



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**SEMI-AKTIVNĚ ŘÍZENÉ TLUMENÍ PODVOZKU
VYSOKORYCHLOSTNÍHO VLAKU**

SEMI-ACTIVE DAMPING CONTROL OF HIGH SPEED TRAIN BOGIE

PROJEKT DISERTAČNÍ PRÁCE

DISSERTATION PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Filip Jeniš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Mazúrek CSc.

BRNO 2019

OBSAH

OBSAH3

1	NÁZEV	6
2	KLÍČOVÁ SLOVA	7
3	ANOTACE	8
4	ÚVOD	9
5	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	11
5.1	Konstrukce železničního podvozku	11
5.1.1	Odpružení podvozku	11
5.1.2	Tlumící systémy	12
5.2	Problémy a požadavky plynoucí z vyšší rychlosti vlaku	14
5.2.1	Problémy a požadavky týkající se bezpečnosti	14
5.2.2	Problémy zvyšující náklady na údržbu a provoz	15
5.2.3	Faktory snižující komfort posádky	16
5.2.4	Řízení pantografu	17
5.3	Současný stav poznání v oblasti nežádoucího kmitání dvojkolí	18
5.3.1	An analysis of bogie hunting instability (Mazilu, 2009)	18
5.4	Současný stav poznání v oblasti zvyšování komfortu	19
5.4.1	Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension (Lau, 2005)	19
5.4.2	Semiactive control of a secondary train suspension (Codeca, 2007)	20
5.4.3	Lateral suspension control of railway vehicle using semi-active magnetorheological dampers. (Hudha, 2011)	22
5.5	Současný stav poznání v oblasti řízení dvojkolí	23
5.5.1	Active yaw relaxation for improved bogie performance (Shen, 1997)	23
5.5.2	Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles (Perez, 2002)	24
5.5.3	Mechatrical solutions for high-speed railway vehicles (Mei, 2002)	26
5.5.4	Improve hunting of a railway vehicle using semi-active primary suspension (Fotouhi, 2006)	27
5.5.5	A semi-active control suspension systém for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers (Wei, 2016)	28
5.5.6	Active steering bogie for railway vehicle using leverage (Park, 2007)	30
5.5.7	FLEXX Tronic Technology	30
5.6	Současný stav poznání v oblasti řízení celého podvozku	31

5.6.1	Active yaw damper for the improvement of railway vehicle stability and curving performances: simulations and experimental results (Braghin, 2006)	31
5.6.2	Curving performance evaluation for active-bogie-steering bogie with multibody dynamics simulation and experiment on test stand (Matsumoto, 2008)	33
5.6.3	Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetotrolological technology (Sun, 2013)	35
5.6.4	Railway bogie stability control from secondary yaw actuators (Goodall, 2016)	36
5.6.5	Electro hydraulic actuation (EHA) systems for primary flight control, landing gear and other type of actuation (Gaile, 2016)	38
6	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	40
6.1	Řízení pohybu skříně	40
6.2	Přístupy k řešení rozporu mezi stabilitou a ovladatelností	41
6.2.1	Řízené dvojkolí	41
6.2.2	Řízený podvozek	42
6.3	Nežádoucí oscilace dvojkolí a jeho kontakt s kolejí	42
6.4	Použité algoritmy	43
6.5	Nezmapovaná oblast poznání	43
7	PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE	45
7.1	Podstata	45
7.2	Cíle	45
7.3	Přínos	46
8	VĚDECKÉ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZY	47
9	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY	48
9.1	Návrh řídicích algoritmů	48
9.2	Studium limitů udržování odpružené hmoty v nenulové poloze	50
9.3	Tvorba dynamického modelu železničního vozidla	50
9.4	Ověření a optimalizace algoritmu a citlivostní analýza na různé vlivy	53
9.5	Ověření na reálném tlumiči v HIL simulaci	54
9.6	Ověření na komplexním modelu a na reálném tlumiči	55
10	ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ	56
11	ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ	57

12	SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI	58
13	PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY	59
14	CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU	60
15	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
16	ŽIVOTOPIS	65
17	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	66
18	SEZNAM TABULEK	68

1 NÁZEV

Semi-aktivně řízené tlumení podvozku vysokorychlostního vlaku

Semi-active damping control of high speed train bogie

2 KLÍČOVÁ SLOVA

semi-aktivní, železniční podvozek, MR tlumič, vysokorychlostní vlak, oscilace, vrtění

semi-active, bogie, MR damper, highspeed train, hunting, yawing

3 ANOTACE

Tato se práce se bude zabývat návrhem a ověřením algoritmu pro semi-aktivní řízení tlumiče vrtění pro systému podvozku vysokorychlostního vlaku. Takto řízený tlumič bude řešit problém s rozdílnými požadavky na tlumení při různých režimech jízdy, který je složité vyřešit pomocí pasivního tlumení. Především je to rozpor v požadavcích na stabilitu podvozku při rychlé jízdě a ovladatelnost podvozku pro průjezd obloukem.

This thesis deals with the design and verification of the algorithm for the semi-active control of the yaw damper of high-speed train damping system. This controlled damper will solve the problem with different damping requirements in different driving modes, which is difficult to solve with passive damping. Above all, there is a contradiction in the requirements for bogie stability when driving fast and the maneuverability of the bogie for passage through the curve.

4 ÚVOD

V současné době dochází v Evropě k rozvoji vysokorychlostní železniční dopravy. Sice neexistuje žádná celosvětová norma stanovující parametry vysokorychlostní trati, ale obecně se za vysokorychlostní považují tratě, na kterých vlaky dosahují rychlostí alespoň 200 km/h. Vysokorychlostní vlaky vrací železniční dopravě konkurenceschopnost. Oproti letecké dopravě sice dosahují menších rychlostí, ale tuto nevýhodu vyrovnávají polohou nádraží, které většinou leží ve středu měst, ve srovnání s letišti, které většinou leží na okraji. Oproti silniční dopravě dosahuje železniční jak vyšší rychlosti, tak i přepravní kapacity.

Se zvyšující se rychlostí vlaků se objevují nejrůznější problémy, které je třeba řešit. Za hlavní oblasti, na které jsou kladeny zvýšené požadavky, můžeme považovat bezpečnost, komfort a ekonomiku. Bezpečnost se týká především stability vlaku nebo brzdění. S vyšší rychlostí roste riziko nechtěné oscilace podvozku, která zvyšuje pravděpodobnost vykolejení. Zároveň také snižuje komfort jízdy a zvyšuje opotřebení jak součástí podvozku, tak železničního svršku, čímž se zvedají náklady na údržbu. Na komfort mají ale zásadní vliv přenos vibrací od kolejí na skříň a naklápění skříň v obloucích. Neméně důležitým parametrem je ekonomika, můžeme ji rozdělit na náklady ohledně údržby jak tratí, tak vlakových podvozků a na náklady trakci – s tím souvisí aerodynamika a hladký průběh jízdy.

Největším problémem je zřejmě rozpor v požadavcích na tlumicí systém podvozku při jízdě po rovné trati vysokou rychlostí a při nájezdu do oblouku malého poloměru. Zatímco v první případě je rozhodující stabilita dosahovaná vysokým tlumením, v druhém případě je třeba naopak tlumicí síly minimalizovat, aby se podvozek snadno natočil a tím minimalizoval příčnou sílu kola na kolejnici. Na tlumiče jsou tak kladeny protichůdné požadavky, které s pasivními tlumiči lze jen těžko splnit.



Obr. 1.1 Vysokorychlostní lokomotiva Vectron, vlaková loď firmy Siemens [1]

Řešením může být použití semi-aktivního nebo aktivního systému tlumení. Aktivní systém obsahuje místo pružin a tlumičů aktuátory, může tak podvozek libovolně natáčet. Tento systém je ale velmi složitý, drahý, energeticky náročný a náročný na provedení fail-safe systému. Alternativou je právě semi-aktivní tlumení, kdy je na základě vstupních údajů z různých senzorů možné měnit tlumící sílu.

Nasazení semiaktivního řízení do podvozků kolejových vozů slibuje možnost redukce kmitání podvozku kolejového vozidla při rychlé jízdě po rovné trati a zároveň umožňuje redukovat maximální příčné síly dvojkolí na kolejnici. To by mělo umožnit zvýšení maximální rychlosti kolejového vozidla s relativně malými zásahy do jeho konstrukce.

5 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

5.1 Konstrukce železničního podvozku

Na úvod přehledu současného stavu poznání bude nutné stručně popsat konstrukci podvozku železničního vozidla. Železniční podvozek se značně liší od automobilového, můžeme jej rozdělit na tři různé hmoty:

- dvojkolí (neodpružená hmota)
- samotný podvozek (primárně odpružená hmota)
- skříň vlaku (sekundárně odpružená hmoty).

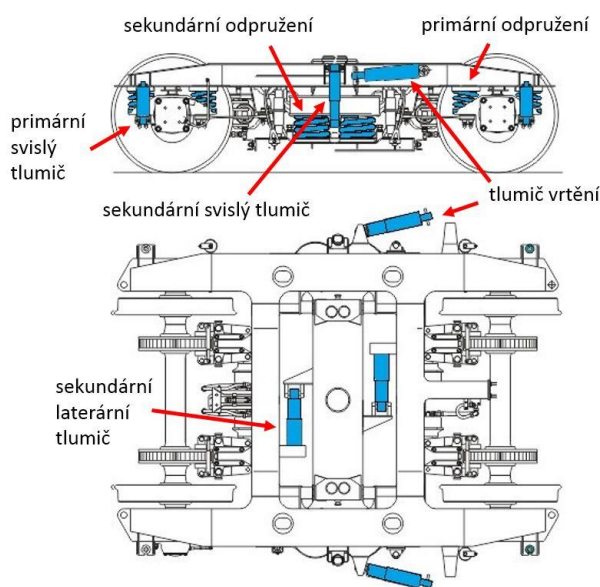
Mezi těmito hmotami se potom nachází dva typy odpružení a tlumení:

- primární – odpružení umístěné mezi dvojkolí a podvozek, chrání podvozek proti poškození vibracemi způsobenými tvrdým kontaktem kolejnice/kolej
- sekundární – odpružení mezi podvozkem a skříní, jejich přínosem je především vibroizolace skříně a s tím spojený komfort posádky.

Vlakový podvozek se pohybuje ve všech šesti stupních volnosti, ovšem odpružen a tlumen je pouze v některých. Uložení v některých směrech bývá na vozech tuhé, například pomocí silentbloků, přičemž je ale třeba brát v potaz, že i tato uložení mají určitou pružnost a tlumicí vlastnosti.

5.1.1 Odpružení podvozku

Odpružení je realizováno především ve svislém směru. Jako primární odpružení se nejčastěji používají šroubové pružiny, na starších vozech můžeme ještě vidět pružiny listové. Svislé sekundární odpružení bývá realizováno pomocí seřizovatelných vzduchových vaků, nebo pomocí flexi-coil pružin, což jsou šroubové pružiny, které zajišťují zároveň tuhost i v laterálním a podélném směru [2].

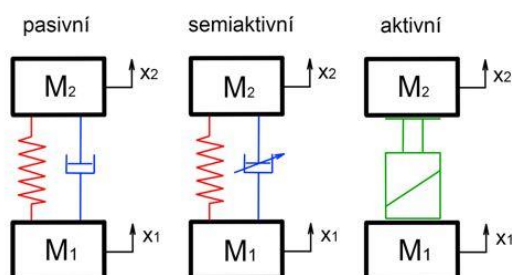


Obr. 2.1 Základní železniční odpružení a tlumiče [3]

5.1.2 Tlumicí systémy

Primární tlumiče se na běžných vlcích používají pouze svislé, nicméně na novějších se začínají objevovat například i tlumiče podélné. Sekundární tlumiče můžeme rozdělit na svislé, laterální a vrtění (Obr. 1.2.).

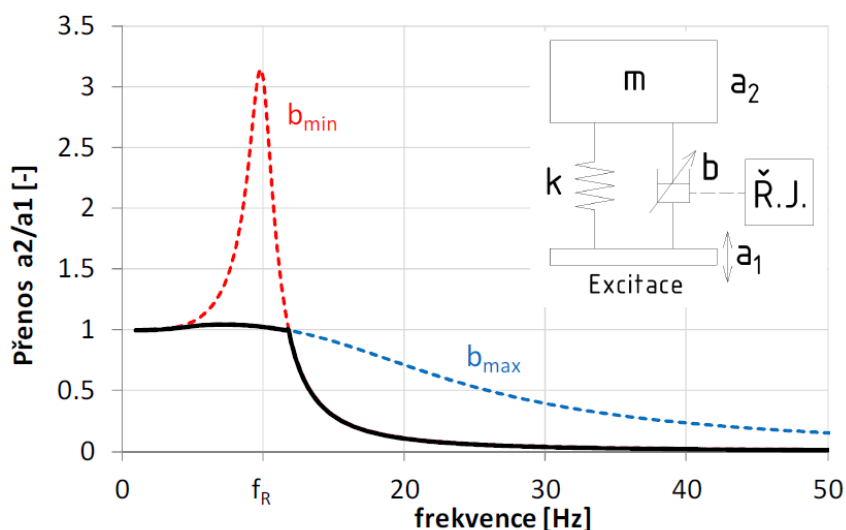
Dnes nejčastěji používané tlumiče jsou tlumiče hydraulické. Dříve se používaly tlumiče třecí a v poslední době se začínají dostávat ke slovu tlumicí systémy řízené, a to buď semi-aktivně, nebo aktivně.



Obr. 2.2 Schématické znázornění tlumících systémů

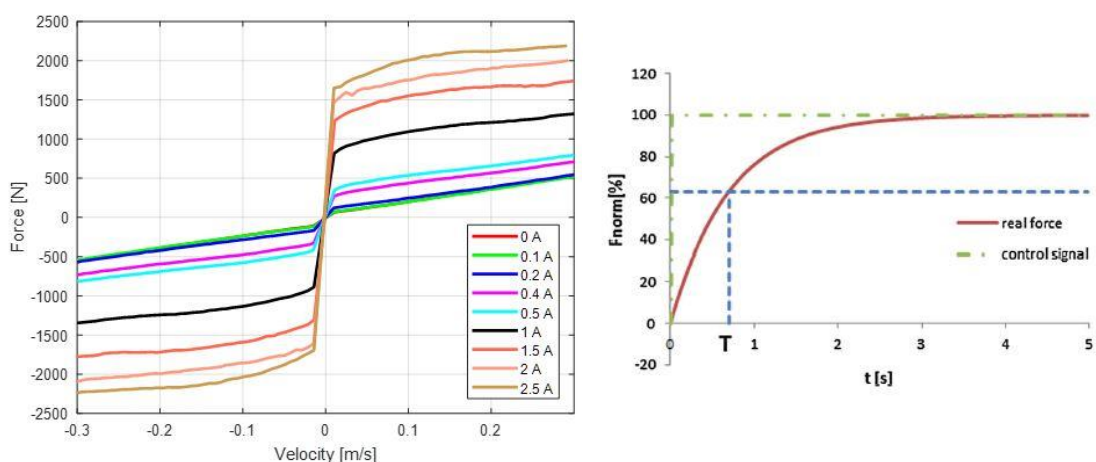
Semi-aktivně řízené tlumicí systémy

Název semi-aktivní (polo-aktivní) je poněkud zavádějící, tyto tlumicí systémy dokáží regulovat úroveň tlumicí síly za základě požadavků řídicí jednotky, a to i mnohokrát za sekundu. Na Obr. 2.3 vidíme, že pro nízký přenos vibrací jsou pro různé budící frekvence vhodné různé koeficienty tlumení. Naladění pasivních tlumičů je tedy vždy o určitém kompromisu. Semi-aktivní řízení tlumičů umožňuje využít výhody velkého tlumení pro snížení vibrací na rezonanční frekvenci a zároveň výhody nízkého tlumení pro vibroizolaci nad rezonanční frekvencí.



Obr. 2.3 Přenosová funkce pro různě tlumené systémy

Nejpoužívanější typy semi-aktivních tlumičů jsou CCD (Continuously Controlled Damping) [4] a MR (Magneto-rheological) tlumiče [5]. CCD tlumiče používají elektromagnetický řízený ventil, který dokáže změnit průřez a tak odpor kterým působí na píst hydraulický olej, čímž se změní tlumicí síla pístu. MR tlumiče fungují díky MR kapalině, což je suspenze feromagnetických částic o velikosti několika mikrometrů v nosné kapalině, použitá místo hydraulického oleje. Pokud je MR kapalina vystavena externímu magnetickému poli, dojde k zřetěžení feromagnetických částic ve směru magnetického pole a tím i k rapidnímu nárůstu její zdánlivé viskozity. V MR tlumiči tento nárůst zdánlivé viskozity MR kapaliny způsobí nárůst hydraulického odporu pístu a tím nárůst tlumících sil (Obr. 2.4). Ke tvorbě magnetického pole se používá cívka umístěná v pístu tlumiče a velikost pole je regulována proudem procházejícím cívkou.



Obr. 2.4 F-v křivky MR tlumiče (vlevo), časová odezva MR tlumiče (vpravo) [6]

Efektivita semi-aktivně řízeného tlumení velmi závisí na časové odezvě tlumiče [6] (Obr. 2.4), tedy době po které tlumič dosáhne požadované tlumicí síly.

Aktivní systémy

Aktivní systémy neobsahují klasicky pružinu a tlumič, ale pouze aktuátor, což je jednotka schopná vyvinout sílu potřebnou k požadované změně polohy řízené hmoty. Tyto systémy jsou ovšem o mnoho složitější, dražší, energeticky náročné a náročné na provedení fail-safe systému.

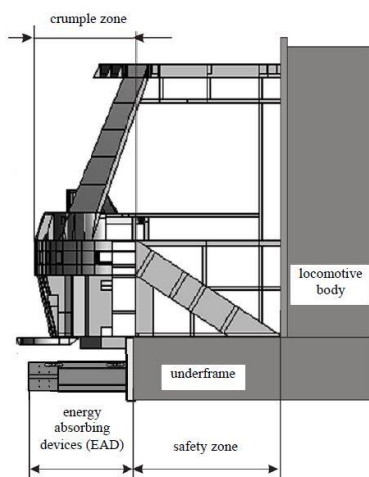
5.2 Problémy a požadavky plynoucí z vyšší rychlosti vlaku

Jak bylo řečeno v úvodu, se zvyšující se rychlostí vlaků stoupají požadavky jak na železniční podvozek, tak na ostatní částí vlaku. Objevující se problémy jsou navzájem provázané, například vibrace vlaku budou snižovat stabilitu a tím bezpečnost, zároveň budou snižovat komfort a posádky a zvyšovat opotřebení vozidla i kolejí, čímž porostou náklady na údržbu. Přesto je možné je rozdělit do následujících kategorií.

5.2.1 Problémy a požadavky týkající se bezpečnosti

Bezpochyby největší požadavky jsou kladeny na bezpečnost. Podobně jako u automobilů ji můžeme rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní bezpečnost řeší problém až v okamžiku, kdy nastane, aktivní se snaží problémům předcházet. V praxi je pasivní bezpečnost řešena především deformačními zónami lokomotiv (

Obr. 2.5) [7]. Aktivní bezpečnost znamená, že se vozidlo chová tak, jak požadujeme – dokáže autonomně reagovat na změnu podmínek a tím případným problémům předejít.

