáhané viac ako dvojkolesie zadné, a čiastočne by tak preniesla zaťaženie na zadné dvojkolesie podvozka.



obr. 3-17 Diagram regulácie relatívneho uhla nábehu medzi dvojkolesiami [35]

Vo výsledku je badateľné, že všetky z metód regulácie mali pozitívny vplyv ako na pričné silové pôsobenie na koleso, tak na opotrebenie a maximálnu hodnotu uhla nábehu. Výsledky metód 1 a 2 ukazujú veľmi podobné výsledky keďže obe majú za úlohu doceliť stav prostého valenia, metóda 3 funguje na inom princípe a z pohľadu pričného silového pôsobenia dosahuje výsledkov ešte lepších ako predchádzajúce dve metódy.

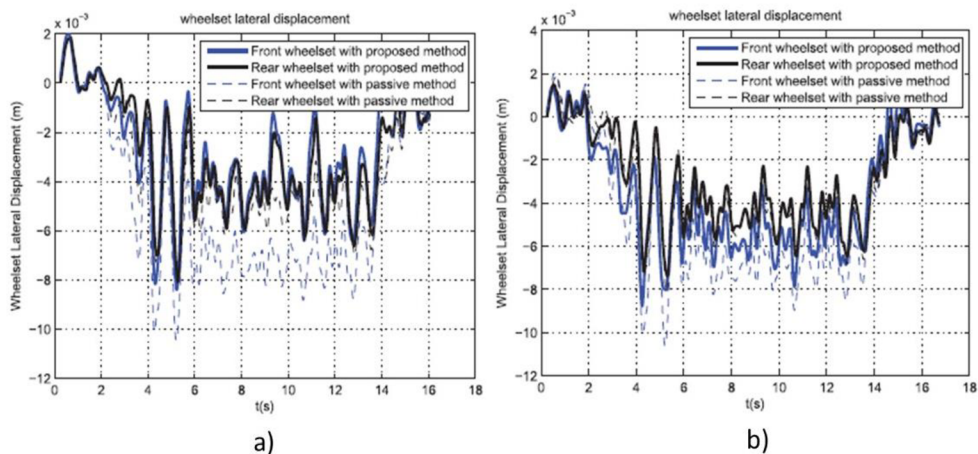


obr. 3-18 Porovnanie metód z hľadiska maximálneho pričného silového pôsobenia [35]

### 3.6.4 Tlmenie pričných vibrácií

Na výsledky práce J. Pérez-a naviazal vo svojej práci Xiukun Wei a kol. [38], kde sa zaoberal modelovaním semi-aktívneho pričného tlmenia vibrácií medzi dvojkolesím a rámom podvozka pomocou MR tlmičov. Prvá metóda sa na základe zmeny uhlovej rýchlosti okolo zvislej osy snaží minimalizovať uhol nábehu kolesa a tým zmenšiť silové pôsobenie na bok kolesa/kol'ajnice.

Druhá metóda vychádza z metódy navrhovanej J. Peréz-om. Konkrétne sa jedná o metódu regulácie pomocou aplikácie momentu okolo zvislej osy. Regulácia je sprostredkovaná pomocou MR tlmičov zaradených do primárneho vypruženia vlaku. Je dôležité poznamenať, že MR tlmič je stále „pasívny“ prvok schopný iba dissipovať energiu. To má za následok, že MR tlmič je schopný produkovať silu iba pokiaľ je uhlová rýchlosť vrtenia dvojkoľesia a podvozka rozdielna.



obr. 3-19 Simulačný výpočet priečného posuvu predného a zadného dvojkoľesia podvozka; a) metóda 1; b) metóda 2 [38]

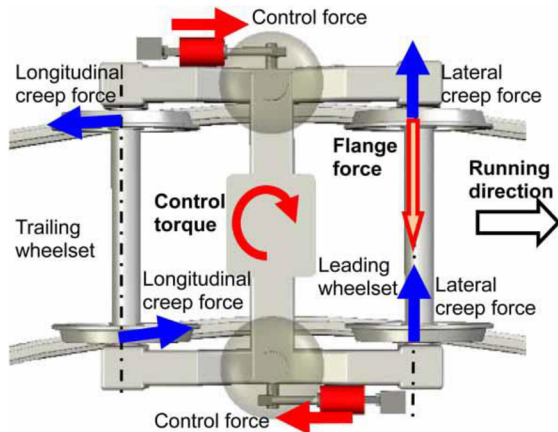
Z grafov na obr. 3-19 je badateľné, že autorom navrhovaná metóda 1, ktorá má ako riadiacu veličinu iba uhlovú rýchlosť vrtenia dvojkoľesia a uhlovú rýchlosť dvojkoľesia okolo vertikálnej osy, pričom je logicky jednoduchšia dosahuje lepších výsledkov ako metóda 2. Priemerná hodnota redukcie priečného posuvu predného dvojkoľesia činila v I. metóde 25 %, v prípade II. metódy 19,12 %. Či už z tvrdení autora, alebo z jeho výsledkov je teda zrejmé, že použitie semi-aktívnych prvkov v primárnom vypružení podvozka výrazne zlepši jazdné vlastnosti vlaku pri jazde oblúkom v porovnaní s pasívnymi tlmičmi.

### 3.7 Aktívne vibroizolačné systémy

Požiadavkami na podvozok sú výborné jazdné vlastnosti pri jazde oblúkom a vysoká kritická rýchlosť. Pre dosiahnutie týchto protichodných vlastností sa musia pri použití pasívnych prvkov stanoviť isté kompromisy v tuhosti primárneho a sekundárneho vypruženia. Aby sa docielilo dobrého vedenia dvojkoľesia aj pri jazde v úzkom oblúku za vysokej rýchlosti, považuje sa za efektívne riešenie nútené natáčanie podvozka, alebo dvojkoľesia do oblúku. Deje sa tak, za použitia aktívnych prvkov (aktuátorov).