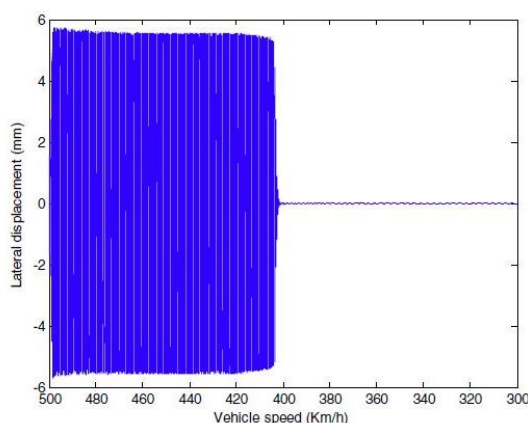


Obr. 2.5 Deformační zóna lokomotivy [7]

Oscilace dvojkolí

Bezpečnost ve vysoké rychlosti limituje především nežádoucí oscilace dvojkolí. Ta se objevuje při překročení kritické rychlosti [8] a je způsobena nutnou konicitou kol [9]. V malém měřítku je tento jev přirozený a nevyhnutelný. Při nízkých rychlostech dosahují laterální a úhlové úchyly malých hodnot a proto oscilace dvojkolí nezpůsobuje žádné problémy. Při překročení kritické rychlosti ale začne laterální výchylka rychle narůstat a amplituda její oscilace se ustálí na hodnotě odpovídající vůli dvojkolí mezi kolejnicemi. Přitom dochází k velkému zvýšení síly kola na kolejnici, s tím souvisí vyšší riziko vykolejení, větší poškození kolejnic a opotřebení součástí podvozku a snížení jízdního komfortu v důsledku vibrací. Při snížení rychlosti pod kritickou nežádoucí oscilace rychle

ustane (Obr. 2.6). Kritická rychlost vozidla musí ležet 10 % nad maximální povolenou rychlostí.



Obr. 2.6 Závislost laterální výchylky prvního dvojkolí na rychlosti vlaku [8]

Požadavky na brzdový systém

S bezpečností také souvisí nároky na brzdový systém, které s vyššími rychlostmi logicky stoupají. Především se zvyšuje opotřebení brzdových disků a jejich teplotní zatížení. Brzdové disky tedy musí být zhotoveny z materiálů odolných vůči vysoké teplotě [10]. Pro zajištění rovnoměrného brzdění z vysoké rychlosti je vhodné brzdy řídit aktivním zpětnovazebným systémem [11].

5.2.2 Problémy zvyšující náklady na údržbu a provoz

S vyšší rychlostí přirozeně rostou náklady, a to jak na samotný provoz, tak na údržbu vozů a tratí.

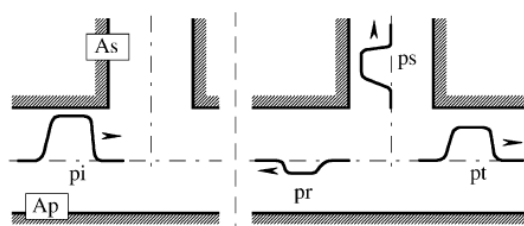
Opotřebení kolejového svršku

Problém se stabilitou lze řešit zvýšením torzní tuhosti mezi podvozkem a skříní, čímž se dostáváme k dalšímu problému – zvýšená tuhost znesnadňuje natáčení podvozku do oblouku. Pokud není mezi rovnou tratí a obloukem malého poloměru rovnoměrný přechod, dochází k velkým silám mezi kolem a kolejí, které kolejnice velmi opotřebovávají [2]. Typickým příkladem je S-oblouk s výhybkou. Opotřebení tratí zásadně ovlivňuje náklady na údržbu. V západní Evropě jsou navíc vlakům způsobujícím vyšší opotřebení účtovány vyšší poplatky za využití tratí, ve snaze opotřebení tratí snížit [12].

Ztráty trakční síly

Dalším ekonomickým faktorem vystupujícím u vysokorychlostních vlaků jsou náklady na trakční sílu. Největší ztráty trakční síly jsou spojeny s aerodynamikou. Problémy s aerodynamikou vlaků jsou úzce spjaty s vzduchovými proudy, které se objevují kolem vozu. Pro dosažení vyšších rychlostí bylo věnováno více úsilí zvýšení výkonu elektromotorů než pochopení proudění kolem vlaku. To vede k větším ztrátám energie a zhoršení výkonu,

neboť při vyšší rychlosti jsou v důsledku turbulence vzduchové proudy narušeny, což vede ke zvýšení aerodynamického odporu, hluku a vibracím [13]. Aerodynamika také působí problém při průjezdu tunely. Maximální rychlost vlaku v tunelu je omezena aerodynamickými účinky, přičemž velikost této rychlosti je dána průřezem tunelu. Aerodynamický odpor tvoří i přes 90 % z celkového odporu při průjezdu tunelem [14]. Překonávání toho odporu zvyšuje potřebnou trakční sílu, a tedy i náklady na ni. Pro odlehčení tlaku a tím snížení odporu vzduchu se používá potrubí a provoz tunelu v částečném vakuu.



Obr. 2.7 Potrubí pro snížení tlakové vlny v tunelu [14]

5.2.3 Faktory snižující komfort posádky

Jedním z často řešených problémů je také zajištění komfortu posádky. Komfort nejvíce ovlivněn vibracemi skříně a odstředivou silou při průjezdu oblouky. Obě tyto veličiny se s vyšší rychlostí přirozeně zvyšují.

Vibrace skříně

Při vyšší rychlosti dochází k vyššímu přenosu vibrací z podvozku na skříně a to jak ve svislém tak v příčném směru. Tento fakt klade vysoké nároky jak na odpružení podvozku, tak na jeho tlumící systém – především na sekundární svislé a laterální tlumiče. V literatuře se problém obvykle řeší náhradou pasivních tlumičů za tlumiče semi-aktivní. K řízení semiaktivních tlumičů je nejčastěji použit algoritmus sky-hook. Tento algoritmus přepíná mezi dvěma stavy – maximální tlumení a minimální tlumení (ON/OFF). Pomocí tohoto algoritmu je udržována stabilní poloha určené hmoty jako by hmota byla připojena imaginárním ideálním tlumičem k nebi (skyhook). Pokud se hmota blíží do požadované polohy, je tlumič deaktivovaný, a pokud se hmota z požadované polohy vzdaluje, tlumič se aktivuje. Matematicky vyjádřeno:

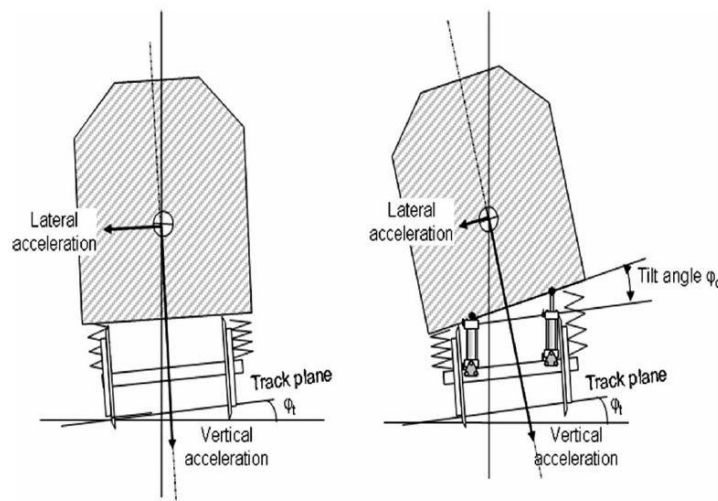
$$F = \begin{cases} b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), & \dot{x}_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \geq 0 \\ 0, & \dot{x}_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) < 0 \end{cases}$$

kde:

- F [N] tlumící síla
- b [-] tlumící koeficient tlumiče
- \dot{x}_2 [ms^{-1}] rychlost tlumené hmoty
- \dot{x}_1 [ms^{-1}] rychlost netlumené hmoty

Odstředivá síla v obloucích

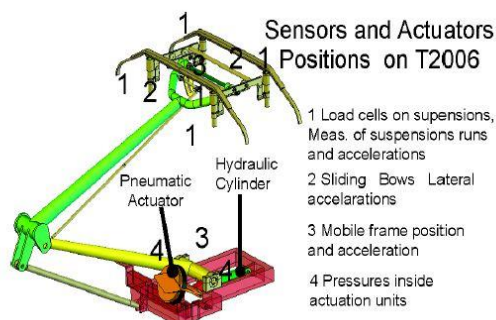
S komfortem souvisí také naklánění skříně vagonu. Při průjezdu oblouky působí na vagonu odstředivá síla, která působí laterální zrychlení. Nakloněním vagonů je možné část laterálního zrychlení promítnout do zrychlení svislého (Obr. 2.8), čímž zvýšíme komfort posádky [15]. Toto naklánění může být realizováno buď pasivně pomocí nějakého mechanismu, nebo aktivně pomocí svislých aktuátorů mezi podvozkem a skříní (Obr. 2.8).



Obr. 2.8 Schéma naklánění vagonu [15]

5.2.4 Řízení pantografu

Posledním zmíněným tématem bude řízení pantografu. To je kloubový závěs, který zajišťuje odběr proudu z nadzemního vedení. Dráty vedení při jízdě kmitají ve svislém směru, což musí být pro zajištění vyhovující kvality odběru proudu kompenzováno pohybem pantografu. U vysokorychlostních vlaků je tento problém obzvlášť důležitý, protože vyšší rychlost znamená vyšší frekvenci kmitání [16]. Řešením pro zkvalitnění odběru je optimalizace dynamické odezvy systému pantografu pomocí aktivního systému řízení (Obr. 2.9).



Obr. 2.9 Poloha snímačů a pohonů pro aktivní řízení pantografu [16]

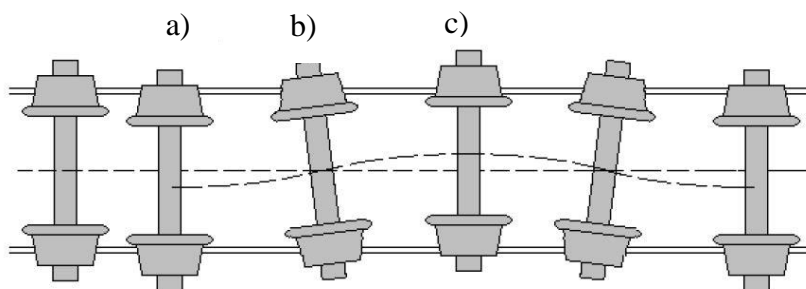
5.3 Současný stav poznání v oblasti nežádoucího kmitání dvojkolí

5.3.1 An analysis of bogie hunting instability (Mazilu, 2009)

Cíl: Analyzovat nežádoucí kmitání vlakového podvozku

Testovaná hypotéza: Kontakt s okolkem má vliv na stabilitu dvojkolí.

Získané poznatky: Hlavním faktorem, který ovlivňuje bezpečnost rychlovlaku je jeho stabilita. Hlavní vliv, který ovlivňuje stabilitu, je nežádoucí oscilace dvojkolí objevující se při překročení kritické rychlosti. V ideálním případě se obě kola odvalují na stejném poloměru. V okamžiku sebemenšího vychýlení dvojkolí v laterální směru se poloměry otáčení změní a jedno kolo se začne pohybovat rychleji dopředu (Obr. 2.10 a). Protože jsou ale kola pevně spojena, způsobí jejich rozdílná dopředná rychlost stáčení celého dvojkolí kolem svislé osy. Natočené dvojkolí se začne pohybovat v laterálním směru zpátky k ose stopy, přičemž se poloměry otáčení vyrovnají. Následně nastává situace, kdy je dvojkolí zpátky v původní pozici, ale je stále natočeno kolem svislé osy (b). Pokračuje tedy v laterální pohybu na stranu druhou, přičemž začne opět růst rozdíl v poloměrech otáčení. Tento rozdíl začne natočené dvojkolí vracet do původního směru. Natočení dvojkolí se vyrovná v okamžiku maximální laterální výchylky (c). Protože máme ale opět rozdílný poloměr otáčení kol, dvojkolí se začne stáčet na druhou stranu a vracet k ose stopy, poloměry se vyrovnají a tak dále... Trajektorie středu dvojkolí je přitom sinusová křivka.



Obr. 2.10 Oscilace dvojkolí [9]

Fenomén tohoto kinematického pohybu matematicky popsal již v roce 1883 Klingel [17]:

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{re}{\gamma_e}}$$

kde:

L [m] délka vlny

r [m] poloměr valení

$2e$ [m] vzdálenost mezi kontaktními body kolo/kolejnice

γ_e [-] efektivní konicita

Význam pro práci:

Přínosem práce je osvětlení vzniku nežádoucí oscilace dvojkolí.

5.4 Současný stav poznání v oblasti zvyšování komfortu

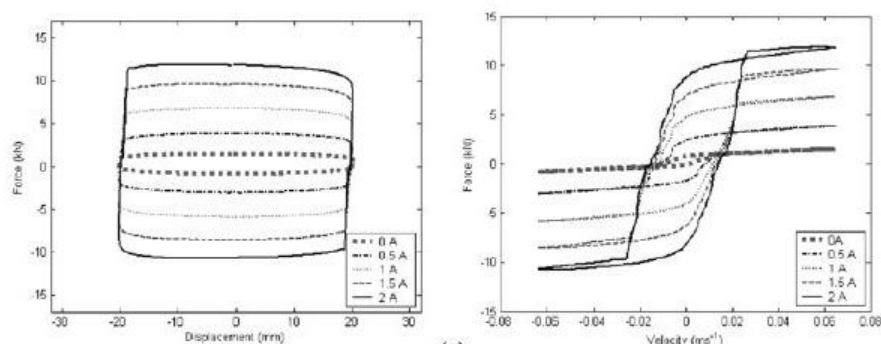
Komfort cestujících, na který jsou se zvyšující se rychlostí kladeny také vyšší požadavky, se autoři snaží zvýšit semi-aktivně řízeným tlumením a to buď pomocí svislých, nebo laterálních sekundárních tlumičů.

5.4.1 Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension (Lau, 2005)

Cíl: Navrhnout MR tlumič pro semi-aktivní řízení vlakového podvozku tak aby zvýšil jízdní komfort oproti pasivnímu tlumení. Ověřit vliv různého nastavení tohoto tlumiče na vibrace skříně.

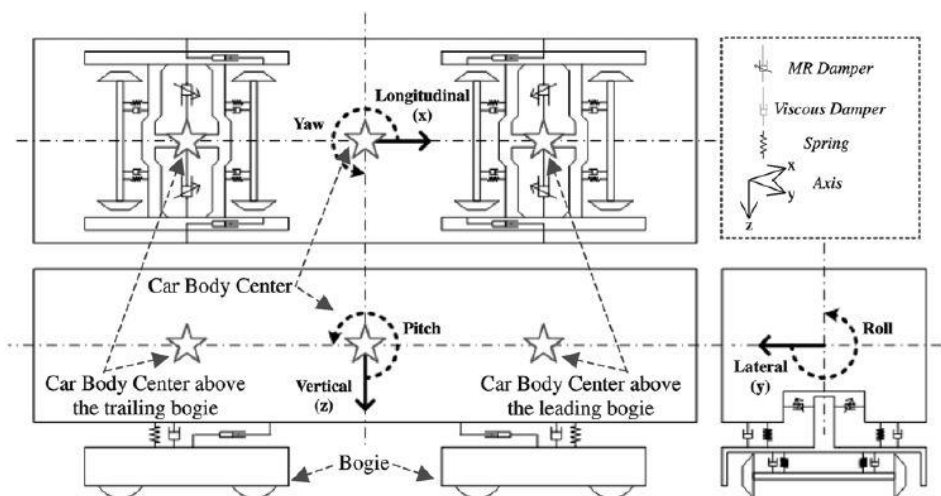
Testovaná hypotéza: Semi-aktivní řízení laterálního sekundárního tlumiče sníží vibrace skříně.

Získané poznatky: Lau [18] studoval vliv laterálního sekundárního tlumiče na komfort jízdy, použit je hydraulický pasivní tlumič a MR tlumič o maximální tlumicí síle 12 kN a dynamickém rozsahu 6. Testovány jsou 4 situace: a) pasivní, b) pasivní-on-L (0,5 A), c) pasivní-on-h (1 A), d) semi-aktivní. Semi-aktivní algoritmus je velmi jednoduchý, přepíná mezi L a H módem podle laterální rychlosti skříně. Pokud přesáhne stanovenou kritickou rychlost, tlumič se přepne do H režimu. S rozsahem proudu 0,5 - 1 A nebyl využit plný dynamický rozsah tlumiče [18], viz Obr. 2.11.

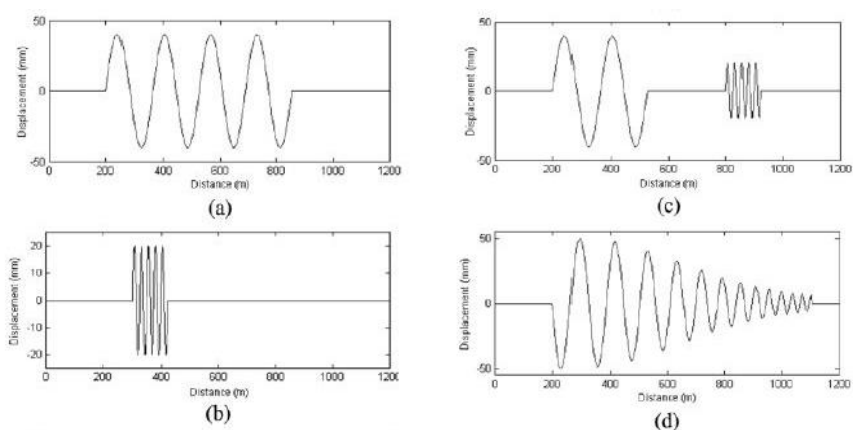


Obr. 2.11 F-z a F-v charakteristiky Lauova MR tlumiče [18]

Simulace byly prováděny na komplexním dynamickém modelu vagonu se dvěma bogie (Obr. 2.12). Model by buzen čtyřmi způsoby (Obr. 2.13). Laterální vibrace skříně se při semi-aktivním řízení snížily až o 39 % oproti pasivnímu tlumení.



Obr. 2.12 Schématický diagram vagonu vybaveného MR tlumiči [18]



Obr. 2.13 Svislé kinematické buzení modelu [18]

Význam pro práci: Studie ukazuje, že značného snížení vibrací skříně lze dosáhnout i s velmi triviálním semi-aktivním algoritmem. Je tu rozebrán dynamický model vozidla.

5.4.2 Semiactive control of a secondary train suspension (Codeca, 2007)

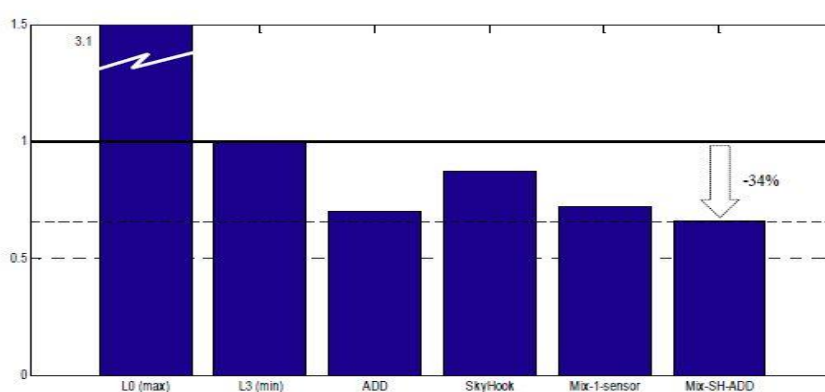
Cíl: Experimentálně porovnat vliv čtyřech různých semi-aktivních strategií řízení sekundárního laterálního tlumiče na vibrace skříně.

Testovaná hypotéza: Vhodně zvolená semi-aktivní strategie řízení laterálního sekundárního tlumiče může vibrace skříně snížit.

Získané poznatky: Codeca [19] na realistickém laboratorním standu (Obr. 2.14) experimentálně testoval vliv semi-aktivně řízeného laterálního sekundárního tlumiče na velikost vibrační skříně. Použity byly elektro-hydraulické tlumiče ISOCOMP vyvinuté speciálně pro tuto aplikaci o dynamickém rozsahu 8 a časovou odezvou 30 – 100 ms. Při pohybu o frekvenci 2 Hz je 100 ms 1/20 periody což stačí pro semi-aktivní řízení. Byly použity 4 strategie semi-aktivního řízení: Skyhook, Acceleration Drive Damping, kombinace SH-ADD a Mix-1-control. Jako řídicí veličiny algoritmu jsou použity laterální zrychlení skříně a bogie. Stand byl buzen signálem reprodukcujícím reálné měření na trati ve vysoké rychlosti. Nejlepších výsledků dosáhla strategie SH-ADD a to snížení vibrací o 34 % oproti pasivnímu tlumiči (Obr. 2.15).



Obr. 2.14 Laboratorní experimentální stand [19]



Obr. 2.15 Porovnání vlivu jednotlivých semi-aktivních strategií [19]

Význam pro práci: Studie popisuje různé semi-aktivní algoritmy, přičemž ukazuje, že nejlepších výsledků je možné dosáhnout jejich vhodnou kombinací.

5.4.3 Lateral suspension control of railway vehicle using semi-active magnetorheological dampers. (Hudha, 2011)

Cíl: Porovnat dva typy algoritmu skyhook, respektive jejich vlivu na snížení vibrací skříně.

Testovaná hypotéza: Lepších výsledků dosáhne algoritmus založený na sledování pohybu skříně.

Získané poznatky: Hudha [20] představil dva typy algoritmu skyhook: body-based a bogie-based skyhook. První znamená imaginární spojení skříně s nebem, druhá znamená imaginární spojení bogie s nebem.

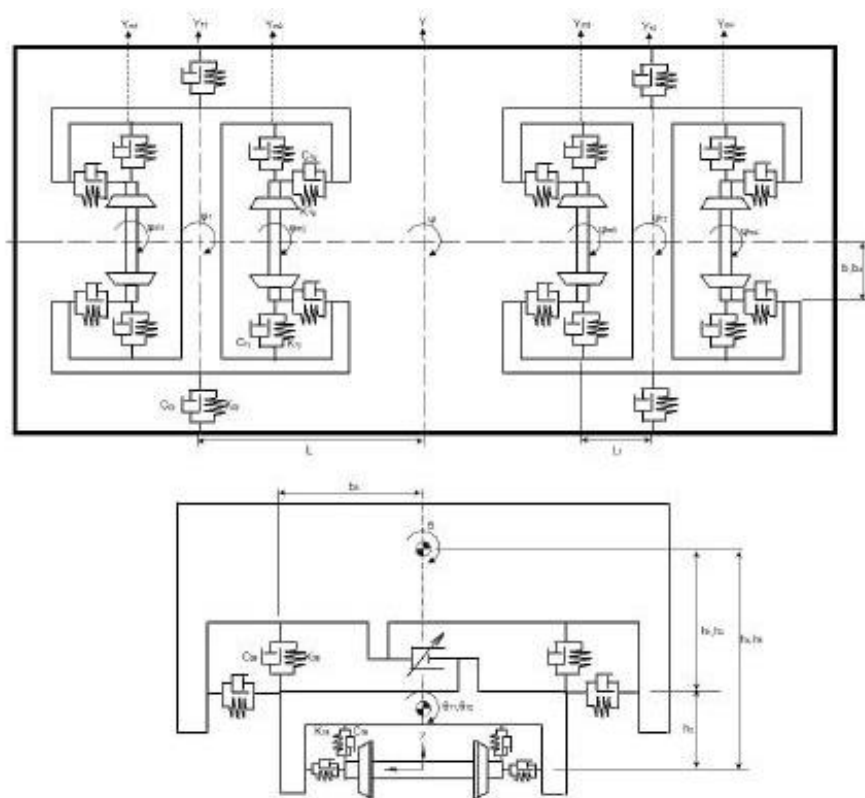
$$C_{body} = \begin{cases} C_{body,max} & \text{if } V_{body} \cdot V_{rel} \geq 0 \\ C_{body,min} & \text{if } V_{body} \cdot V_{rel} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{bogie} = \begin{cases} C_{bogie,max} & \text{if } V_{bogie} \cdot V_{rel} \geq 0 \\ C_{bogie,min} & \text{if } V_{bogie} \cdot V_{rel} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

kde:

C_{body} [Nsm ⁻¹]	koeficient tlumení pro body-based skyhook
C_{bogie} [Nsm ⁻¹]	koeficient tlumení pro bogie-based skyhook
V_{body} [ms ⁻¹]	laterální rychlost skříně
V_{bogie} [ms ⁻¹]	laterální rychlost bogie

Semi-aktivním algoritmem byl řízen laterální sekundární MR tlumič, který je v modelu realizován dle Bouc-Wen modelu [5]. Simulace probíhaly na modelu vlaku o 17 stupních volnosti (Obr. 2.16). Systém byl buzen pomocí sinové vlny o amplitudě 0,07 m a frekvencích 1, 3 a 5 rad/s. Vyhodnocovali se tři kritéria: laterální výchylka, klopení a vrtění v těžišti skříně. Navzdory očekávání dosáhl lepších výsledků bogie-based skyhook, zlepšil všechny tři kritéria. Autor plánuje algoritmus ověřit na experimentálním zmenšeném modelu o 17 stupních volnosti.



Obr. 2.16 Dynamický model vlaku o 17 stupních volnosti [20]

Význam pro práci: Článek popisuje dva možné způsoby aplikace algoritmu skyhook, přičemž ukazuje, že pro utlumení vibrací je vhodné tlumit především pohyb bogie.

5.5 Současný stav poznání v oblasti řízení dvojkolí

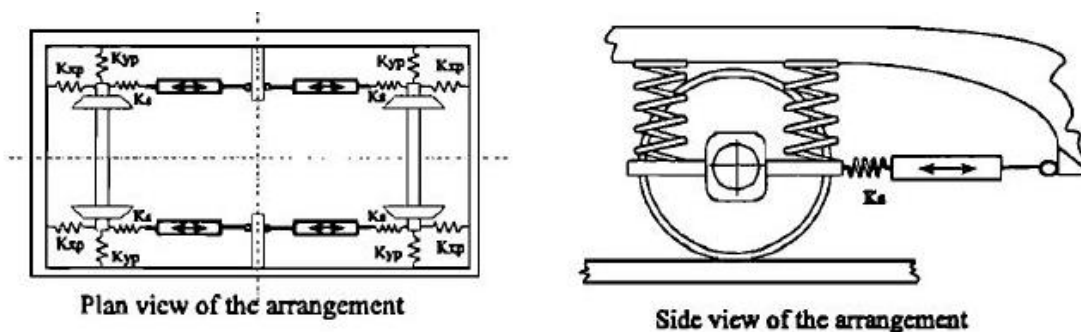
Pro zachování bezpečnosti musí kritická rychlost železničního vozidla ležet nad jeho maximální provozní rychlostí. Nechtěná oscilace dvojkolí tedy omezuje maximální rychlost celé soupravy. Odstranění problému se stabilitou a tím zvýšení maximální rychlosti lze docílit pomocí řízeného natačení dvojkolí v podvozku. K řízení dvojkolí mohou být použity buď podélné primární semi-aktivní tlumiče, nebo aktivní aktuátory. Toto řízení zároveň usnadní průjezd obloukem – klesnou laterální síly kola na kolejnici, čímž se sníží opotřebení a náklady na údržbu tratí.

5.5.1 Active yaw relaxation for improved bogie performance (Shen, 1997)

Cíl: Prokázat možnost snížení laterální síly kola na kolej pomocí aktivního řízení dvojkolí.

Testovaná hypotéza: Aktivní řízení dvojkolí primárními podélnými aktuátory pomocí uzavřené řídicí smyčky sníží laterální síly kola na kolej.

Získané poznatky: Shen [21] zkoumal možnost zvýšení stability vlaku a snížení opotřebení pomocí aktuátorů podélně umístěných mezi dvojkolí a bogie (Obr. 2.17). V článku popisuje dvě strategie řízení: 1) pomocí otevřené smyčky kdy je vygenerován úhel potřebný ke srovnání dvojkolí a aktuátory dvojkolí do tohoto úhlu natočí, 2) pomocí uzavřené smyčky – dvojkolí je natáčeno tak, aby byl jeho stáčivý moment, kterým působí na bogie redukován na nulu, čímž by mělo být dosaženo ideálního průjezdu obloukem. Dále je uvažováno s druhou metodou. Stáčivý moment je měřen pomocí výchylky soukolí vůči rámu podvozku, při známé tuhosti uložení. Pomocí této strategie se podařilo snížit laterální sílu do kolejí minimálně o 50 %, v porovnání s pasivním tlumením.



Obr. 2.17 Umístění podélného aktuátoru [21]

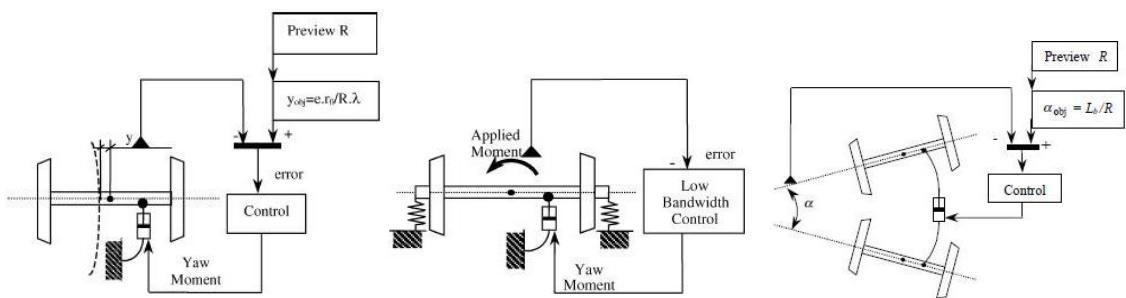
Význam pro práci: V článku jsou popsány dvě různé řídicí smyčky a způsob redukce laterálních sil na kolej pomocí minimalizace kroutícího momentu mezi dvojkolím a podvozkem.

5.5.2 Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles (Perez, 2002)

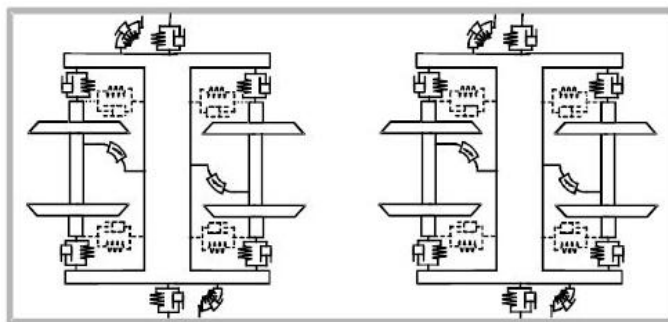
Cíl: Ukázat výhody aktivně řízeného dvojkolí oproti pasivně řízenému, přičemž porovnat tři různé aktivní strategie.

Testovaná hypotéza: Aktivní řízení dvojkolí sníží jednak jeho maximální laterální výchylku, jednak maximální úhel natočení, dále sníží maximální laterální sílu kola na kolejnici a s tím i opotřebení.

Získané poznatky: Peréz [22] představil 3 strategie aktivního řízení dvojkolí, kterými sledoval snížení vibrací, laterálních sil kola na kolejnici a opotřebení při průjezdu obloukem. Strategie se liší tím, které veličiny snímají a řídí se jimi. Při první strategii se snímá laterální výchylka dvojkolí, při druhé kroutící moment kolem svíslé osy a při třetí úhel mezi dvojkolím (Obr. 2.18). Byl simulován průjezd obloukem o poloměru 1357 m rychlostí 230 km/h. Simulační model obsahoval skřín, dva podvozky a čtyři dvojkolí (Obr. 2.19)

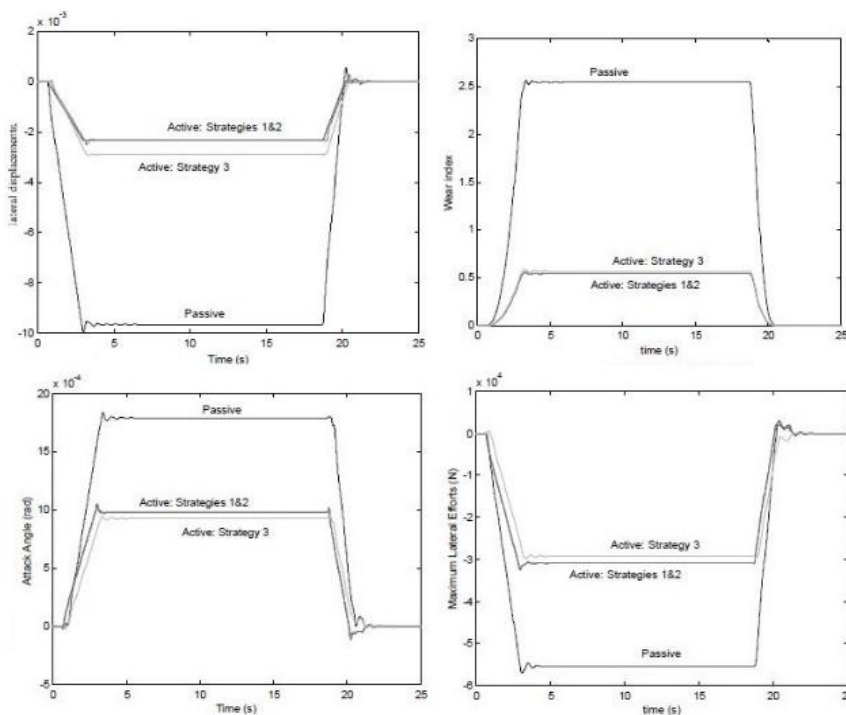


Obr. 2.18 Diagramy kontrolních strategií pro řízení bogie [22]



Obr. 2.19 Schéma vagonu se dvěma bogie [22]

Výsledky všech tří strategií vycházejí podobně, znamenají snížení jak laterální výchylky dvojkojí, tak síly na kolej a opotřebení oproti pasivnímu řešení (Obr. 2.20).



Obr. 2.20 Srovnání použitých strategií řízení [22]

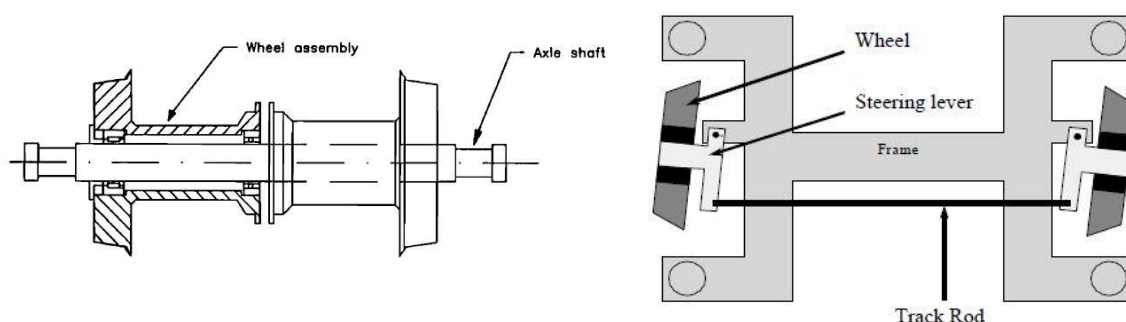
Význam pro práci: Význam této studie spočívá v popisu různých strategií pro aktivní řízení vlakového dvojkolí. Strategie se liší v tom, jakou snímají veličinu.

5.5.3 Mechatronical solutions for high-speed railway vehicles (Mei, 2002)

Cíl: Porovnání různých aktivních strategií pro řízení dvojkolí

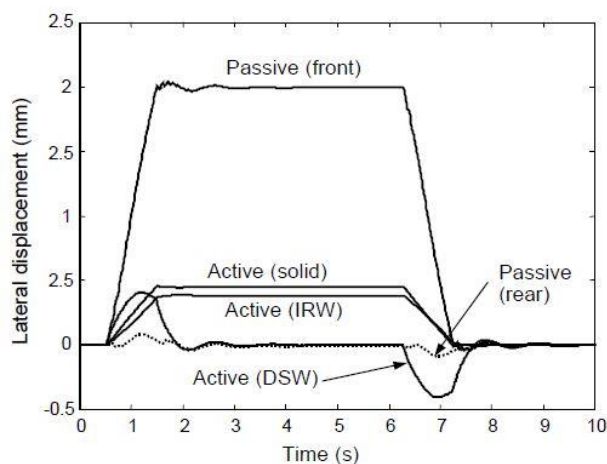
Testovaná hypotéza: Nezávisle otočná kola dosáhnou lepších výsledků ve snížení laterální výchylky dvojkolí než kola pevně spojená v dvojkolí

Získané poznatky: Mei [23] porovnával tři následující strategie: 1) aktivní řízení klasického dvojkolí, 2) aktivní řízení dvojkolí s nezávisle otočnými koly – IRW (Obr. 2.21), 3) aktivní řízení dvojkolí s nezávisle otočnými koly, kdy má každé kolo vlastní osu (Obr. 2.21). V článku bohužel nejsou popsány jednotlivé řídicí strategie.



Obr. 2.21 IRW (vlevo) [24] a DSW (vpravo) dvojkolí [23]

Ukazuje se, že všechny tři strategie zásadně snižují laterální výchylku, přičemž u DSW strategie výchylka klesne téměř na nulu (Obr. 2.22).



Obr. 2.22 Výsledky pro testované strategie [23]

Význam pro práci: Nejlepších výsledků je možné dosáhnout s nezávisle otočnými koly, kdy má každé svou vlastní osu kol.

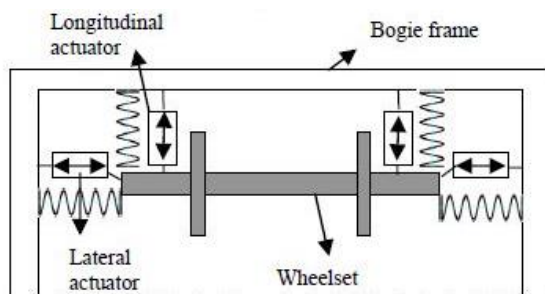
5.5.4 Improve hunting of a railway vehicle using semi-active primary suspension (Fotouhi, 2006)

Cíl: Pomocí adaptivně řízeného aktuátoru minimalizovat nežádoucí oscilaci dvojkolí

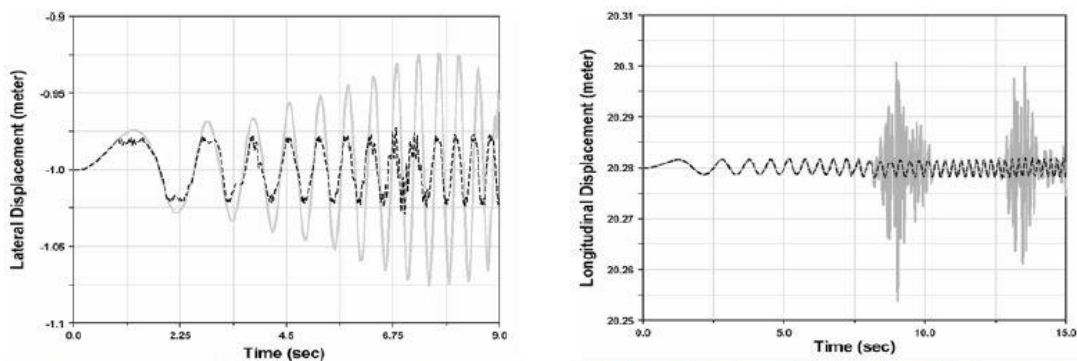
Testovaná hypotéza: Při použití adaptivně řízených aktuátorů mezi dvojkolím a podvozkem je možné snížit jak laterální tak podélnou výchylku dvojkolí, což povede ke zvýšení stability a maximální rychlosti vozidla.