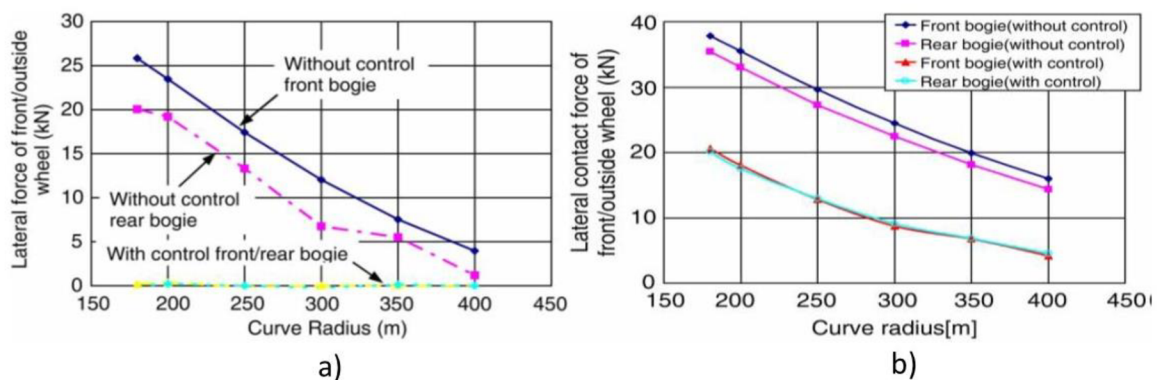
### 3.7.1 ABS

Matsumoto A. a kol. [39] navrhli podvozok s aktívnym natáčaním (active-bogie-steering), pričom svoje riešenie následne analyzovali pomocou dynamickej simulácie v software A’GEM a výsledky následne overili na testovacom stand-e v NTSEL, ktorý je schopný simulovať jazdné podmienky v oblúku o určitom polomere. Princíp spočíva na základe natočenia celého podvozka dvojicou aktuátorov relatívne voči skriani, čím sa docieli optimálnej radiálnej polohy podvozka a výrazne sa tým zníži silové pôsobenie spôsobené kontaktom okolesníka vonkajšieho kola predného dvojkoľesia v podvozku (obr. 3-20).



obr. 3-20 Schéma ABS podvozka so silovým pôsobením na podvozok [39]

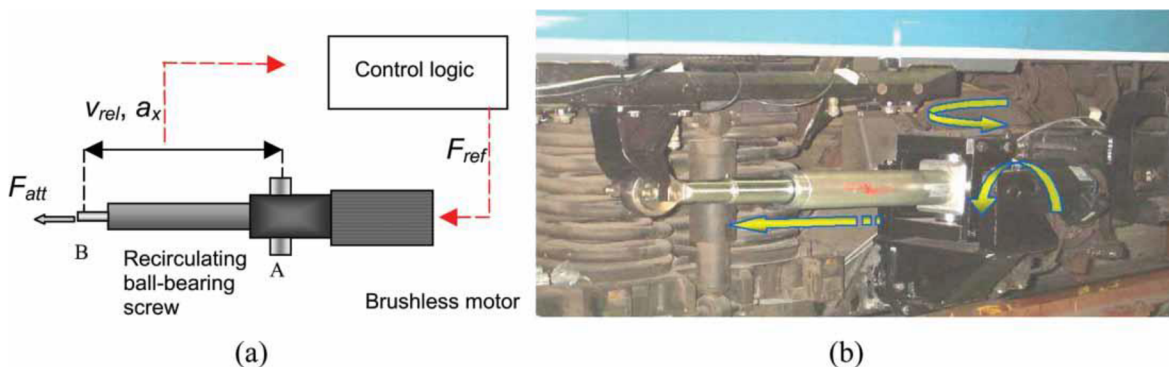
Autor predkladá taktiež dve možnosti riadenia. V prvom variante tzv. *Zeroing control* je docielené úplnej eliminácie priečneho silového pôsobenia na koleso. Simulácia zaťaženia počas rozdielnych podmienok ukázala, že sila ktorá je potrebná na natočenie podvozka je závislá na drsnosti jazdnej plochy kolesa a hmotnosti vozidla. Pre zistenie oboch týchto veličín by bola potrebná inštalácia ďalších senzorov a komplexnejšej riadiacej jednotky. Druhý variant tzv. *Practical control strategy* uvažuje o zavedení kompromisu medzi úplným a samovoľným natáčaním podvozka. Nepodari sa síce úplne eliminovať priečne silové pôsobenie na koleso, podari sa ho ale výrazne znížiť, čo sa vo väčšine prípadov javí ako dostatočné (obr. 3-21b). Rozdiely v neriadenom stave spočívajú v rozdielnych parametroch prevádzky v simulácii.



obr. 3-21 Priečne silové pôsobenie na koleso; a) Zeroing control; b) Practical control strategy [39]