Získané poznatky: Fotouhi [25] tvrdí, že hunting je samobuzená laterální oscilace způsobená dopřednou rychlostí a silami od kolo/rail kontaktu způsobené konocitou wheel/rail profilu a friction-creep charakteristikou kolo/kolejnice kontaktní geometrie. Tato oscilace vede ke snížení komfortu a opotřebením kontaktu kolo/kolejnice. Mechanický systém, na který působí nekonzervativní síly, může být dynamicky nestabilní – například třepetání křídel letadla. U vlaku je nekonzervativní síly v kolo/kolejnice kontaktu.

Autor použil jak podélné, tak laterální primární aktuátory (Obr. 2.23), které slouží jako tlumič. Jsou řízeny jednoduchým adaptivním algoritmem, který zvýší úroveň tlumení, pokud výchylka vibrací přesáhne stanovenou mez. Model železničního vozidla je realizován v pomoci kombinace prostředí Adams a Matlab/Simulink ale není v článku blíže popsán. Model je buzen sinusovým sweep od 0 do 50 Hz s amplitudou síly 5000 N. Vibrace v obou směrech se podařilo zásadně snížit (Obr. 2.24). Díky této strategii může být v neaktivovaném stavu tuhost odpružení nízká, což vylepší jízdní vlastnosti a sníží opotřebením.

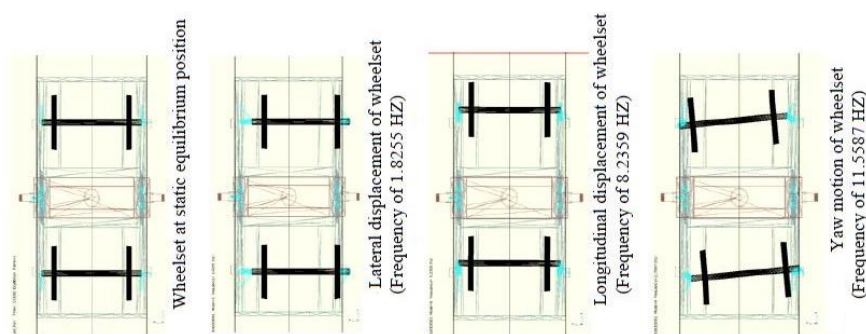


Obr. 2.23 Aktivně řízené dvojkolí [25]



Obr. 2.24 Srovnání laterálních a podélných vibrací pro pasivní a adaptivní mód [25]

Autor také popsal jednotlivé módy, ve kterých může dvojkolí kmitat a vyčíslil příslušné rezonanční frekvence (Obr. 2.25).



Obr. 2.25 Rezonanční módy dvojkolí [25]

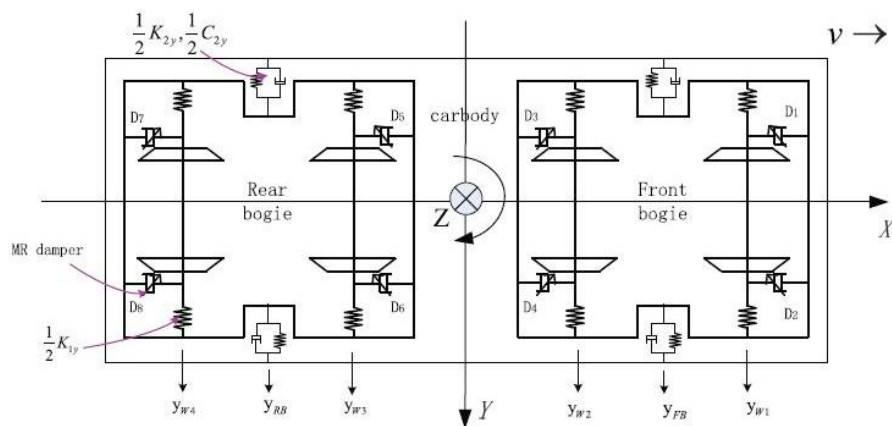
Význam pro práci: Práce ukazuje, že pohyb dvojkolí lze efektivně tlumit i za pomoci jednoduchého adaptivního algoritmu. Jsou tu popsány módy a rezonanční frekvence pohybu dvojkolí

5.5.5 A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers (Wei, 2016)

Cíl: Pomocí MR tlumiče snížit vibrace dvojkolí tak, aby se zvýšila stabilita a maximální rychlost vozidla.

Testovaná hypotéza: Při použití semi-aktivně řízeného primárního podélného tlumiče dvojkolí je možné snížit laterální výchylku dvojkolí a laterální sílu kola na kolej, což povede ke zvýšení stability a maximální rychlosti vozidla.

Získané poznatky: Wei [26], zkoumal možnost snížení vibrací dvojkolí pomocí semi-aktivně řízených podélných primárních tlumičů. K simulacím použil dynamický model železničního vozidla se dvěma podvozky o 17 stupních volnosti vytvořený programu SIMPACK.



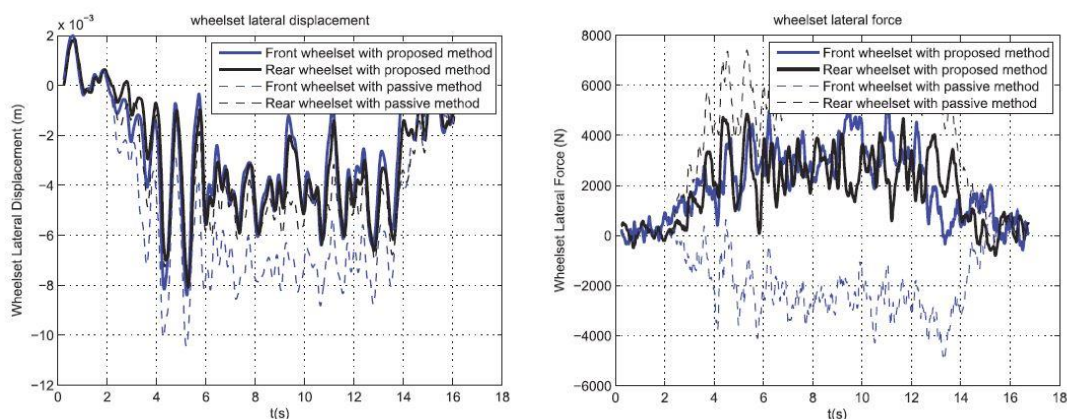
Obr. 2.26 Dynamický model podvozku vlaku 17DOF [26]

K řízení tlumičů byly použity dvě strategie: 1) algoritmus skyhook, přičemž řídicími veličinami je úhel mezi soukolím a bogie a rozdíl úhlové rychlosti mezi dvoukolím a bogie, 2) výpočet tlumicí síly pomocí Dahlova modelu MR tlumiče [27]. Jako buzení je použit průjezd obloukem o parametrech uvedených v Tab. 1.

Line style	Length (m)	Radius (m)	Superelevation (m)
Straight line 1	80	0.00	0.00
Transition curve 1	120	0-600.00	0-0.12
Circular curve	300	600.00	0.12
Transition curve 2	120	600.00-0.0	0.12-0
Straight line 2	80	0.0	0.00

Tab. 1 Parametry projížděného oblouku

V článku je zahrnuto sledování vlivu tlumících strategií na opotřebení kontaktu kolo/kolejnice. Parametr opotřebení je počítán za skluzových sil. Simulace ukázaly, že efektivnější je strategie 1 (Obr. 2.27).

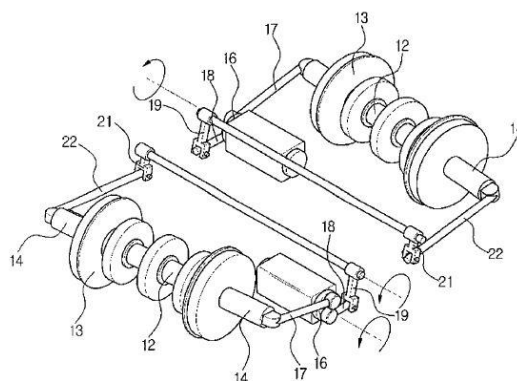


Obr. 2.27 Výsledky semi-aktivního řízení dvojkolí pomocí skyhook [26]

Význam pro práci: Práce ukazuje, že dvojkolí lze efektivně řídit i za pomoci MR tlumičů. Je tu popsán dynamický model o 17 stupních volnosti.

5.5.6 Active steering bogie for railway vehicle using leverage (Park, 2007)

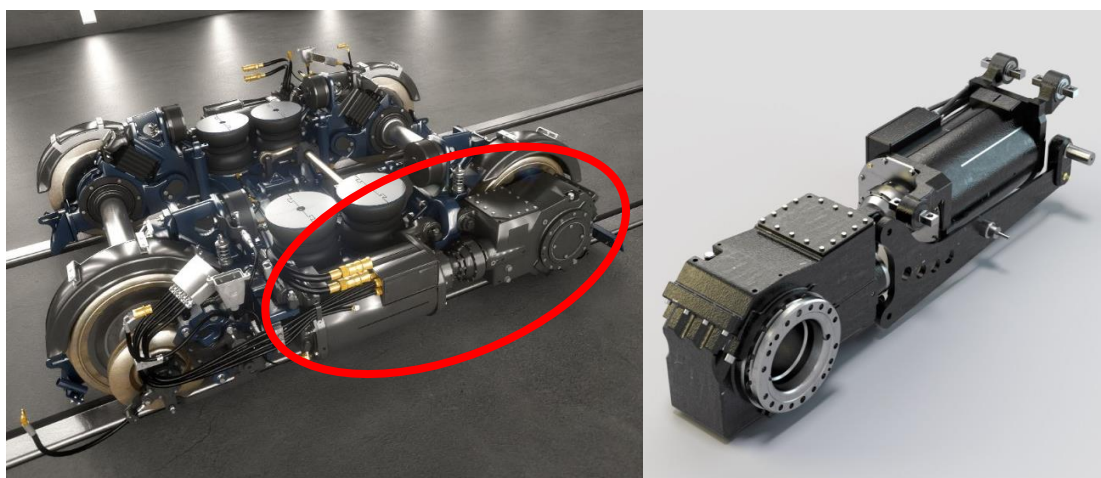
Patent na natáčení dvojkolí pomocí pák viz Obr. 2.28 [28]. Na každé straně podvozku bude jeden aktuátor – každé bogie bude mít vlastní. Pomocí pákového mechanismu bude aktuátor natáčet dvojkolí kolem svislé osy. Jako aktivní prvek může být použit elektrický lineární motor, hydraulický nebo pneumatický aktuátor. Aktuátor pracuje podle řídicího signálu, který je kontrolem generován na základě sledování trati. Slibuje dosažení lepší stability, zvýšení rychlosti vozidla minimalizací vibrací dvojkolí, čímž se zvýší komfort.



Obr. 2.28 Pákový systém aktivního natáčení dvojkolí [28]

5.5.7 FLEXX Tronic Technology

S natáčením dvojkolí experimentuje firma bombardier [29]. Pohony MITRAC 500 se používají pro lehká kolejová vozidla jako tramvaje apod. Jedna strana dvojkolí je pevně zafixována, druhá je řízena pomocí elektro-hydraulického aktuátoru – dvojkolí se natáčí kolem svislé osy. Díky technologii aktivního radiálního řízení a kontroly stability je možné překlenout most mezi stabilitou a hladkým průjezdem obloukem. Toto řešení je snižuje opotřebení kola a kolejnice, vibrace a hluk [30].



Obr. 2.29 Systém aktivního natáčení dvojkolí [29]

5.6 Současný stav poznání v oblasti řízení celého podvozku

Druhou cestou ke zvýšení kritické rychlosti omezením nežádoucí oscilace dvojkolí a zároveň ke snížení opotřebení kolejového svršku v obloucích malých rozměrů je zvýšení torzní tuhosti mezi podvozkem a skříní. K tomu jsou využity tlumiče vrtění, které jsou nahrazeny za aktivní prvek. Do oblouků tedy může být celý podvozek natáčen, čímž se sníží opotřebení způsobené velkými vodíci silami a náklady na údržbu. Studie řeší bohužel pouze aktivní řízení podvozků pomocí aktuátorů. Semi-aktivní MR tlumiče do této oblasti bohužel zatím příliš nepronikly.

Natáčení komponent řeší právě důležitý rozpor mezi rozdílnými požadavky na tlumicí systém pro stabilitu vlaku při vysoké rychlosti na přímé trati a pro ovladatelnost při průjezdu oblouky. Díky semi-aktivnímu nebo aktivnímu řízení může být pro přímou trať nastaveno vysoké tlumení a pro oblouk tlumení minimální, čímž jsou vyřešeny oba problémy najednou.

5.6.1 Active yaw damper for the improvement of railway vehicle stability and curving performances: simulations and experimental results (Braghin, 2006)

Cíl: Pomocí aktivního řízení natočení podvozku zlepšit jízdní vlastnosti po rovné trati a v oblouku.

Testovaná hypotéza: Aktivní řízení vlakového dvojkolí umožní zvýšení kritické rychlosti a zároveň lépe rozloží sílu od jednotlivých dvojkolí na kolej při průjezdu obloukem malého poloměru.

Získané poznatky: Braghin [31] si všimá, že stabilita jízdy se dá zvýšit zvýšením tuhosti mezi bogie a skříní, což ale činí problémy při projíždění oblouků (snížení bezpečnosti, zvýšení opotřebení). Tvrdí, že problém s vrtěním nelze vyřešit pomocí hydraulických tlumičů, kvůli jejich vnitřní pružnosti. Zaměnil proto pasivní tlumič vrtění za aktuátor. Prototyp aktuátoru byl testován na laboratorním standu pro získání charakteristik do matematického modelu. Aktuátor je konstrukčně koncipován tak, aby mohl být jednoduše namontován místo konvenčního tlumiče. Tento fakt funkci aktuátoru omezuje, pokud by bylo možné optimalizovat přípojně rozměry, mohlo by se dosáhnout lepších vlastností zařízení.



Obr. 2.30 Aktuátor místo tlumiče vrtění [31]

Navržená strategie řízení se snaží dosáhnout jak zvýšení stability na přímé trati, tak zlepšit vlastnosti podvozku při průjezdu obloukem. Aplikovaná síla se počítá ze dvou složek:

$$F_{ref} = F_{refS} \cdot F_{refC} \quad (3)$$

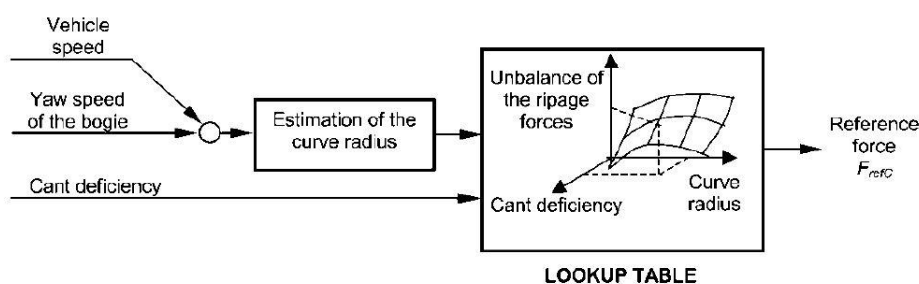
kde: F_{ref} celková referenční síla
 F_{refS} síla zajišťující stabilitu, reprezentuje tlumící efekt
 F_{refC} síla zajišťující průjezd obloukem

Pro zajištění stability se aktuátor chová jako tlumič.

$$F_{refS} = -(c_v \cdot v_{rel} + m_v \cdot a_x) \quad (4)$$

kde: F_{refS} síla zajišťující stabilitu, reprezentuje tlumící efekt
 c_v tlumící koeficient
 v_{rel} relativní rychlost mezi bogie a skříní
 a_x podélná akcelerace bogie

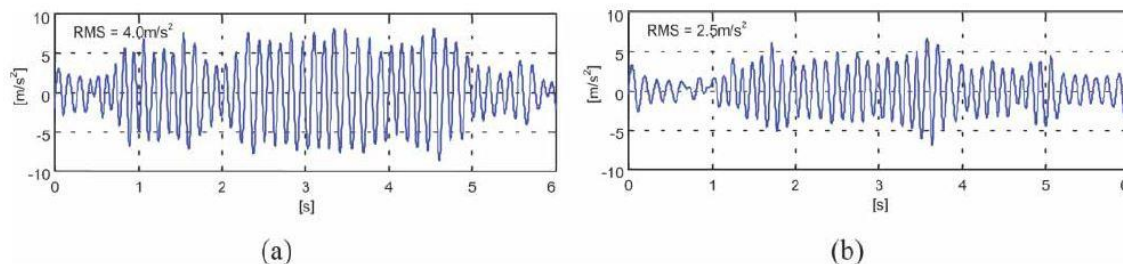
Druhý člen rovnice umožňuje kompenzovat setrvačné síly působící na aktuátor a některé účinky zpoždění senzoru rychlosti. Strategie cílicí na průjezd obloukem vychází z myšlenky vyrovnávat síly působící na první a druhé dvojkolí. Hodnota stáčivého momentu je funkce laterálního zrychlení bogie a poloměru oblouku. Kontrola funguje v otevřené smyčce. Měřené veličiny, které slouží k určení referenční síly, jsou následující: dopředná rychlost vlaku, naklonění vlaku z důvodu převýšení kolejí v oblouku a laterální zrychlení bogie. Z těchto veličin je odhadnut poloměr oblouku. Pokud se odhadnutý poloměr nachází nad stanovenou hodnotou, bude příslušná složka referenční síly 0 (F_{refC}). V ostatních případech je určen stáčivý moment a příslušné síly k jeho vyrovnání. Moment je určen na základě naměřených dat, pomocí tabulky hodnot určených na základě matematického modelu a experimentálních testů (Obr. 2.31).



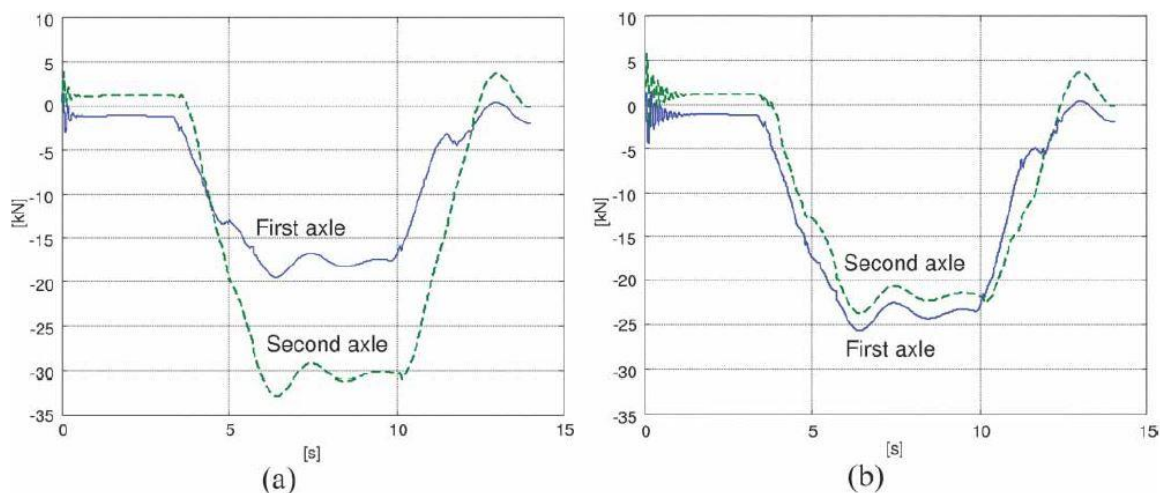
Obr. 2.31 schéma kontrolní strategie pro průjezd obloukem [31]

Postup pro definici tabulky korekcí musel vzít v úvahu, že špatně měřitelné parametry jako koeficient tření v kontaktu kolo/kolejnice a opotřebení profilů kol a kolejnic, ovlivňují hodnotu bočních sil v oblouku. Za účelem zohlednění rozptylu těchto veličin byly vypočteny různé korekce pro různé hodnoty koeficientu tření (0,15 – 0,5) a pro různé profily kol, od nových až po velmi opotřebované profily s nájездem 350000 km. Z těchto dat byla vypočtena průměrná korekce do tabulky.

Numerické simulace na komplexním multibody modelu ukázaly, že obě strategie fungují. Amplitudu vibrací při jízdě po přímé trati se podařilo snížit o 30 % (Obr. 2.32), a rozdíl mezi silami na první a druhé dvojkolí při průjezdu obloukem se snížil asi na 20 % (Obr. 2.33).



Obr. 2.32 Porovnání laterálních vibrací bogie při jízdě po přímé trati pro pasivní tlumič (a) a aktuátor (b) [31]



Obr. 2.33 Porovnání sil na první a druhé dvojkolí při jízdě obloukem pro pasivní tlumič (a) a aktuátor (b) [31]

Význam pro práci: V článku je podrobně popsána strategie řízení aktuátoru pro zvýšení stability vlaku při vysoké rychlosti a pro snížení laterálních sil kola na kolej.

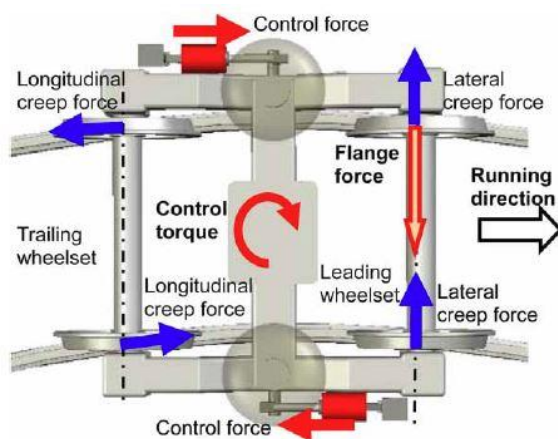
5.6.2 Curving performance evaluation for active-bogie-steering bogie with multibody dynamics simulation and experiment on test stand (Matsumoto, 2008)

Cíl: Pomocí aktivního řízení dvojkolí vyřešit problém s rozdílnými požadavky na utlumení nežádoucí oscilace a na průjezd obloukem.

Testovaná hypotéza: Díky aktivnímu řízení dvojkolí bude možné snížit laterální sílu kola na kolejnici.

Získané poznatky: Matsumoto [32] představuje nový koncept aktivně řízeného bogie. Na bogie jsou kladeny rozdílné požadavky, musí umožňovat bezproblémové zatáčení, stejně

jako zajišťovat stabilitu při vysokých rychlostech. Síly působící na podvozek v oblouku jsou zobrazeny na Obr. 2.34.



Obr. 2.34 Síly působící na podvozek [32]

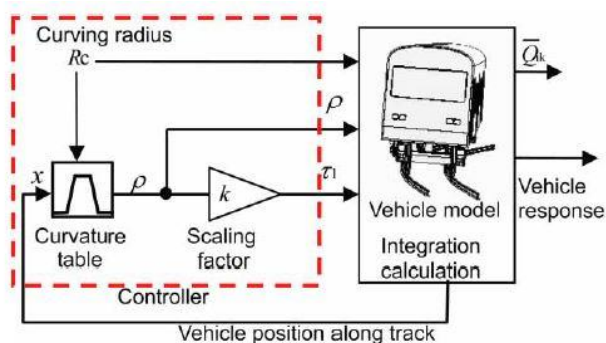
Autor se problémy snaží vyřešit také pomocí aktuátorů natáčejících bogie při průjezdu obloukem. Síla, kterou bude aktuátor působit, se vypočítá následovně:

$$F = k(R_c) \cdot \rho \quad (5)$$

kde:

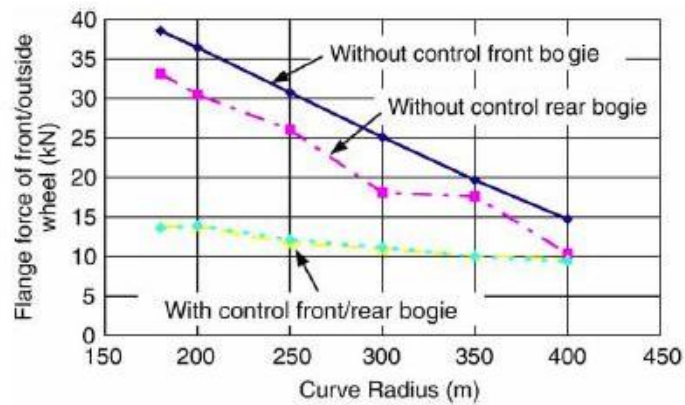
F	[N]	síla aktuátoru
k	[-]	faktor měřítka
ρ	[ms ⁻¹]	odhadované zakřivení trati
R_c	[ms ⁻¹]	konstantní poloměr oblouku

Faktor měřítka k je závislý na konstantním poloměru oblouku R_c a nastavuje se iteračně tak, aby byla boční přítlačná síla na přední kolo nulová, viz Obr. 2.35.



Obr. 2.35 Schéma výpočtu síly aktuátoru [32]

Laterální kontaktní sílu se podařilo snížit skoro na nulu, jak ukazují simulace (Obr. 2.36) a experiment na polovičním modelu vlaku.



Obr. 2.36 Laterální síly mezi kolem a kolejí [32]

Význam pro práci: V článku je popsán mechanismus, který působí na podvozek při průjezdu obloukem a možný způsob řízení podvozku pro snížení sil na kolej.

5.6.3 Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetotrological technology (Sun, 2013)

Cíl: Pomocí magnetoreologické technologie zvýšit kritickou rychlost vlaku.

Testovaná hypotéza: Při použití semi-aktivního řízení sekundárního laterálního tlumiče bude možné zvýšit kritickou rychlost vlaku

Získané poznatky: Sun [33] simuloval vliv semi-aktivního řízení sekundárního laterálního tlumiče na vibrace podvozku a velikost kritické rychlosti. K simulaci využil kombinaci multibody modelu železničního vozidla v programu Adams/Rail a řídicí strategie v Matlab/Simulink. MR tlumič byl modelován pomocí Bouc-Wen modelu [5]. Řídicí strategie byla realizována jako kombinace Skyhooku a Groundhooku.

$$F = F_{sky} + F_{gnd} \quad (6)$$

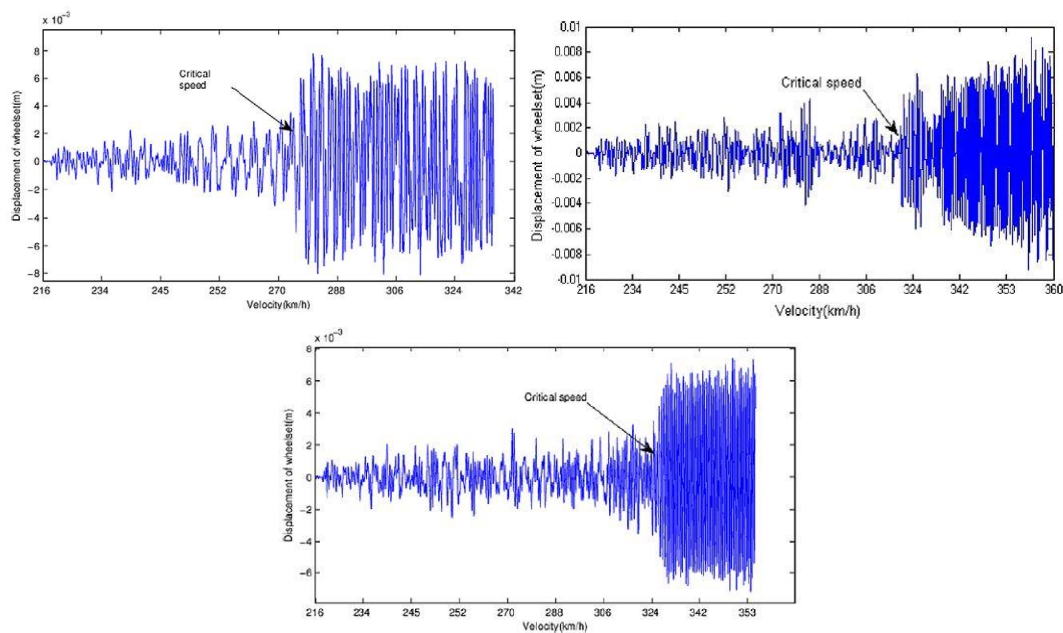
kde:

F [N] výsledná síla

F_{sky} [N] síla generovaná algoritmem skyhook

F_{gnd} [N] síla generovaná algoritmem groundhook

Přičemž řídicími veličinami jsou laterální rychlost bogie a skříně. Kritická rychlost je s tlumičem v neaktivovaném stavu 275 km/h, v aktivovaném stavu 319 km/h a při použití semi-aktivního módu se jí podařilo zvýšit na 328 km/h (Obr. 2.37). Ukazuje se tedy, že stabilita vlaku je závislá na tuhosti laterálního sekundárního tlumiče.



Obr. 2.37 Kritická rychlost pro tlumič OFF (vlevo), ON (vpravo) a semi-aktivní mód (dole) [33]

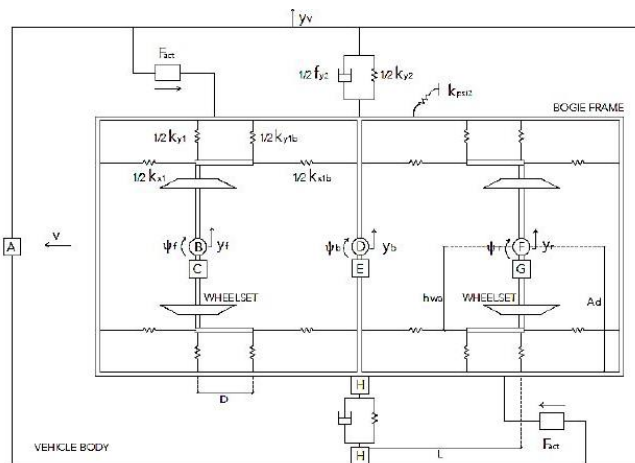
Význam pro práci: Stabilita vlaku je závislá na tuhosti laterálního sekundárního tlumiče, zvýšením této tuhosti je možné zvýšit kritickou rychlost.

5.6.4 Railway bogie stability control from secondary yaw actuators (Goodall, 2016)

Cíl: Rozšířit myšlenku regulovaného stáčení podvozku do oblouku o možnost použití aktivních tlumičů vrtění pro zvýšení stability vozidla s velmi měkkou tuhostí vůči vrtění.

Testovaná hypotéza: Při použití aktivních tlumičů vrtění bude možné snížit tuhost primárního odpružení (PYS) za současného zachování jízdních vlastností.

Získané poznatky: Goodall [34] se také zabýval záměnou pasivního tlumiče vrtění za aktivně řízený aktuátor. Výhodou této operace je jednoduchost. Simulace byly prováděny na polovičním modelu vagonu. Model je vybaven virtuálními senzory měřícími následující veličiny: A – laterální zrychlení skříně, H – relativní výchylka bogie od skříně, E – laterální zrychlení bogie, D – stáčivá rychlost bogie, C,G – laterální zrychlení dvojkolí a B,F – stáčivá rychlost dvojkolí (Obr. 2.38).



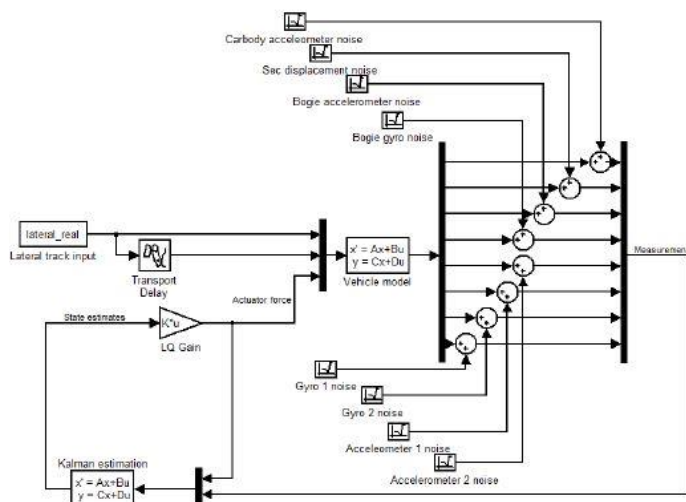
Obr. 2.38 Poloviční model vlaku [34]

Jsou použity tři typy buzení:

- 1) 10 mm laterální impuls pro počáteční posouzení,
- 2) prostorová realizace nízkourovňového výkonového spektra, která poskytuje reprezentativní boční nepravidelnosti,
- 3) vysokorychlostní oblouk s přechodnicí délky 100 m délkou samotného oblouku 450 m, poloměrem 500 m. K signálu, ze všech senzorů je přidán šum o velikost 1 % plné hodnoty.

Navrženy jsou dvě řídicí strategie:

- 1) řízení s plnou zpětnou vazbou (LQR) – ze které vychází
- 2) řízení s odhadem stavu (LQG) – údaje ze senzorů nahrazuje odhadem z Kalmanových filtrů, aby se možným problémům způsobeným stochastickými poruchami. Řídicí smyčka je dokončena stejně jako u předchozího návrhu (Obr. 2.39). Při přidání aktivního řízení tlumiče vrtění je možné snížit tuhost primárního odpružení na 10 % při snížení míry vibrací na 71 % (Tab. 2).



Obr. 2.39 schéma LQG řídicí strategie s použitím Kalmanových filtrů [34]

Passive – 10% PYS	Passive – 100% PYS	Active – 10% PYS
3.1 m/s ²	2.1 m/s ²	1.5 m/s ²

Tab. 2 Míra vibrací pro simulované typy tlumení [34]

Význam pro práci: V práci je představena možnost řízení dvojkolí pomocí strategie s odhadem aktuálního stavu. Dále je ukázáno, že při použití aktivního aktuátoru mohou být tuhosti použitých pružin minimální.

5.6.5 Electro hydraulic actuation (EHA) systems for primary flight control, landing gear and other type of actuation (Gaile, 2016)

Cíl: Ukázat různé typy chytrých elektro-hydraulických aktuátorů (EHA)

Získané poznatky: Liebherr začal vyrábět elektrohydraulické aktuátory pro vysouvání vztlačových klapek dopravních letadel. Postupem času se dostal k výrobě EHA aktuátorů pro natáčení podvozků vlaků [35].



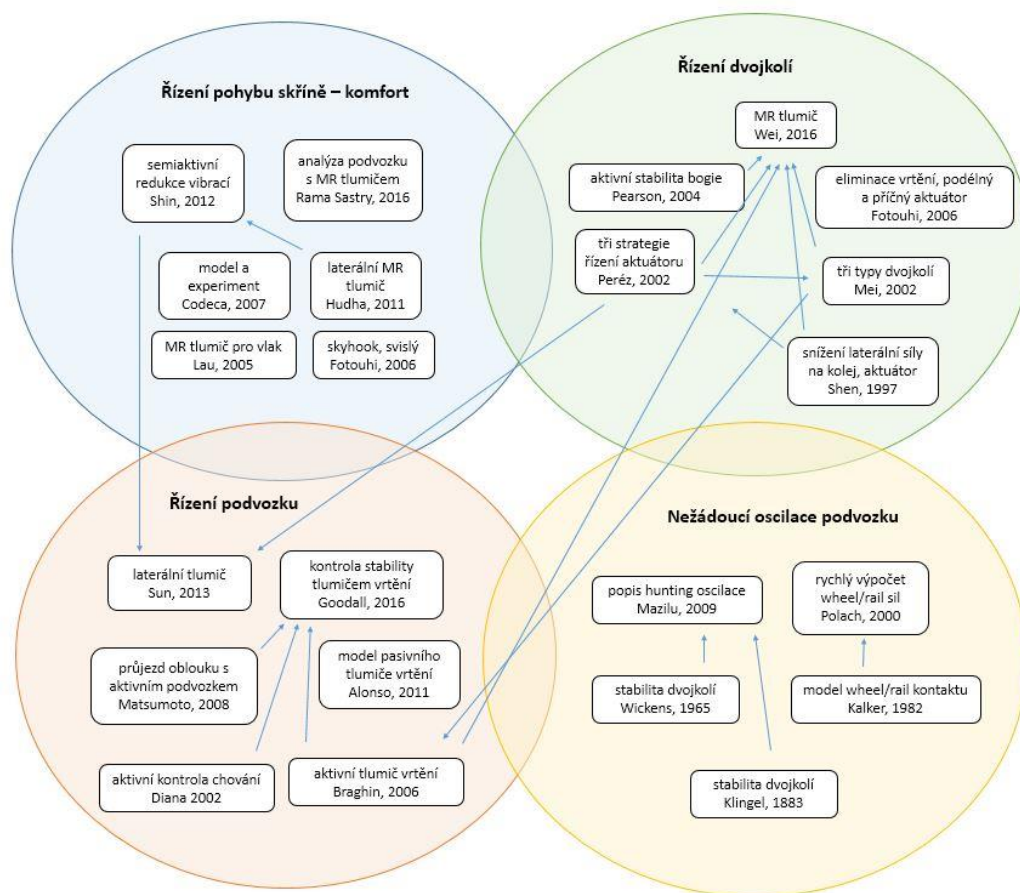
Obr. 2.40 EHA aktuátor pro řízení podvozku vlaku [35]

Význam pro práci: Natáčení podvozků vlaků se běžně používá v praxi.