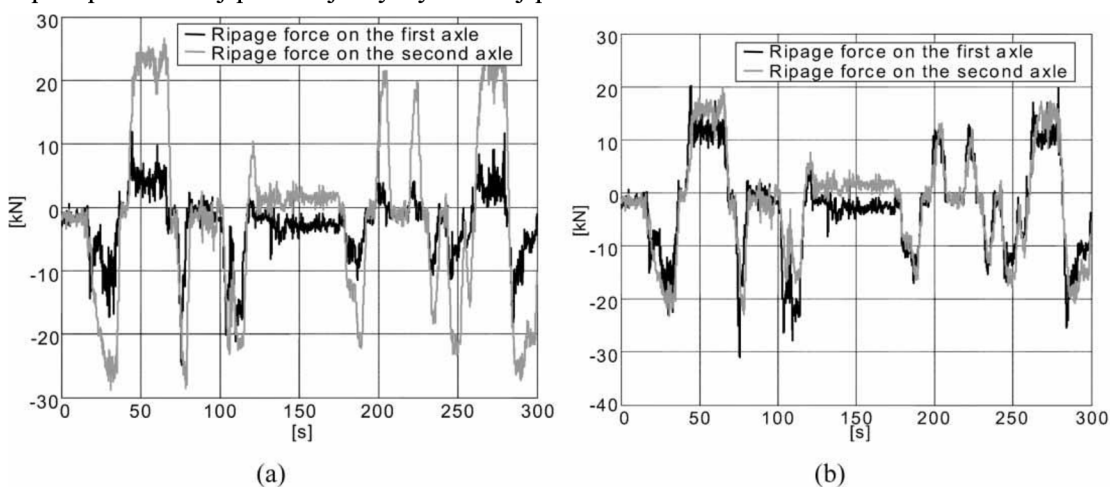
### 3.7.2 AASA

Pri tomto návrhu Strojníckej fakulty univerzity v Miláne bolo uvažované nahradenie tlmičov vrtivých pohybov aktuátormi na súprave ETR 470 Pendolino [40]. Každý aktuátor pozostáva z elektrického bezkefkového motora pripojeného na guľôčkovú skrutku, čím sa zostrojí lineárny aktuátor. Pripojený je na jednej strane o skriňu rotačnou väzbou a na druhej guľovou väzbou, ktorá umožní naklápanie skrine. Riadiacou veličinou je v tomto prípade referenčný signál  $F_{ref}$ , ktorý je lokálnou riadiacou jednotkou premenený na elektrický signál, poháňajúci el. motor. Aby bolo možné určenie referenčného signálu je potrebné, aby lokálna riadiaca jednotka poznala momentálne prevádzkové parametre podvozka. Toho sa docieli umiestnením rýchlomerov a akcelerometrov do konštrukcie aktuátora.



obr. 3-22 AASA; a) schematický náčrt aktuátora; b) jeho umiestnenie na testovacom vozidle [40]

Testy boli vykonané na trojčlennej súprave ETR 470 Pendolino na pravidelnej linke, pričom boli na jednom vozidle nahradené pasívne tlmiče aktuátormi AASA. Pri jazde po priamej trati sa pri použití AASA podarilo doceliť priemerne 20 % redukcie priečného zrýchlenia. Merania pri jazde v oblúku boli vykonané pri zapnutom riadiacom systéme, ale vypnutých aktuátoroch. Pomocou tejto konfigurácie bolo možné obdržať hodnoty na výstupe z riadiacej jednotky, ale vozidlo malo charakteristiky pasívnej konfigurácie. Výsledná hodnota priečného silového pôsobenia sa dopočítala sčítaním nameranej priečnej sily a predpokladanej priečnej sily vyvolanej pôsobením aktuátorov.



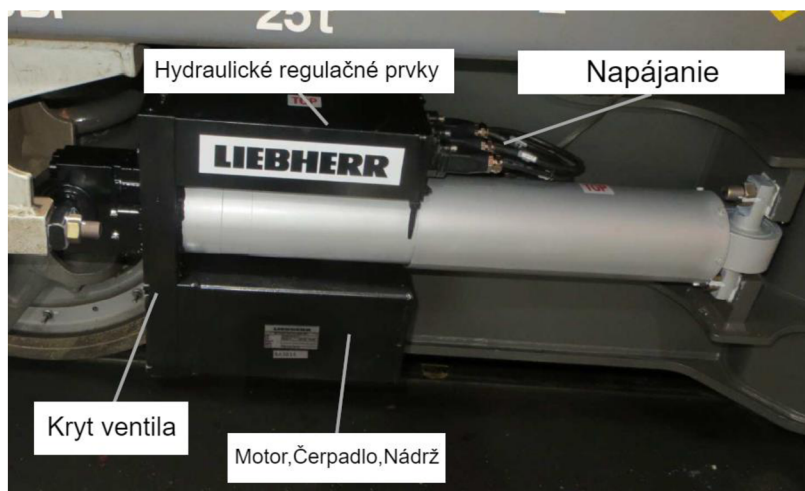
obr. 3-23 Silové pôsobenie pri vjazde do oblúku; a) pri použití pasívneho tlmiča; b) pri použití AASA [40]

### 3.7.3 ADD

Tento typ aktívneho tlmiča (nem. „aktiver Drehdämpfer“) bol vyvinutý počas spolupráce firmy Siemens a Liebherr a testovanie prebehlo na lokomotívach ES64F4 a ES64U2 Taurus [41]. Jedná sa komerčne ponúkaný aktívny tlmič pričom jeho hlavnou výhodou je, že aktuátor je integrovaný do samotného tlmiča. ADD je označovaný ako elektrohydraulický aktuátor (EHD) pričom požadovaná sila aktuátora je vyvinutá tlakom kvapaliny od čerpadla, ktoré je umiestnené pod tlmičom (viď obr. 3-22). Tlmič je schopný pracovať v troch prevádzkových režimoch [42]:

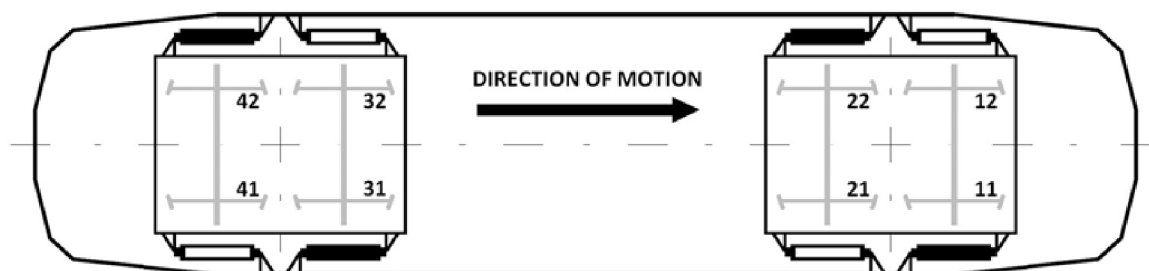
- pasívny, pracuje ako konvenčný tlmič,
- semi-aktívny, pracuje ako viacstavový tlmič,
- aktívny, pracuje ako ADD.

Účelom tohto aktívneho tlmiča je redukcia priečneho silového pôsobenia na koleso počas jazdy v oblúku o malom polomere. V súčasnosti tieto aktívne tlmiče nahradili tlmiče vrtivých pohybov na vybraných rušňoch typu Vectron firmy Siemens.



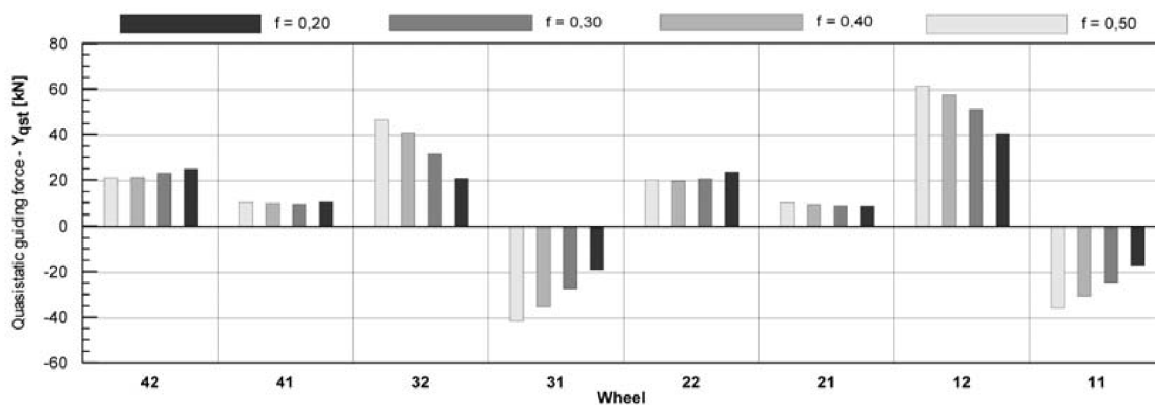
obr. 3-24 ADD [42]

Zaradením takéhoto systému do podvozku rušňa sa venoval Michálek T. [41], vo svojej práci keď nahradil štyri z ôsmich tlmičov vrtenia na rušni Škoda 109E (380 ČD) ADD tlmičmi a výpočet vykonal v software SJKV vyvinutým na pôde Univerzity Pardubice (obr. 3-25).



obr. 3-25 Navrhované radenie pasívnych tlmičov (biele) a aktívnych tlmičov (čierna) ŠKODA 109E [41]

Vo výsledkoch porovnával autor pôsobenie na vonkajšie koleso prvého a tretieho dvojkoľesia lokomotívy pričom dospel k záveru, že použitie ADD má pozitívny vplyv na priečne silové pôsobenie pri vedení vozidla oblúkom. Autor taktiež skonštatoval, že výrazný vplyv na veľkosť priečného silového pôsobenia má hlavne koeficient šmykového trenia v kontakte koleso-koľajnica a polomer oblúku (viď obr. 3-24).



obr. 3-26 Kvázistatické silové pôsobenie na koleso pri zmenách koeficientu šmykového trenia v oblúku o polomere  $R=300\text{m}$  a pri sile aktuátora  $F_{act}=15\text{ kN}$  [41]

## 4 DISKUSIA

Z prvej časti spracovanej rešerše ohľadom rýchlovlakov vyplynulo, že spoločným črtom pre všetky moderné súpravy je konfigurácia s distribuovaným výkonom a trakciou (EMU). Výhoda tejto konfigurácie spočíva v lepších trakčných vlastnostiach vlaku pri rozbehu a brzdení a lepšej distribúcii hmotnosti naprieč súpravou. Medzi nevýhody však patrí komplikovaná výmena trakčného podvozka, príp. výzbroje uprostred súpravy v prípade vyradenia z prevádzky. Pokiaľ porovnáme generáciu rýchlovlakov zo začiatku 90. rokov a tú súčasnú vidíme prechod od Push-pull usporiadania vlaku k EMU usporiadaniu pokiaľ to koncepcia vlaku umožňuje. Jediná súprava z rešerše, pri ktorej sa pri zachovaní súčasnej koncepcie vlaku nejaví výhodné distribuovať trakčné podvozky naprieč súpravou je Španielska súprava Talgo špecifická svojimi jednonápravovými podvozkami s nezávisle točiacimi sa kolesami a prirodzeným systémom naklápania (obr. 4-1). Prirodzený systém naklápania spočíva v uchytení podvozka ku skrini nad ťažiskom skrine, ktorá sa následkom odstredivej sily pri prejazde oblúkom naklopí. Z rešerše je taktiež badateľný odklon od prostého zvyšovania traťovej rýchlosti a sústredenie sa na optimalizáciu jazdných parametrov a zvyšovanie kapacity súprav. Práve súprava s EMU usporiadaním plní lepšie tieto požiadavky ako usporiadanie Push-pull.