Autor	rok	název	cíl	řízený prvek	strategie	řídící veličina
Zvyšování komfortu						
Lau	2005	Design and analysis...	snížení vibrací skříně	MR tlumič	adaptivní	laterální rychlost skříně
Fotouhi	2006	Semi-active train bogie...	snížení vibrací skříně	MR tlumič	skyhook	laterální rychlost skříně a bogie
Codeca	2007	Semiactive control...	snížení vibrací skříně	MR tlumič	skyhook, acceleration drive damping, SH-ADD, mix-1-control	laterální zrychlení skříně a bogie
Hudha	2011	Lateral suspension control...	snížení vibrací skříně	MR tlumič	bodybased a bogiebased skyhook	laterální rychlost skříně a bogie
Shin	2012	Semi-active control...	snížení vibrací skříně	MR tlumič	skyhook	laterální rychlost skříně a bogie
Řízení dvojkolí						
Shen	1997	Active yaw relaxation...	snížení síly kola na kolej	aktuátor	otevřená a uzavřená smyčka	úhlová výchylka dvojkolí vůči rámu
Fotouhi	2006	Improve hunting...	snížení výchylky dvojkolí	aktuátor	adaptivní	výchylka dvojkolí
Wei	2016	A semi-active control...	snížení výchylky dvojkolí	MR tlumič	shyhook, dahlův model	úhel mezi soukolím a bogie a rozdíl úhlové rychlosti mezi dvoukolím a bogie
Řízení podvozku						
Diana	2002	Active control...	snížení síly kola na kolej	aktuátor	$F_{ref} = F_{refs} + F_{refc}$	relativní rychlost bogie ke skříně, zrychlení bogie
Braghin	2006	Active yaw damper...	snížení síly kola na kolej	aktuátor	$F_{ref} = F_{refs} + F_{refc}$	relativní rychlost bogie ke skříně, zrychlení bogie
Matsumoto	2008	Curving performance...	snížení síly kola na kolej	aktuátor	$F = k(Rc) \cdot \rho$	poloměr oblouku
Sun	2013	Improving the critical...	snížení vibrací	MR tlumič	$F = F_{sky} = F_{gnd}$	laterální rychlost bogie a skříně
Goodall	2016	Railway bogie stability...	použití slabších pružin při zachování úrovně vibrací	aktuátor	LQR, LQG	laterální zrychlení skříně a bogie a dvojkolí, úhlové zrychlení bogie a dvojkolí, relativní rychlost bogie a skříně

Tab. 3 Shrnutí článků

6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ



Obr. 6.1 Myšlenková mapa

6.1 Řízení pohybu skříně

Nejvíce studií na téma řízení železničních podvozků řeší řízení pohybu skříně za účelem zvýšení komfortu posádky. Ukazuje se, že při výměně pasivních laterálních sekundárních tlumičů za tlumiče semi-aktivně řízené je možné snížit vibrace skříně až o 30-40% [19][18]. Laterálním pohybem se zabývá většina studií, nicméně pro komfort mají přínos i svislé semi-aktivně řízené tlumiče [36]. K semi-aktivnímu řízení se hojně používají MR tlumiče [37][38]. Jako řídicí strategie je nejčastěji využíváný semi-aktivní algoritmus skyhook [39], uspokojivých výsledků lze ale dosáhnout i s jednodušším adaptivním ON/OFF algoritmem, který zvýší úroveň tlumení při dosažení stanovené míry vibrací [18]. Skyhook může být založen jak na utlumení pohybu bogie, tak na utlumení pohybu skříně [20]. V předchozí

kapitole je uveden pouze zlomek studií, který je zajímavý použitými semi-aktivními algoritmy. Tato oblast je poměrně dobře prozkoumána.

Řízení pohybu skříně pro zvýšení komfortu leží trochu mimo oblast zájmu, protože přímo nesouvisí se zásadními problémy, kterými je nežádoucí oscilace podvozku při vysoké rychlosti a opotřebování kolejí v obloucích malých poloměrů. Všechny studie, ale pracují se semi-aktivně řízenými MR tlumiči a používají podobné řídicí strategie, proto jsou v této rešerši uvedeny.

6.2 Přístupy k řešení rozporu mezi stabilitou a ovladatelností

Další často řešený problém je rozpor v požadavcích na tlumicí systém pro přímou trať a v požadavcích pro oblouk malého poloměru. K řešení tohoto problému existují dva rozdílné přístupy.

6.2.1 Řízené dvojkolí

Prvním přístupem je řízení jednotlivých dvojkolí. Cesty k tomuto řízení jsou 3: použití primárních podélných tlumičů mezi dvojkolím a rámem, které jsou řízeny buď adaptivně nebo semi-aktivně, nebo použití aktivních aktuátorů na stejném místě.

Dobrych výsledků ve snižování vibrací dvojkolí dosahuje podobně jako u eliminace nežádoucího pohybu skříně řízení pomocí semi-aktivního algoritmu skyhook [26]. Ukazuje se, že uspokojivých výsledků lze ale dosáhnout i s adaptivním algoritmem [25]. Nejčastěji je ale řízení řešeno pomocí aktuátorů [21][40]. Jako řídicí veličina se nejčastěji využívá laterální výchylka dvojkolí, ale může jí být o úhel nebo dvojkolí vůči podvozku [22], případně kombinace úhel mezi soukolím a podvozkem a rozdíl úhlových rychlostí dvojkolí a podvozku [26]. Nejlepších výsledků dosahuje strategie aktivního řízení, pokud jsou jednotlivá kola nezávisle uložena [23]. Nezávislé uložení kol ale znamená razantní zásahy do konstrukce vozidla – pro současné vozidlo je tedy tento princip nepoužitelný.

Současná železniční vozidla nepoužívají primární tlumiče v podélném a příčném směru, proto by aplikace této technologie znamenala konstrukční úpravy podvozku. Uplatní se tedy spíše u nové generace vozidel.

6.2.2 Řízený podvozek

Druhým přístupem řešení tohoto rozporu je řízení pohybu celého podvozku. U podvozku je možné řídit zaprvé jeho natočení což je realizováno pomocí aktivních aktuátorů umístěných místo tlumičů vrtění. Za druhé je možné řídit jeho laterální polohu pomocí sekundárních příčných tlumičů.

Natáčení podvozku je realizováno vždy pomocí aktivních aktuátorů. Idea je snížení laterálních sil na kolej, čímž se sníží opotřebení a náklady na údržbu. Aby vlak zatočil, je třeba určitá vodící síla, proto síly na kolej nemůžeme minimalizovat na nulu. Cílem je tedy vyrovnat v oblouku sílu od prvního a druhého dvojkolí, čím se maximální síla zmenší [32][41][31] (Obr. 2.33). Tyto síly jsou tedy vstupními veličinami do výpočtu řídicí síly aktuátoru. Na rovné trati je potom nastaveno silné tlumení, které eliminuje nežádoucí oscilace dvojkolí.

Při aktivním řízení podvozku lze snížit tuhost primárního odpružení na 10 % oproti použití pasivních tlumičů vrtění při snížení míry vibrací na 71 % [34].

Pomocí řízení laterální polohy podvozku pomocí sekundárního laterálního MR tlumiče lze zvýšit kritickou rychlost vlaku, ale pouze o 3 % oproti podvozku tlumenému MR tlumičem v ON režimu. Ukázalo se ale, že na tuhosti sekundárního laterálního tlumiče je stabilita vlaku velice závislá [33].

Vzhledem k tomu že tlumiče vrtění má téměř každé železniční vozidlo, je technologie natáčení podvozku přímo využitelná pro současné vlaky, které mají ambici zvýšit svoji maximální rychlost. Prozatím nikdo nestudoval řízení podvozku pomocí MR tlumiče kterým by nahradil tlumič vrtění.

6.3 Nežádoucí oscilace dvojkolí a jeho kontakt s kolejí

Fakt, že při odvalování dvojkolí dochází k jeho nežádoucí oscilaci, popsal již v roce 1883 Klingel [17]. Jeho práci v roce 1965 rozvinul Wickens [42]. Aby bylo možné oscilaci dvojkolí nasimulovat tak aby se simulace blížila realitě, je rozhodující správně matematicky popsat. Úplný matematický popis kolo/kolejnice kontaktu vytvořil v roce 1982 Kalker [43] a tento model v roce 2000 zjednodušil Polach [44]. Polachův model je v současné době nejpoužívanějším modelem pro popis kolo/kolejnice kontaktu.

6.4 Použité algoritmy

Ve studiích jsou používány nejrůznější algoritmy pro semi-aktivní řízení tlumičů. Ukazuje se, že ke snížení vibrací mohou dobře posloužit i triviální algoritmu typu ON/OFF, který zvýší koeficient tlumení tlumiče, pokud vibrace přesáhnou stanovenou hodnotu [18].

Nejčastěji ale algoritmy vychází ze strategie Skyhook [39]. Tento algoritmus přepíná mezi dvěma stavy – maximální tlumení a minimální tlumení (ON/OFF). Pomocí tohoto přepínání sleduje polohu určené hmoty, pokud se hmota blíží do požadované polohy, tlumič je deaktivovaném stavu, a pokud se hmota z požadované polohy vzdaluje, tlumič se aktivuje [39].

Ke snížení vibrací také mohou posloužit kombinace Skyhooku s jinými strategiemi, například s ADD control [19] nebo s algoritmem Groundhook [33].

6.5 Nezmapovaná oblast poznání

Hlavní neprobádanou oblastí je možnost řešení výše popsaného rozporu v požadavcích na tlumení podvozků pomocí semi-aktivně řízeného natáčení celého podvozku MR tlumiči vrtění. Tímto tématem se prozatím nikdo nezabýval.

Eliminace nežádoucí oscilace podvozku pomocí MR tlumiče vrtění

MR tlumič vrtění by mělo jít využít k eliminaci nežádoucí oscilace podvozku bez toho, aby se zvýšilo opotřebení kolejí při průjezdu obloukem. Tlumiče by na rovné trati silně tlumily a tím zvyšovali stabilitu a zároveň maximální rychlost vlaku a při průjezdu obloukem by tlumení bylo minimální, aby nedocházelo ke zbytečnému namáhání kolejí a jejich opotřebení.

Natáčení podvozku do oblouku pomocí MR tlumiče vrtění

Algoritmus skyhook se snaží udržovat odpruženou hmotu ve výchozí pozici. Teoreticky by pomocí podobného algoritmu mělo být možné sledovat jinou polohu, než výchozí a tím pádem by mělo jít natáčet podvozek podle potřeby. Metoda bude mít logické své limity, vychýlení hmoty z výchozí pozice bude především bránit odpružení podvozku a také bude velmi záviset na frekvenci a amplitudě pohybu budící hmoty. Nic podobného ale zatím nikdo nepublikoval.

Efektivita algoritmu podle vstupní veličiny

S předchozími dvěma body souvisí to, že efektivita algoritmu bude také závislá na tom, jaké veličiny se použijí jako řídicí. Bude nutné vytvořit několik variant algoritmu a porovnat jejich efektivitu.

Efektivita algoritmu podle F-v charakteristiky tlumiče

Funkce algoritmu bude také závislá na F-v charakteristice daného tlumiče. Bude nutné provést citlivostní analýzu sklonu F-v křivky před a za kolenem a polohy kolene.

Vliv časové odezvy tlumiče

Dalším bílým místem je fakt, že studie až na výjimky v simulacích zanedbávají časovou odezvu tlumiče. Velká časová odezva výrazně znehodnocuje výsledky použité řídicí strategie. Současné běžně používané adaptivní tlumiče mají časovou odezvu 20 - 200 ms, což není zanedbatelné. Vliv časové odezvy je tím markantnější, čím je rychlejší děj, který se snažíme tlumit. Frekvence nežádoucí oscilace podvozku se pohybuje kolem 5-6 Hz [8][45], což je poměrně nízká frekvence. Teoreticky by tedy velká časová odezva tlumiče nemusela znamenat takový problém. Reálná časová odezva MR tlumičů se pohybuje od 1,5 ms u ultra rychlého tlumiče [46] po 100 ms [19], což zcela jistě rozdíl v efektivitě semi-aktivního řízení způsobí.

Vliv dynamického rozsahu tlumiče

Podobný vliv jako časová odezva má dynamický rozsah – poměr koeficientu tlumiče v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Logicky čím větší bude dynamický rozsah, tím bude semi-aktivní řízení efektivnější. V simulacích je oblíbené nastavovat sílu tlumiče v neaktivovaném stavu na 0, což ale reálně nikdy nastane. Reálný dynamický rozsah se pohybuje od 2 do 11,88 [47].

7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

7.1 Podstata

Podstatou práce je pomocí semi-aktivního řízení tlumiče vrtění vyřešit problém s rozdílnými požadavky na tlumicí systém pro různé režimy jízdy, popsat jaké parametry tlumičů, řídicí strategie a parametrů trati budou mít na efektivitu tohoto řízení jaký vliv a popsat jaké bude mít toto řízení limity.

Pro jízdu po přímé trati je nutné velké tlumení, které zabraňuje nežádoucí oscilaci dvojkolí. Pro průjezd obloukem je třeba tlumení minimální, aby došlo ke snadnému natočení podvozku do oblouku. Tyto rozdílné požadavky jsou těžko splnitelné s použitím konvenčních pasivních tlumičů. Použití semi-aktivních tlumičů vrtění slibuje jak snížená vibrací při rychlé přímé jízdě tak snížení sil kola na kolej při průjezdu obloukem, a to minimálními zásahy do konstrukce železničního vozidla. Tato práce je zaměřena na aplikovaný výzkum. Je převážně teoretická ale počítá s ověřením navrženého řešení na reálném tlumiči.

7.2 Cíle

Hlavním cílem práce bude návrh, simulační a ověření algoritmu pro semi-aktivní řízení tlumiče vrtění, pomocí kterého bude možné snížit nežádoucí vibrace podvozku (vrtění) při jízdě na rovné trati vysokou rychlostí, což povede ke zvýšení kritické rychlosti a zároveň snížit laterální síly na kolej při průjezdu vlaku obloukem, čímž se sníží opotřebení kolejí a náklady na jejich údržbu.

Dílejší cíle jsou:

- Teoretický návrh algoritmů pro řízení MR tlumiče vrtění včetně řídicích veličin
- Popis limitů udržování odpružené hmoty v nenulové poloze a citlivostní analýza vstupujících vliv (model 1DOF)
- Návrh a tvorba zjednodušeného dynamického modelu železničního vozidla
- Tvorba a implementace modelu rychlého MR tlumiče do modelu vozidla – nastavitelná F-v charakteristika, časová odezva a dynamický rozsah
- Implementace Polachova modelu kolo/kolej
- Identifikace a verifikace modelu
- Implementace navržených algoritmů do simulačního prostředí a ověření jejich funkce

- Citlivostní analýza tvaru a sklonu F-v charakteristiky, typu řídicí veličiny, časové odezvy a dynamického rozsahu
- Výběr nejefektivnějšího algoritmu.
- Návrh a realizace úlohy pro ověření algoritmu pomocí systému hardware in the loop na reálném tlumiči vrtění
- Ověření algoritmu na celkovém virtuální modelu lokomotivy (spolupráce s UP)

7.3 Přínos

Semi-aktivní řízení tlumičů vrtění sníží náchylnost dvojkolí k nežádoucí oscilaci, čímž umožní železničním vozidlům zvýšit rychlost. Zároveň umožní pro průjezd obloukem použít slabé tlumení, čímž se průjezd usnadní a nebude se zvyšovat opotřebení kolejí – to povede ke snížení nákladu na údržbu tratí. Provedené citlivostní analýzy pomohou k optimálnímu návrhu MR tlumiče vrtění a k efektivnímu návrhu řídicí strategie pro tento tlumič.

Výměna konvenčního pasivního tlumiče vrtění za semi-aktivní MR tlumič bude možná bez větších zásahů do konstrukce vozidla. Semi-aktivní řízení tlumičů tedy bude použitelné pro současná železniční vozidla, čímž se bude řešit jednak aktuální problém vysokého opotřebení tratí a jednak se zvýší konkurenceschopnost vozů díky vyšší maximální rychlosti.

8 VĚDECKÉ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Otázka 1:

Jaký ovlivní semi-aktivní řízení tlumičů vrtění velikost kritické rychlosti železničního vozidla oproti tlumičům pasivním při zachování stejné laterální síly kola na kolej při průjezdu obloukem.

Hypotéza:

Kritická rychlost se zvýší díky tomu, že rychlou změnou koeficientu tlumení budu schopen efektivně tlumit vibrace podvozku při vysoké rychlosti tím způsobem, že v okamžiku kdy se bude podvozek blížit do požadované polohy tak tlumič deaktivuji a když se od ní bude oddalovat, tak jej aktivuji. Díky tomu, že tlumič nebude aktivovaný permanentně, mohu v aktivovaném stavu použít větší síly, než které bych mohl použít pro pasivní tlumič, aniž bych se vystavil riziku přenosu nežádoucích vibrací na skříň. Pro průjezd obloukem bude tlumení na staveno na minimum, čímž se zachovají, nebo sníží laterální síly na kolej.

Otázka 2:

Jaké jsou možnosti a limity udržování odpružené hmoty v jiné než výchozí poloze pomocí semi-aktivního řízení tlumiče?

Hypotéza:

Efektivita udržování odpružené hmoty v poloze jiné než nulové bude omezená především tuhostí pružin, které hmotu udržují ve výchozí poloze (tuto tuhost bude pro dosažení jiné polohy třeba překonat). Dále bude mít na efektivitu vliv amplituda a frekvence polohy hmoty neodpružené. S malou frekvencí pohybu nebo amplitudou nebude možné odpruženou hmotu vychýlit až do požadované polohy.

Otázka 3:

Jaký vliv na laterálních sil na kolej bude mít semi-aktivní algoritmus řízení tlumiče vrtění stáječící podvozku do oblouku?

Hypotéza:

Laterální síly kola na kolej se sníží, ale minimálně. Při průjezdu obloukem na podvozek mimo sil od tlumičů působí velké setrvačné síly a síly od odpružení.

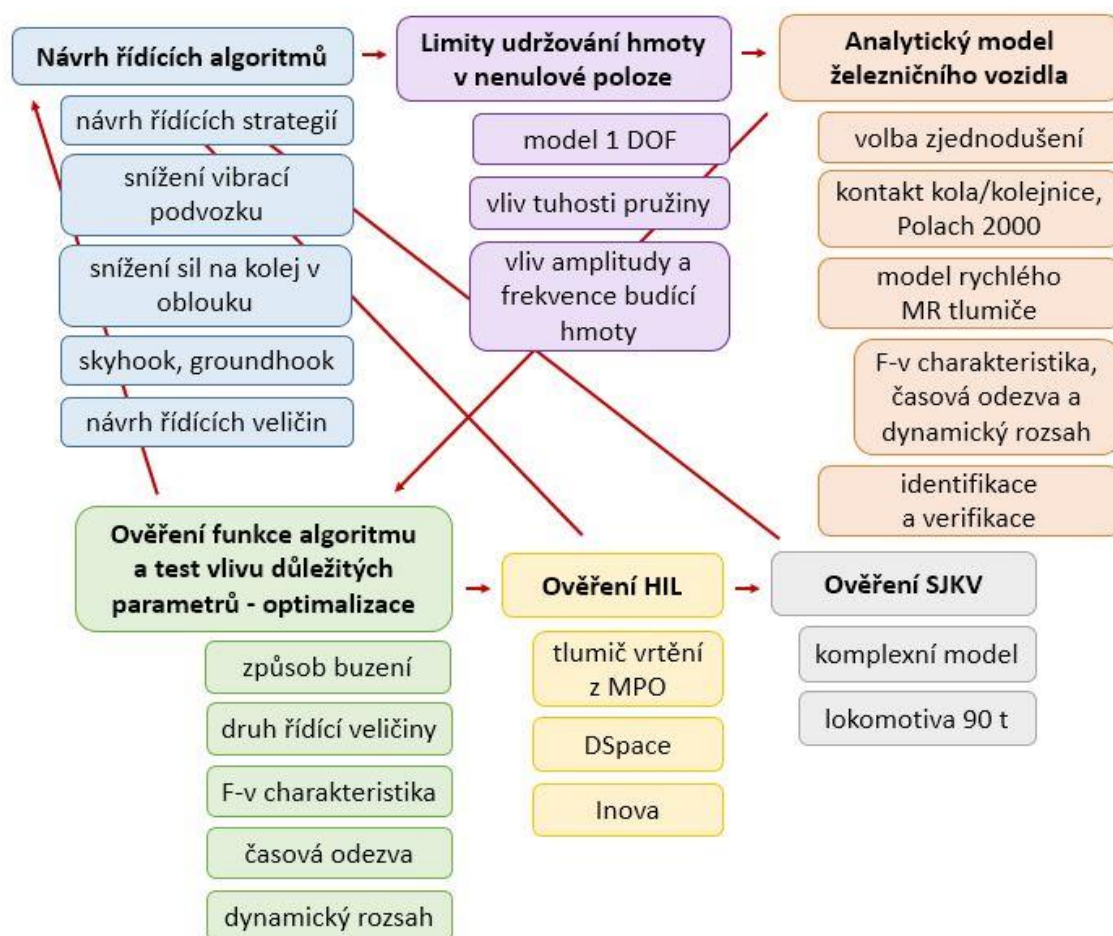
Otázka 4:

Jaký vliv na efektivitu použité semi-aktivní strategie bude mít časová odezva a dynamický rozsah tlumiče.