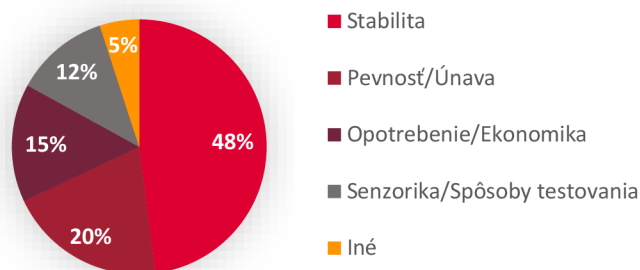


obr. 4-1 Podvozok Talgo na Innotrans 2008 [43]

Pokiaľ sa pozrieme na súčasnú problematiku týkajúcu sa podvozkov zistíme, že objektom záujmu väčšiny vedeckých článkov je stabilita podvozka, príp. vplyv parametrov vibroizolačného systému vlaku na jeho jazdné parametre. Štatistická vzorka s náhodným výberom predstavovala sto článkov s dátumom vydania najneskôr 1.1.2015. Na základe výsledkov štatistiky považujem orientáciu bakalárskej práce voči stabilite podvozka a metódam vedúcich k jej zlepšeniu za vhodnú.



## Štatistika



obr. 4-2 Štatistika článkov

Z časti rešerše o vibroizolačných systémoch plynie, že kritická rýchlosť javí citlivosť na hodnotu ekvivalentnej kuželovitosti kolesa a tuhosti pozdĺžneho a priečneho primárneho vypruženia. Dá sa povedať, že vyššia tuhosť primárneho vypruženia vedie k zvýšeniu kritickej rýchlosti vozidla. Toto však platí iba do určitej hodnoty tuhosti, po ktorej prekročení sa hodnota kritickej rýchlosti prestane naďalej zvyšovať [32]. Vyššia tuhosť primárneho vypruženia je však nevýhodná pri jazde v oblúku, kde bráni prirodzenému natáčaniu dvojkolesia. Preto je potrebné nájsť určitý kompromis medzi vedením vozidla v oblúku a po priamej trati. Ďalej boli uvedené tri varianty vibroizolačných systémov rozdelené na základe regulácie. Každý variant ponúka výhody a nevýhody zhrnuté v tab. 4-1. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri použití aktívnych vibroizolačných systémov pričom je možné na základe regulácie úplne eliminovať priečne silové pôsobenie na bok hlavy koľaje. Takáto regulácia je však energeticky náročná a obdržanie vstupných veličín by si vyžiadalo montáž ďalších senzorov a komplexnejšiu riadiacu jednotku. Kompromisom je použitie *Practical control strategy* [39], pri ktorej sa zníži energetická náročnosť aktuátorov a zároveň sa dosiahne dostačujúcich výsledkov.

	Výhody	Nevýhody
Pasívne	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pomerne lacné riešenie</li> <li>▪ Dlhodobo používané riešenie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Obmedzenie v podobe stálej F-v charakteristiky tlmiča</li> <li>▪ Pomalá reakcia pri adaptívnych tlmičoch</li> </ul>
Semi-aktívne	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menšie zástavbové rozmery oproti aktívnym vibroizolačným systémom</li> <li>▪ Lacnejšie riešenie než v prípade aktívnych systémov</li> <li>▪ Nižšia energetická náročnosť oproti aktívnym vibroizolačným systémom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Problematická regulácia</li> <li>▪ V súčasnosti použité iba tlmiče s bežným tlmičovým olejom</li> <li>▪ Doposiaľ malé využitie MR tlmičov v koľajovej doprave</li> </ul>
Aktívne	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Najlepšie výsledky v rámci výsledného silového pôsobenia na bok hlavy koľaje</li> <li>▪ Použitie poznatkov z naklápacích súprav</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Problematická regulácia</li> <li>▪ Energetická náročnosť</li> <li>▪ Obstarávacia cena</li> <li>▪ Veľké zástavbové rozmery</li> <li>▪ Hmotnosť (v prípade ADD 70 kg)</li> </ul>

tab. 4-1 Porovnanie vibroizolačných systémov v podvozku súpravy

Na základe trendov z posledných rokov je možné predpokladať, že pozornosť bude venovaná najmä aktívne riadeným podvozkom s určitým stupňom mechatronizácie v spojení s naklápacími súpravami. Práve tieto mechatronické podvozky budú schopné či už natočenia dvojkolesí, alebo podvozka do oblúku, čím sa zaistí plynulý prechod oblúkom s malým polomerom za vysokej rýchlosti a predíde sa nestabilnému chodu vozidla pri jazde po priamej koľaji.

## 5 ZÁVER

Predložená rešeršná bakalárska práca sa venuje problematike podvozkov železničných súprav pre rýchlosť nad 200 km/h so špeciálnym zameraním na pruženie a tlmenie náprav. Samotná rešerš je členená na dve časti. Prvá časť rešerše sa venuje základnej koncepcii rýchlovlakov. Boli porovnané možné spôsoby trakčného usporiadania vlaku s analýzou výhod a nevýhod každej z nich. Ďalej bol spracovaný geografický prehľad vybraných v súčasnosti prevádzkovaných rýchlovlakov spolu s ich hlavnými parametrami pričom pozornosť bola venovaná hlavne oblasti západnej Európy a východnej Ázie. Druhá časť práce sa venuje samotným podvozkom rýchlovlakov a to konkrétne vibroizolačným systémom. Vibroizolačné systémy boli rozdelené do troch kategórií na základe ich regulácie s následným porovnaním v diskusnej časti. Boli menované možné spôsoby tlmenia vrtivých pohybov podvozka a taktiež možné regulácie týchto vibroizolačných systémov. V diskusnej časti bola taktiež vyhotovená štatistika týkajúca sa obsahu vedeckých článkov z posledných rokov a načrtnutý možný smer ďalšieho technického vývoja.