Hypotéza:

Čím bude kratší časová odezva a větší dynamický rozsah, tím lépe bude strategie fungovat. Vzhledem k nízké frekvenci vrtění, ale větší časová odezva nebude mít tak velký vliv. Oproti tomu dynamický rozsah bude mít zásadní.

9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY

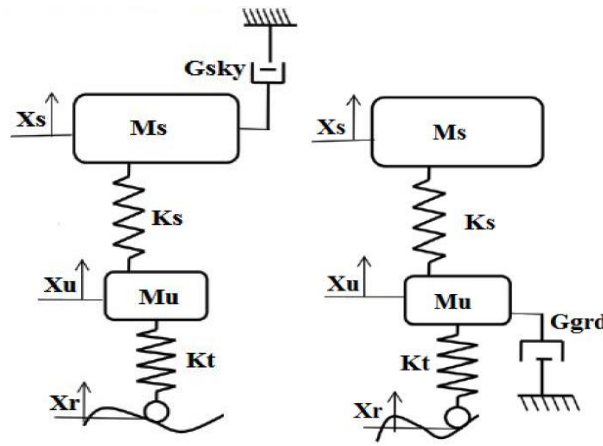


Obr. 9.1 Schématický postup řešení

9.1 Návrh řídicích algoritmů

Prvním krokem bude teoretický návrh algoritmů pro semi-aktivní řízení tlumiče vrtění. Algoritmy budou koncipovány tak, aby při rychlé jízdě po přímé trati zajišťovali dostatečnou stabilitu, a naopak při průjezdu obloukem tlumení snížili, aby průjezd proběhl snadno.

Řídicí strategie bude vycházet z algoritmů skyhook [39] a groundhook [6]. V okamžiku, kdy se bude podvozek blížit do požadované polohy tak bude tlumič deaktivován a když se od ní bude oddalovat, tak jej aktivují. Skyhook se snaží udržovat hmotu ve stálé stejné poloze (Obr. 9.2 – vlevo), bude tedy využit pro utlumení vibrací při rychlé jízdě. Groundhook se snaží udržovat stále stejnou přítláčnou sílu hmoty k pokladu (Obr. 9.2 – vpravo), bude tedy využit ke snížení přítláčných sil kol na kolejnici, při průjezdu obloukem. Přepínání mezi režimy se bude řídit rychlostí vlaku – oblouky malých poloměrů se projíždí vždy malou rychlostí.



Obr. 9.2 Schéma ideálního skyhooku a groundhooku [48]

Matematicky vyjádřeno, skyhook:

$$F = \begin{cases} b_{max}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), & \dot{x}_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \geq 0 \\ b_{min}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), & \dot{x}_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

kde:

- F [N] tlumící síla
- b_{max} [-] tlumící koeficient tlumiče v aktivovaném stavu
- b_{min} [-] tlumící koeficient tlumiče v neaktivovaném stavu
- \dot{x}_2 [ms^{-1}] laterální rychlost podvozku
- \dot{x}_1 [ms^{-1}] laterální rychlost skříně.

Modifikovaný groundhook:

$$F = \begin{cases} b_{max}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), & \ddot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \geq 0 \\ b_{min}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), & \ddot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

kde:

- F [N] tlumící síla
- b_{max} [-] tlumící koeficient tlumiče v aktivovaném stavu
- b_{min} [-] tlumící koeficient tlumiče v neaktivovaném stavu
- \ddot{x}_1 [ms^{-1}] laterální zrychlení skříně.
- \dot{x}_2 [ms^{-1}] laterální rychlost podvozku
- \dot{x}_1 [ms^{-1}] laterální rychlost skříně.

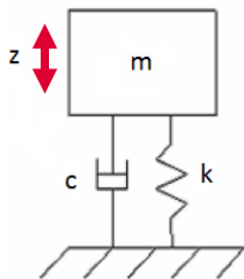
Za vstup do výpočtu tedy budou zvoleny laterální rychlosti podvozku a skříně a laterální zrychlení podvozku, případně úhlové rychlosti podvozku a skříně dle [26]. Tyto veličiny je reálně možné měřit akcelerometry, případně snímači úhlové rychlosti. Algoritmus bude navržen v různých variantách a v dalších krocích bude vybrána optimální varianta.

9.2 Studium limitů udržování odpružené hmoty v nenulové poloze

Semi-aktivní algoritmus má za cíl udržovat odpruženou hmotu stále ve stejné poloze s minimálními výkmity. Tuto polohu můžeme označit jako nulovou. Je to poloha, ve které je při statickém zatížení součet sil na hmotu nulový. Pokud neodpružená hmota pohybuje s hmotou odpruženou do požadované polohy, je tlumič aktivovaný a tento pohyb tak podporuje. Pokud neodpružená hmota hmotu odpruženou z požadované polohy vychyluje, je tlumič neaktivovaný, čímž tento pohyb neutralizuje. Teoreticky by ale požadovaná poloha nemusela být poloha nulová a tlumič by inteligentním zapínáním a vypínáním mohl se hmotou pohybovat podle zadání.

Udržování neodpružené hmoty v nenulové poloze bude mít ale zajisté svoje limity. Čím bude požadovaná poloha od polohy nulové vzdálenější, tím bude náročnější hmotu v této poloze udržet. Hlavním limitujícím faktorem bude tuhost pružiny mezi odpruženou a neodpruženou hmotou. Tuhost této pružiny je hlavní síla, která odpruženou hmotu udržuje v nulové poloze. Čím bude tuhost větší, tím bude větší problém odpruženou hmotu do požadované polohy dostat. Další vliv bude mít amplituda a frekvence odpružené hmoty. Naopak, čím budou tyto veličiny větší, tím bude snazší požadované polohy dosáhnout.

Dalším krokem tedy bude na jednoduchém modelu o 1 stupni volnosti (Obr. 9.3) studovat vliv těchto veličin na efektivitu navrženého algoritmu a popsat limity navržené metody.



Obr. 9.3 Model o 1. stupni volnosti

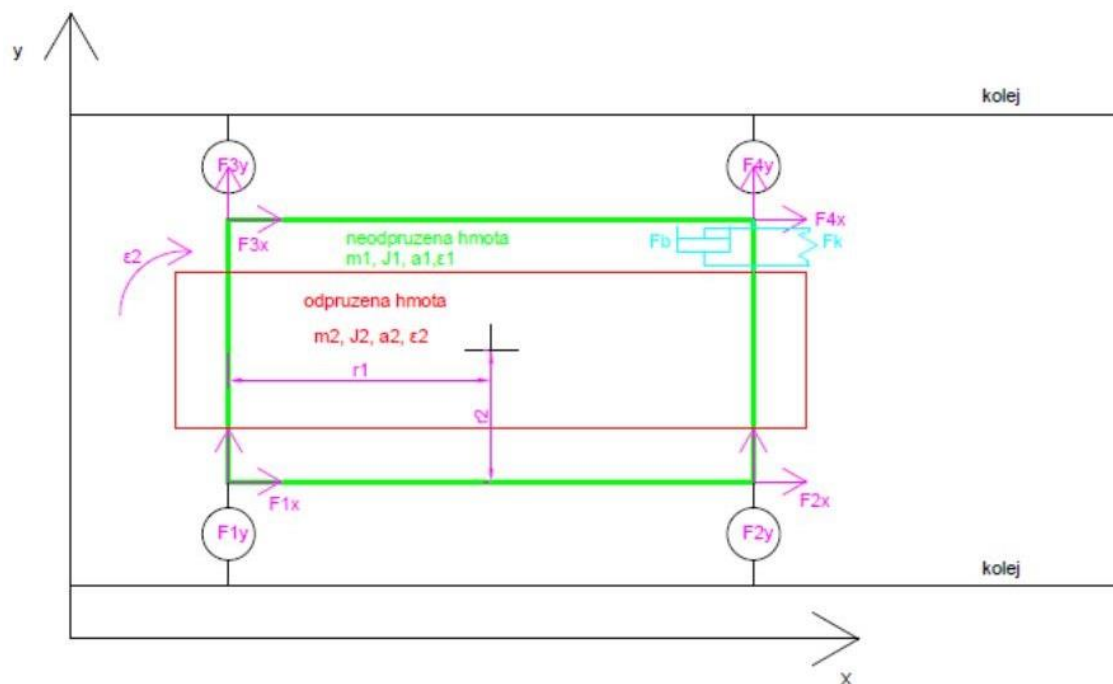
9.3 Tvorba dynamického modelu železničního vozidla

Podle navržených algoritmů a na základě rešerše modelů železničních vozidel bude vybráno vhodné zjednodušení železničního vozu a v Matlab Simulink bude vytvořen odpovídající virtuální analytický model o určeném počtu stupňů volnosti. Vstupem do tohoto zjednodušeného modelu budou parametry železničního vozidla jako rozvor, tuhosti pružin, F-v charakteristiky použitých tlumičů, hmotnosti a momenty setrvačnosti obsažených prvků a kinematické buzení adekvátní k reálné případně ideální trati.

V prvním kroku bude zvolen poloviční model vozidla o tří stupních volnosti (Obr. 9.4):

- rotace skříně kolem svislé osy,
- rotace podvozku kolem svislé osy,
- laterální pohyb obou hmot,

který obsahuje polovinu skříně a jeden podvozek (bogíe). Vazba mezi dvojkolím a podvozkem bude považována za dokonale tuhou.



Obr. 9.4 Poloviční model železničního vozidla o 3. stupních volnosti

Pohybové rovnice tohoto modelu budou následující:

$$(m_1 + m_2) \cdot a_{1y} = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} \quad (9)$$

$$J_1 \cdot \varepsilon_1 = (F_{1y} - F_{2y} + F_{3y} - F_{4y} - F_b - F_k) \cdot r_1 + (-F_{1x} - F_{2x} + F_{3x} + F_{4x}) \cdot r_2 \quad (10)$$

$$J_2 \cdot \varepsilon_2 = (F_k + F_b) \cdot r_1 \quad (11)$$

$$F_k = -r_1 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot k \quad (12)$$

$$F_b = -r_1 \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot b \quad (13)$$

kde:

m_1	[kg]	hmotnost podvozku
m_2	[kg]	hmotnost poloviny skříně
J_1	[kgm ²]	moment setrvačnosti podvozku kolem svislé osy
J_2	[kgm ²]	moment setrvačnosti skříně kolem svislé osy
a_{1y}	[ms ⁻²]	laterální zrychlení celku

ε_1	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení podvozku kolem svislé osy
ε_2	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení skříně kolem svislé osy
ω_1	[rads ⁻¹]	úhlová rychlost podvozku kolem svislé osy
ω_2	[rads ⁻¹]	úhlová rychlost skříně kolem svislé osy
α_1	[rads]	natočení podvozku kolem svislé osy
α_2	[rads]	natočení skříně kolem svislé osy
F_{1-4x}	[N]	podélné síly v kontaktu kolo/kolejnice
F_{1-4y}	[N]	laterální síly v kontaktu kolo/kolejnice
F_k	[N]	síla od tuhosti proti vzájemnému natočení skříně a podvozku kolem svislé osy
F_b	[N]	síla od tlumiče vrtění
k	[N/m]	tuhost proti vzájemnému natočení skříně a podvozku kolem svislé osy
b	[Ns/m]	tlumicí koeficient tlumiče vrtění
r_1	[m]	podélná vzdálenost kola od svislé osy otáčení podvozku
r_2	[m]	příčná vzdálenost kola od svislé osy otáčení podvozku

Výstupem z modelu budou zrychlení a úhlové rychlosti jednotlivých prvků (skříní podvozek).

K výpočtu laterálních sil F_{1-4y} v kontaktu kolo/kolejnice bude použit Polachův model [44]. Kontakt dvojkolí a kolejnice bude zjednodušen na kontakt dvou válců.

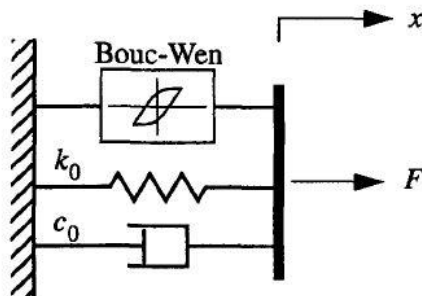
$$F_y = -\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot a^3 \cdot b \cdot C_s \cdot \psi \quad (14)$$

kde:

F_y	[N]	laterální síla kola na kolej
a, b	[m]	délka poloos kontaktní oblasti Hertzova tlaku
ψ	[rads ⁻¹]	spin – relativní úhlová rychlost dvojkolí vzhledem ke koleji
C_s	[Nm ⁻¹]	tangentní tuhost kontaktu

Model bude identifikován s reálným vozidlem pomocí parametrů dostupných v literatuře [49] a jeho správná funkce bude ověřena porovnáním simulovaných výsledků s výsledky z komplexního virtuálního modelu lokomotivy SJKV [50], který má k dispozici Univerzita Pardubice, se kterou spolupracujeme.

Do zjednodušeného modelu bude následně implementován model MR tlumiče včetně časové odezvy. Jako model MR tlumiče bude zvolen Bouc-Wen model [5]. F-v charakteristika, časová odezva a dynamický rozsah tlumiče budou nastavitelné a v dalších krocích bude studován jejich vliv na efektivitu použitého algoritmu. Výchozí parametry budou použity podle reálného MR tlumiče vyrobeného na ÚK [46].



Obr. 9.5 Bouc-Wen model tlumiče [5]

9.4 Ověření a optimalizace algoritmu a citlivostní analýza na různé vlivy

Následně budou navržené semi-aktivní algoritmy implementovány do virtuálního modelu a otestována jejich efektivita. Při výběru optimální varianty bude provedena citlivostní analýza následujících parametrů a vlivů:

Kinematické buzení modelu:

V modelu bude testována efektivita algoritmu na kolejích o různých parametrech, čemuž bude odpovídat i kinematické buzení. Bude simulována jak jízda po rovné trati, tak průjezd obloukem malého poloměru o parametrech uvedených v tabulce 1 [26]. Dále bude porovnávána jízda po ideální a po reálné trati. Parametry reálné trati poskytne Univerzita Pardubice

Řídící veličina

V zásadě je možné řídicí signál vzít buď z laterálního pohybu jednotlivých prvků, nebo z úhlového pohybu. Řídicími veličinami tedy mohou být laterální rychlosti a zrychlení skříně a podvozku nebo jejich úhlové rychlosti a zrychlení. Tyto dvě možnosti budou porovnány z hlediska efektivit řízení algoritmu.

F-v charakteristika tlumiče

Výchozí charakteristika bude použita reálného MR tlumiče vyrobeného na ÚK [46]. Následně bude modifikován její tvar – tedy sklon před a za kolenem a poloha kolene, přičemž bude studován vliv aplikovaných změn na efektivitu použitého algoritmu.

Časová odezva tlumiče

Velký vliv na efektivitu řídicí strategie bude mít jistě časová odezva tlumiče. V dalším postupu budu studovat tento vliv pro rozsah časové odezvy od 0 do 200 ms [19]. Především bude důležité chování pro časovou odezvu 1,5 ms, což odpovídá nejrychlejšímu tlumiči, který jsme schopni aktuálně vyrobit [46].

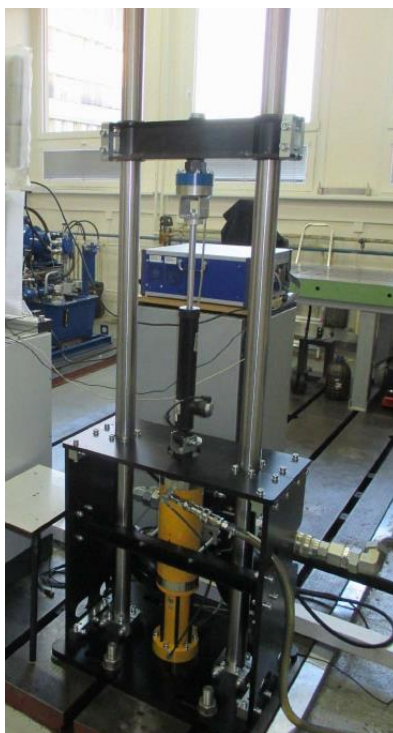
Dynamický rozsah tlumiče

Vliv dynamického rozsahu bude zkoumán v rozsahu od 2 do ∞ . Předpokládá se, že dynamický rozsah tlumiče bude mít na efektivitu řízení vliv větší než časová odezva.

Efektivita možných řešení bude vyhodnocena jednak po stránce opotřebení kolejnic – hodnotit se bude snížení laterálních sil kola na kolejnici, a jednak po stránce stability – hodnotit se bude snížení vibračí podvozku při vysoké rychlosti. Vedlejším kritériem bude pohodlí posádky – hodnotit se bude snížení vibračí skříňě. Ze simulovaných variant bude vybrána ta nejefektivnější.

9.5 Ověření na reálném tlumiči v HIL simulaci

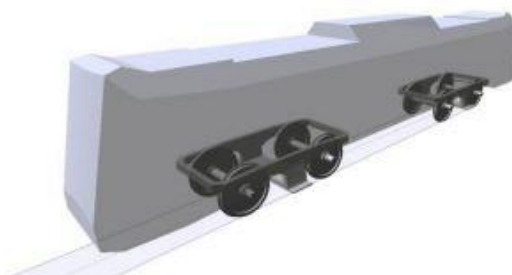
Důležitou součástí práce bude ověření řídicí strategie na reálném tlumiči pomocí simulace hardware in the loop [51]. K tomu bude použit reálný železniční tlumič vrtění vyvíjený souběžně v projektu MPO – Trio FV20456. Simulace HIL funguje tak, že systém v modelu vypočítá zdvih tlumiče a aktuátor tento zdvih nastaví. Přitom systém snímá sílu tlumiče, která vstupuje zpátky do výpočtu v modelu. Pro realizaci HILS systému bude počítač vybaven kartou dSpace [52] umožňující v reálném čase z modelu posílat řídicí signál pro zdvih tlumiče do aktuátoru, a naopak v reálném čase snímat sílu vyvozenou tlumičem. Jako aktuátor pro buzení reálného tlumiče bude použit hydraulický pulzátor INOVA (Obr. 9.6).