## 6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *Bogie. Railsystem.net* [online]. ©2015 [cit. 3.4.2019]. Dostupné z: <http://www.railsystem.net/bogie/>
- [2] ČSN ISO 2631-1. *Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím. Část 1: Všeobecné požadavky*, Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [3] DANZER, J. Elektrická trakce 7. Adheze. [online] © 4.11.2008 [cit. 21.3.2019]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/ET%20skripta%20Danzer/ETR700.pdf>
- [4] IWNICKI, S. (Simon). *Handbook of railway vehicle dynamics*. © 2006. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006, 535 s. : il. ISBN 0-8493-3321-0.
- [5] SAWLEY, Kevin a Huimin WU. The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2005, **258**(7), 1179-1186 [cit. 24.3.2019]. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.029. ISSN 0043-1648.
- [6] MAZILU, Traian a Traian MAZILU. An analysis of bogie hunting instability. *University "Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering* [online]. 2009, **71**(2), 63-78 [cit. 22.3.2019]. ISSN 1454-2358. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/34782496/>
- [7] IZER, J. a J. ZELENKA: Charakteristiky kontaktní geometrie. [online]. In *Scientific papers of the University of Pardubice, Series B – The Jan Perner Transport Faculty 2* (1996), 39–62. [cit. 24.3.2019]. ISSN 1211-6610. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/67989>
- [8] ČÁP, J.: Určování orientovaných adhezních charakteristik, [online]. In *Scientific papers of the University of Pardubice, Series B – The Jan Perner Transport Faculty 2* (1996), 71–82. [cit. 24.3.2019]. ISSN 1211-6610. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/67991/CapJ\\_UrcovaniOrientovanych\\_1996.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/67991/CapJ_UrcovaniOrientovanych_1996.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [9] KUBÍK, M. Magnetorheological suspension damper for space application. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Supervisor: Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [10] The definition of High Speed Rail. *Union internationale des chemins de fer: e-News #596 - High Speed* [online]. © 26.4.2018 [cit. 24.3.2019]. Dostupné z: <https://uic.org/com/uic-e-news/596-high-speed/#article7738>
- [11] CONSTANTIN Vlad. Siemens 1216 OBB Railjet © 17.2.2018. [online]. [cit. 3.4.2019]. Dostupné z: [https://live.staticflickr.com/4696/40634930022\\_fdd80f4cac\\_b.jpg](https://live.staticflickr.com/4696/40634930022_fdd80f4cac_b.jpg)

- [12] KOLÁŘ, Josef. Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04262-5.
- [13] PEIGHAMBARI, Arman. High-speed train market set to slow. *International Railway Journal* [online]. New York: Simmons-Boardman Publishing Corporation, 2014, **54**(2), 35-37 [cit. 2019-03-23]. ISSN 21617376. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1504974058/>
- [14] ROSS, David. *Encyklopédia lokomotív a vlakov*. © 2005. Praha: OTTOVO NAKLADATELSTVÍ, 2005. ISBN 80-7360-3284.
- [15] ICE 4 (BR 412) high-speed trains [online katalogový list]. Siemens AG ©2016 [cit. 3.4.2019]. Dostupné z: [https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/high-speed-and-intercity-trains/icx/datenblatt\\_ice\\_4\\_en.pdf](https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/high-speed-and-intercity-trains/icx/datenblatt_ice_4_en.pdf)
- [16] Alstom unveils the AGV. (Industry News). *Mass Transit* [online]. Cygnus Business Media, 2008, **34**(2), 36 [cit. 3.4.2019]. ISSN 0364-3484.
- [17] ANONYMOUS. Cisalpino II in service at last. *Railway Gazette International* [online]. London: DVV Media UK Limited, 2009, **165**(9), 28 [cit. 3.4.2019]. ISSN 03735346. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/207471508/>
- [18] ANONYMOUS. First Talgo 250 train arrives in Tashkent. *International Railway Journal* [online]. New York: Simmons-Boardman Publishing Corporation, 2011, **51**(8), 4 [cit. 3.4.2019]. ISSN 21617376. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/884231120/>
- [19] LIU, Feng, Song YAO, Jie ZHANG a Yi-ben ZHANG. Effect of increased linings on micro-pressure waves in a high-speed railway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research* [online]. Elsevier, 2016, **52**, 62-70 [cit. 3.4.2019]. ISSN 0886-7798. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.020>
- [20] Hitachi Review [online katalogový list]. Hitachi ©10.3.2016 [cit. 3.4.2019]. Dostupné z: [https://www.hitachi.com/rev/pdf/2014/r2014\\_10\\_all.pdf](https://www.hitachi.com/rev/pdf/2014/r2014_10_all.pdf)
- [21] ČSN 28 0001: Kolejová vozidla železniční. Základní termíny a definice, Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [22] MANHART Marcel. *Stadler-SBB-Giruno-Innotrans-2016* © 20.9.2016. [online]. [cit. 15.4.2019]. Dostupné z: [http://www.bahnonline.ch/bo/wp-content/uploads/2016/09/Stadler-SBB-Giruno-Innotrans-2016-3\\_Marcel-Manhart\\_20-9-16.jpg](http://www.bahnonline.ch/bo/wp-content/uploads/2016/09/Stadler-SBB-Giruno-Innotrans-2016-3_Marcel-Manhart_20-9-16.jpg)
- [23] CUI, Dabin, Li LI, Xuesong JIN, Xinbiao XIAO a Junjun DING. Influence of vehicle parameters on critical hunting speed based on Ruzicka model. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2012, **25**(3), 536-542 [cit. 24.3.2019]. DOI: 10.3901/CJME.2012.03.536. ISSN 1000-9345.

- [24] The Vectron bogie-flexible and future-proof. Siemens Mobility AG [online]. ©2011 [cit. 15.4.2019]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/rail-solutions/locomotives/vectron/technology/modular-locomotive-concept/flexible-drive/pages/flexible-drive.aspx>
- [25] Railway suspension. Book: The Contact Patch [online]. [cit. 15.4.2019]. Dostupné z: <http://the-contact-patch.com/book/rail/r1114-railway-suspension>
- [26] Lokomotiva 109 E. *Fotografie podvozku bez popisu* [online]. 2008 [cit. 21.4.2019]. Dostupné z: <https://109-e.wgz.cz/rubriky/popis-lokomotivy-109-e/podvozky/fotografie-podvozku-bez-popisu>
- [27] *Schlinderdämpfer* [online], 3.5.2016, posledná revízia 20.4.2019 [cit. 1. 1. 2006], Wikipedie. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schlinderdämpfer>
- [28] DONG, H., B. ZHAO a Y. DENG. Instability phenomenon associated with two typical high speed railway vehicles. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **105**, 130-145 [cit. 6.4.2019]. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2018.06.006. ISSN 00207462. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020746218300520>
- [29] LING-KUN, Chen, Jiang LI-ZHONG, Guo WEI, Liu WEN-SHUO, Zeng ZHI-PING a Chen GE-WEI. The Seismic Response of High-Speed Railway Bridges Subjected to Near-Fault Forward Directivity Ground Motions Using a Vehicle-Track-Bridge Element. *Shock and Vibration* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2014, **2014** [cit. 7.4.2019]. DOI: 10.1155/2014/985602. ISSN 1070-9622.
- [30] WEI, Kai, Feng WANG, Ping WANG, Zi-xuan LIU a Pan ZHANG. Effect of temperature- and frequency-dependent dynamic properties of rail pads on high-speed vehicle-track coupled vibrations. *Vehicle System Dynamics* [online]. Taylor & Francis, 2017, **55**(3), 351-370 [cit. 7.4.2019]. DOI: 10.1080/00423114.2016.1267371. ISSN 0042-3114.
- [31] ZHANG, X., Z. WEN, W. CHEN, X. WANG a Y. ZHU. Dynamic analysis of coupled train-track-bridge system subjected to debris flow impact. *Advances in Structural Engineering* [online]. SAGE Publications Inc, 2018, **22**(4), [cit. 7.4.2019]. DOI: 10.1177/1369433218785643. ISSN 13694332.
- [32] DONG, H., B. ZHAO a Y. DENG. Instability phenomenon associated with two typical high speed railway vehicles. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **105**, 130-145 [cit. 6.4.2019]. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2018.06.006. ISSN 00207462. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020746218300520>
- [33] *Dispen dampers: Enhancing the passenger journey*. Alstom.com [online]. ©17.7.2018 [cit. 28.4.2019]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/our-solutions/components/dispen-dampers-enhancing-passenger-journey>

- [34] LOCHMAN, V. *Rekonstrukce nedemontovatelného MR tlumiče LORD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc..
- [35] PÉREZ, J., J.m. BUSTURIA a R.m. GOODALL. Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles. *Control Engineering Practice* [online]. Elsevier Ltd, 2002, **10**(9), 1005-1012 [cit. 14.4.2019]. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00070-9. ISSN 0967-0661.
- [36] *European Train Control System ECTS*. Koridory.cz [online]. ©3.7.2017 [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.koridory.cz/european-train-control-system-etc/>
- [37] SHEN, Gang a Roger GOODALL. Active Yaw Relaxation For Improved Bogie Performance. *Vehicle System Dynamics* [online]. Taylor & Francis Group, 1997, **28**(4-5), 273-289 [cit. 14.4.2019]. DOI: 10.1080/00423119708969357. ISSN 0042-3114.
- [38] WEI, Xiukun, Ming ZHU a Limin JIA. A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers. *Vehicle System Dynamics* [online]. Taylor & Francis, 2016, **54**(7), 1-22 [cit. 13.4.2019]. DOI: 10.1080/00423114.2016.1177189. ISSN 0042-3114.
- [39] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO et al. Curving performance evaluation for active-bogie-steering bogie with multibody dynamics simulation and experiment on test stand. *Vehicle System Dynamics* [online]. Taylor & Francis, 2008, **46**(1), 191-199 [cit. 28.4.2019]. DOI: 10.1080/00423110801935806. ISSN 0042-3114.
- [40] BRAGHIN, F, S BRUNI, F RESTA a F BRAGHIN. Active yaw damper for the improvement of railway vehicle stability and curving performances: simulations and experimental results. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2006, **44**(11), 857-869 [cit. 28.4.2019]. DOI: 10.1080/00423110600733972. ISSN 0042-3114. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/19557909/>
- [41] T, Michálek a Zelenka J. Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements. *Applied and Computational Mechanics* [online]. University of West Bohemia, Pilsen, 2011, **5**(2), 187-196 [cit. 29.4.2019]. ISSN 1802-680X. Dostupné z: <https://doaj.org/article/1b034812cbcd4edfb807114b6eb3622a>
- [42] HOFBAUER Paul, DEUTSCH Christian. Elektrohydraulische Aktuatorik [online prezentace]. 2016 [cit. 27.4.2019]. Dostupné z: [http://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2016/MoN03\\_Hofbauer.pdf](http://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2016/MoN03_Hofbauer.pdf)
- [43] BIGLAND Paul. *DG25142. TALGO bogie. Innotrans 2008. Berlin. Germany* © 23.9.08. [online]. [cit. 3.4.2019]. Dostupné z <https://paulbigland.zenfolio.com/img/s/v-3/p1541943394-3.jpg>

## 7 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

### Zoznam použitých skratiek

<i>AoA</i>	uhol nábehu (Angle of attack)
<i>UIC</i>	Medzinárodná železničná únia (Union Internationale de Chemins de Fer)
<i>EMU</i>	súprava s distribuovaným výkonom a el. výzbrojou (Electric multiple unit)
<i>Push-pull</i>	súprava so sústredeným výkonom a el. výzbrojou
<i>DB</i>	Nemecké železnice
<i>SBB</i>	Švajčiarske spolkové železnice
<i>ČD</i>	České dráhy
<i>NTSEL</i>	Japonské centrum pre bezpečnosť dopravy
<i>SJKV</i>	software Simulace jízdy kolejového vozidla

### Zoznam použitých symbolov a veličín

Označenie	Jednotka	Názov
$\mu$	[-]	súčiniteľ priľnavosti
$s$	[-]	sklz
$e$	[m]	polovičný rozchod dvojkolesia
$r_0$	[m]	polomer kolesa
$\lambda$	[-]	kuželovitost' kolesa
$R$	[m]	polomer oblúku



## 8 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

<b>obr. 2-1</b>	Zjednodušený model podvozka .....	14
<b>obr. 2-2</b>	Uhol nábehu.....	15
<b>obr. 2-3</b>	Vrtivý pohyb dvojkolesia .....	17
<b>obr. 2-4</b>	Príklad jazdného obrysu.....	17
<b>obr. 3-1</b>	Rušeň ES64U4 Taurus (1216 ÖBB) na čele súpravy Railjet.....	20
<b>obr. 3-2</b>	Radenie BR 407 Velaro D (DB ICE 3).....	21
<b>obr. 3-3</b>	Jakobsov podvozok na vozidle STADLER EC 250 (RABe 501 SBB) .....	24
<b>obr. 3-4</b>	Podvozok súpravy CRH2 .....	25
<b>obr. 3-5</b>	Podvozok rušňa Vectron .....	25
<b>obr. 3-6</b>	Schématický náčrt lemniskátového mechanizmu .....	26
<b>obr. 3-7</b>	Lemniskátový mechanizmus na lokomotive ŠKODA 109E1 (ČD 380) .....	27
<b>obr. 3-8</b>	Tlmič vrtivých pohybov na jednotke Siemens Velaro D BR 407 .....	27
<b>obr. 3-9</b>	F-v charakteristika tlmiča vrtivých pohybov .....	28
<b>obr. 3-10</b>	Závislosť kritickej rýchlosti vozidla od tuhosti primárneho vypruženia .....	29
<b>obr. 3-11</b>	Závislosť kritickej rýchlosti vozidla od tuhosti pozdĺžneho primárneho vypruženia a ekvivalentnej kuželovitosti kolesa.....	30
<b>obr. 3-12</b>	Alstom Bispfen Bi-mode damper .....	31
<b>obr. 3-13</b>	Jednoplášťový MR tlmič .....	32
<b>obr. 3-14</b>	Diagram regulácie pomocou priečného posuvu dvojkolesia .....	32
<b>obr. 3-15</b>	Eurobalíza .....	33
<b>obr. 3-16</b>	Diagram regulácie pomocou aplikácie momentu okolo zvislej osy.....	33
<b>obr. 3-17</b>	Diagram regulácie relatívneho uhla nábehu medzi dvojkolesiami .....	34
<b>obr. 3-18</b>	Porovnanie metód z hľadiska maximálneho priečného silového pôsobenia	34
<b>obr. 3-19</b>	Simulačný výpočet priečného posuvu predného a zadného dvojkolesia podvozka.....	35
<b>obr. 3-20</b>	Schéma ABS podvozka so silovým pôsobením na podvozok .....	36
<b>obr. 3-21</b>	Priečne silové pôsobenie na koleso; Zeroing control .....	36
<b>obr. 3-22</b>	AASA .....	37
<b>obr. 3-23</b>	Silové pôsobenie pri vjazde do oblúku; pri použití pasívneho tlmiča .....	37

<b>obr. 3-24</b>	ADD .....	38
<b>obr. 3-25</b>	Navrhované radenie pasívnych tlmičov (biele) a aktívnych tlmičov (čierne) ŠKODA 109E [41] .....	38
<b>obr. 3-26</b>	Kvazistatické silové pôsobenie na koleso pri zmenách koeficientu šmykového trenia v oblúku o polomere $R=300\text{m}$ a pri sile aktuátora $F_{act}=15\text{ kN}$ .....	39
<b>obr. 4-1</b>	Podvozok Talgo na Innotrans 2008 [43] .....	40
<b>obr. 4-2</b>	Štatistika článkov .....	41

## 9 ZOZNAM TABULIEK

<b>tab. 2-1</b>	Spôsoby vykoľajenia .....	16
<b>tab. 3-1</b>	Rýchlovlaky .....	23
<b>tab. 3-2</b>	Príklad parametrov podvozka .....	29
<b>tab. 4-1</b>	Porovnanie vibroizolačných systémov v podvozku súpravy .....	41