Obr. 9.6 Hydraulický pulzátor Inova

9.6 Ověření na komplexním modelu a na reálném tlumiči

Pro zvýšení relevance získaných výsledků bude na závěr nejefektivnější algoritmus implementován do komplexního modelu Dopravní fakulty univerzity Pardubice SJKV [50] a finálně ověřen. SJKV (Simulace Jízdy Kolejového Vozidla) je originální software pro realizaci simulačních výpočtů dynamických vlastností kolejových vozidel vyvíjený na UP v Object Pascal. Vychází z dynamiky tuhých těles, tyto tělesa jsou spolu vázány pružnými a tlumícími vazbami – multi-body. Jednotlivá tělesa dynamického modelu jsou popsána soustavou pohybových rovnic pro jednotlivé stupně volnosti. K numerickému řešení soustavy rovnic je použita metoda konečných diferencí. Kontakt dvojkolí a koleje je řešen pomocí Poláchova modelu [44]. V poslední verzi je software rozšířen o modul pro vizualizaci výsledků (Obr. 9.7).



Obr. 9.7 Vizualizace modelu lokomotivy v SJKV systému [53]

10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

	1. rok				2. rok				3. rok				4. rok			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studium semi-aktivních algoritmů	■	■	■	■												
Studium analytických modelů železničních vozidel	■	■	■	■												
Teoretický návrh algoritmů pro semi-aktivní řízení tlumiče			■	■	■											
Výběr vstupních/řídících veličin			■	■	■											
Tvorba 1DOF modelu				■	■											
Vliv tuhosti pružiny na udržení hmoty v nenulové poloze				■	■											
Vliv budící amplitudy na udržení hmoty v nenulové poloze				■	■											
Vliv budící amplitudy na udržení hmoty v nenulové poloze				■	■											
Popis limitů pro udržení hmoty v nenulové poloze					■	■	■									
Výběr vhodného zjednodušení modelu vlaku				■	■	■	■									
Tvorba virtuálního dynamického modelu vlaku				■	■	■	■									
Implementace Polachova modelu kolo/kolejnice					■	■	■	■								
Implementace matematického modelu rychlého MR tlumiče						■	■	■	■							
Verifikace zjednodušeného modelu na modelu kompletním (UP)							■	■	■	■						
Implementace navržených algoritmů do analytického modelu								■	■	■						
Test funkčnosti navržených algoritmů ve virtuálním prostředí									■	■	■					
Ověření eliminace vrtění										■	■					
Ověření snížení sil při průjezdu obloukem											■	■				
Citlivostní analýza způsobu buzení												■	■			
Citlivostní analýza řídící veličiny													■	■		
Citlivostní analýza F-v charakteristik tlumiče (tvar, sklon)														■	■	
Citlivostní analýza časové odezvy tlumiče															■	■
Citlivostní analýza dynamického rozsahu tlumiče																■
Výběr nejefektivnějšího řešení																■
Identifikace problémů a jejich řešení						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Realizace systému pro hardware in the loop simulaci													■	■	■	■
Návrh řídící smyčky pro HIL simulaci														■	■	■
Ověření algoritmů na reálném tlumiči pomocí HILS															■	■
Výběr nejefektivnějšího řešení																■
Demonstrace vlivu navržených algoritmů na tlumiči v HILS																■
Implementace algoritmu do komplexního modelu (UP)																■
Ověření funkčnosti algoritmu																■
Publikační aktivita						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dokončení práce																■

11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ

Se zvyšující se rychlostí železničních vozidel začínají být na tlumení kladeny požadavky nespílitelné s využitím pasivních tlumičů. Aby se dosáhlo zvýšení jízdní stability, používají se tlumiče s velmi silným tlumením. Ty ovšem velkou měrou přispívají k opotřebování kolejí, především v obloucích malých poloměrů. Typickým příkladem je S-oblouk s výhybkou. Údržba takto poškozených kolejí představuje podstatnou část finančních nákladů na celkovou údržbu tratí.

Semi-aktivní řízení tlumičů vrtění umožní vlakům zvyšovat cestovní rychlost díky vyšší stabilitě podvozků a zároveň sníží opotřebenění kolejí v obloucích, čímž náklady na údržbu tratí poklesnou. Výměna pasivního tlumiče za semi-aktivní MR tlumič bude proveditelná bez zásadních zásahů do konstrukce vlaku.

12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

Na tématu budu spolupracovat s následujícími institucemi:

Strojírna Oslavany

Spolupráce při návrhu matematického modelu tlumiče a při realizaci HILS.



Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

Ve spolupráci s dopravní fakultou bude vytvořen zjednodušený model železničního vozidla, bude provedena jeho identifikace a verifikace. Finální algoritmus bude ověřován na SJKV UP.



Univerzita
Pardubice
Dopravní fakulta
Jana Pernera

13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY

• Systém DSpace	130 000
• Další náklady na realizaci systému HIL	10 000
• Náklady spojené s účastí na konferencích	100 000
• Mzda řešitele	960 000
Celkem	1 200 000

Řešení disertační práce bude financováno z projektů školitele, především z MPO – Trio FV20456

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLADANÉHO VÝSLEDKU

Předpokládaný výsledek řešení diplomové práce jsou tři články v impaktovaných vědeckých časopisech, na tato témata:

- Limity sledování požadované polohy odpružené hmoty pomocí semi-aktivního řízení tlumiče
- Vliv semi-aktivního řízení tlumiče vrtění na vlastnosti vlakového podvozku při rychlé jízdě po rovné trati
- Vliv semi-aktivního řízení tlumiče vrtění na vlastnosti vlakového podvozku a na kontaktní síly kola/kolej při průjezdu vozidla obloukem malého poloměru

Předpokládaná periodika pro publikaci výsledků:

Vehicle system dynamics (IF=2,412)

Journal of Engineering Mechanics (IF=2,118)

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (IF=1,537)

Journal of Mechanical Science and Technology (IF=1,282)

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SŮRA, Jan. *České dráhy začaly jezdit s Vectrony, nejdříve na vnitrostátních vlacích.*
- [2] MICHÁLEK, Tomáš and Jaromír ZELEŇKA. The effect of spring pads in the secondary suspension of railway vehicles on bogie yaw resistance. *Vehicle System Dynamics*. 2015, vol. 53, no. 12, pp. 1952–1964. ISSN 17445159.
- [3] *Tlumiče pro budoucnost.* Available at: <http://www.st-os.cz/tlumice/>
- [4] BRAGHIN, F., F. RESTA and E. SABBIONI. A modal control for active/semi-active suspension systems. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*. 2007, no. Figure 1, pp. 1–6.
- [5] SPENCER, B.F. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, vol. 123, no. 3, pp. 230–238.
- [6] STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, Jakub ROUPEC and Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica*. 2015, vol. 50, no. 8, pp. 1949–1959. ISSN 15729648.
- [7] SOBOLEVSKA, Maryna and Igor TELYCHKO. Passive Safety of High-Speed Passenger Trains At Accident Collisions on 1520 Mm Gauge Railways. *Transport Problems*. 2017, vol. 12, no. 1, pp. 51–62. ISSN 1896-0596.
- [8] ALONSO, A., J. G. GIMÉNEZ and E. GOMEZ. Yaw damper modelling and its influence on railway dynamic stability. *Vehicle System Dynamics*. 2011, vol. 49, no. 9, pp. 1367–1387. ISSN 00423114.
- [9] MAZILU, Traian. An analysis of bogie hunting instability. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2009, vol. 71, no. 2, pp. 63–78. ISSN 14542358.
- [10] SONG, B.-Y.; GAO, F.; CHEN, J.-G.; YU, Q.-J.; BERTHIER, Y. Development of materials for high-speed train brake disks. *Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science*. 2004, vol. 25, no. 4, pp. 11–17.
- [11] NANKYO, Masanobu, Tadashi ISHIHARA and Hikaru INOOKA. Feedback Control of Braking Deceleration on Railway Vehicle. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2006, vol. 128, no. 2, p. 244. ISSN 00220434.
- [12] SÁNCHEZ-BORRÁS, Marta and Andrés LÓPEZ-PITA. Rail infrastructure charging systems for high-speed lines in Europe. *Transport Reviews*. 2011, vol. 31, no. 1, pp. 49–68. ISSN 01441647.
- [13] RAGHUNATHAN, Raghu S., H. D. KIM and T. SETOGUCHI. *Aerodynamics of high-speed railway train*. 2002. ISBN 8254820562.
- [14] BARON, Arturo, Michele MOSSI and Stefano SIBILLA. The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2001, vol. 89, no. 5, pp. 365–401. ISSN 01676105.
- [15] PERSSON, Rickard, Roger M. GOODALL and Kimiaki SASAKI. Carbody tilting - Technologies and benefits. *Vehicle System Dynamics*. 2009, vol. 47, no. 8, pp. 949–981. ISSN 00423114.
- [16] PUGI, Luca, ALLOTTA, BENEDETTO, Fabio BARTOLINI, M. RINCHI, Andrea COLLINA, Ferruccio RESTA, Giuseppe BUCCA, Alan FACCHINETTI and Federico CHELI. Design and development of an active suspension system for T-2006 Pantograph. *Mechatronix*. 2008, vol. 13, no. 5, pp. 548–557.
- [17] KLINGEL, W. Über den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*. 1883, vol. 20, no. 21, pp. 113–123.

- [18] LAU, Y. K. and W. H. LIAO. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005, vol. 219, no. 4, pp. 261–276. ISSN 09544097.
- [19] CODECÀ, Fabio, Sergio M. SAVARESI, Cristiano SPELTA, Mauro MONTIGLIO and Michele IELUZZI. Semiactive control of a secondary train suspension. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*. 2007. ISSN 2159-6255.
- [20] HUDHA, Khisbullah, M. Hafiz HARUN, M. Hanif HARUN and Hishamuddin JAMALUDDIN. Lateral suspension control of railway vehicle using semi-active magnetorheological damper. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*. 2011, no. Iv, pp. 728–733. ISSN 1931-0587.
- [21] SHEN, GANG and Roger M. GOODALL. Active Yaw Relaxation For Improved Bogie Performance. *Vehicle System Dynamics*. 1997, vol. 28, nos. 4–5, pp. 273–289. ISSN 0042-3114.
- [22] PÉREZ, J., J. M. BUSTURIA and Roger M. GOODALL. Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles. *Control Engineering Practice*. 2002, vol. 10, no. 9, pp. 1005–1012. ISSN 09670661.
- [23] MEI, T X, Z NAGY, Roger M. GOODALL and A H WICKENS. Mechatronic solutions for high-speed railway vehicles. *Control Engineering Practice*. 2002, vol. 10, pp. 1023–1028.
- [24] DUKKIPATI, R. V., S. Narayana SWAMY and M. O.M. OSMAN. Independently Rotating Wheel Systems for Railway Vehicles - A State of the Art Review. *Vehicle System Dynamics*. 1992, vol. 21, no. 1, pp. 297–330. ISSN 17445159.
- [25] FOTOUHI, Abbas and Aghil YOUSEFI-KOMA. Improve Hunting of a Railway Vehicle Using Semi-Active Primary Suspension. *Volume 3: Dynamic Systems and Controls, Symposium on Design and Analysis of Advanced Structures, and Tribology*. 2006, no. January, p. 557.
- [26] WEI, Xiukun, Ming ZHU and Limin JIA. A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers. *Vehicle System Dynamics*. 2016, vol. 54, no. 7, pp. 982–1003. ISSN 17445159.
- [27] DAHL, Philip. Solid Friction Damping of Mechanical Vibrations. *AIAA Journal*. 1976, vol. 14, no. 12, pp. 1675–1682.
- [28] Active steering bogie for railway vehicle using leverage. 2007.
- [29] *Bombardier equipment for urban vehicles*. 2019 [accessed. 20. May 2019]. Available at: <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/equipment/urban-equipment.html>
- [30] TRANSPORTATION, Bombardier. *FLEXX Tronic Technology*. 2008 [accessed. 21. May 2019]. Available at: https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-ECO4-FLEXX_Trionic-EN.pdf
- [31] BRAGHIN, Francesco, Stefano BRUNI and Ferruccio RESTA. Active yaw damper for the improvement of railway vehicle stability and curving performances: Simulations and experimental results. *Vehicle System Dynamics*. 2006, vol. 44, no. 11, pp. 857–869. ISSN 00423114.

- [32] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Yoshihiro SUDA, Yohei MICHITSUJI, Makoto KOMIYAMA, Naoki MIYAJIMA, Masuhisa TANIMOTO, Yasushi KISHIMOTO, Yoshi SATO and Takuji NAKAI. Curving performance evaluation for active-bogie-steering bogie with multibody dynamics simulation and experiment on test stand. *Vehicle System Dynamics*. 2008, vol. 46, no. SUPPL.1, pp. 191–199. ISSN 00423114.
- [33] SUN, Shuaishuai, Huaxia DENG, Weihua LI, Haiping DU, Yi Qing NI, Jin ZHANG and Jian YANG. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology. *Smart Materials and Structures*. 2013, vol. 22, no. 11. ISSN 09641726.
- [34] GOODALL, Roger M., C.P. WARD, D. PRANDI and S. BRUNI. Railway bogie stability control from secondary yaw actuators. *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks - Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics, IAVSD 2015*. 2016.
- [35] GAILE, Anton and Yuan LUE. Electro Hydraulic Actuation (EHA) systems for primary flight control, landing gear and other type of actuation. *AUS 2016 - 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems*. 2016, pp. 723–728.
- [36] FOTOUHI, Abbas and Aghil YOUSEFI-KOMA. Semi-active train bogie suspension using skyhook dampers. 2006, no. July.
- [37] RAMA SASTRY, D.V.A. Analysis of Train Suspension System Using MR dampers. 2016.
- [38] SHIN, Yu Jeong, Won Hee YOU, Hyun Moo HUR and Joon Hyuk PARK. Semi-active control to reduce carbody vibration of railway vehicle by using scaled roller rig. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012, vol. 26, no. 11, pp. 3423–3431. ISSN 1738494X.
- [39] KARNOPP, D., M. J. CROSBY and R. A. HARWOOD. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *Journal of Engineering for Industry*. 1974, vol. 96, no. 2, p. 619. ISSN 00220817.
- [40] PEARSON, J. T., Roger M. GOODALL, T. X. MEI and G. HIMMELSTEIN. Active stability control strategies for a high speed bogie. *Control Engineering Practice*. 2004, vol. 12, no. 11, pp. 1381–1391. ISSN 09670661.
- [41] DIANA, G., S. BRUNI, F. CHELI and F. RESTA. Active Control of the Running Behaviour of a Railway Vehicle: Stability and Curving Performances. *Vehicle System Dynamics*. 2002, vol. 37, no. sup1, pp. 157–170. ISSN 0042-3114.
- [42] WICKENS, A. H. The dynamic stability of railway vehicle wheelsets and bogies having profiled wheels. *International Journal of Solids and Structures*. 1965, vol. 1, no. 3, pp. 319–341. ISSN 00207683.
- [43] KALKER, J. J. A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact. *Vehicle System Dynamics*. 1982, vol. 11, no. 1, pp. 1–13.
- [44] POLACH, Oldrich. A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code. *Vehicle System Dynamics*. 2000, vol. 33, no. SUPPL., 2000, pp. 728–739.
- [45] CONDE, Alberto, Eduardo GÓMEZ and Jordi VIÑOLAS. Advances on railway yaw damper characterisation exposed to small displacements. *International Journal Heavy Vehicle Systems*. 2006, vol. 13, no. 4, pp. 263–280. ISSN 17415152.
- [46] KUBÍK, M., O. MACHÁČEK, Z. STRECKER, J. ROUPEC and I. MAZŮREK. Design and testing of magnetorheological valve with fast force response time and great dynamic force range. *Smart Materials and Structures*. 2017, vol. 26, no. 4. ISSN 1361665X.

- [47] YANG, G., B. F. SPENCER, J. D. CARLSON and M. K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. 2002, vol. 24, no. 3, pp. 309–323. ISSN 01410296.
- [48] ALLAUDDIN, Ansar, Deepak RAJENDRA and S N JALWADI. Performance Analysis of Skyhook , Groundhook and Hybrid Control Strategies on Semiactive Suspension System. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2014, no. Special Issue-3, pp. 7–10.
- [49] BAIASU, D., G. GHITA and I. SEBESAN. Control system with magnetorheological fluid device for mitigation of the railway vehicle hunting oscillations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013, vol. 412, no. 1. ISSN 17426596.
- [50] MICHÁLEK, T and J ZELENKA. Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements. *Applied and Computational Mechanics*. 2011, vol. 5, no. July, pp. 187–196.
- [51] PEIFFER, Alexander, Stefan STORM, Arno RÖDER, Rudolf MAIER and Paul Gerhard FRANK. Active vibration control for high speed train bogies. *Smart Materials and Structures*. 2005, vol. 14, no. 1, pp. 1–18. ISSN 09641726.
- [52] MISSELHORN, W. E., N. J. THERON and P. S. ELS. Investigation of hardware-in-the-loop for use in suspension development. *Vehicle System Dynamics*. 2006, vol. 44, no. 1, pp. 65–81. ISSN 00423114.
- [53] ZELENKA, J and M KOHOUT. Comparative simulations of guiding behavior of an electric locomotive. *ENGINEERING MECHANICS 2014*. 2014.

16 ŽIVOTOPIS



PERSONAL INFORMATION

Ing. Filip Jeniš

Slunečná 855, Jevíčko 569 42, Czech Republic

+420 731 749 313

Filip.Jenis@vutbr.cz

Date of birth 19/9/1993 | Nationality/ CZ

WORK EXPERIENCE

9/2018 - Present

Technician

Institute of Machine and Industrial design, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

9/2017 – 8/2018

Assistant (Part time job)

Institute of Machine and Industrial design, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

EDUCATION

7/2018 - Present

Doctoral study program Mechanical Engineering Design

Department of Condition Monitoring, Institute of Machine and Industrial design, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

6/2016 – 6/2018

Master's study program Mechanical Engineering Design

Institute of Machine and Industrial design, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

7/2013 – 6/2016

Bachelor study program Fundamentals of mechanical engineering

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

PROJECTS

2017 - Present

Electronic car suspension tester (TH02010663)

2017 - Present

Pneumobile Racing Team Brno – team leader

PERSONAL SKILLS

Mother tongue

Czech

Other tongues

English (B1)

PC programs

Matlab, Matlab Simulink, Inventor, Solidworks, ANSYS, Microsoft Office

MASTER THESIS

JENIŠ, F. *Electronic car suspension tester*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2018. 98 p. Supervisor of the master thesis doc. Ing. Ivan Mazúrek, CSc..

17 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Vysokorychlostní lokomotiva Vectron, vlajková loď firmy Siemens [1]	9
Obr. 2.1 Základní železniční odpružení a tlumiče [3]	11
Obr. 2.2 Schématické znázornění tlumících systémů	12
Obr. 2.3 Přenosová funkce pro různě tlumené systémy	12
Obr. 2.4 F-v křivky MR tlumiče (vlevo), časová odezva MR tlumiče (vpravo) [6]	13
Obr. 2.5 Deformační zóna lokomotivy [7].....	14
Obr. 2.6 Závislost laterální výchylky prvního dvojkolí na rychlosti vlaku [8].....	15
Obr. 2.7 Potrubí pro snížení tlakové vlny v tunelu [14].....	16
Obr. 2.8 Schéma naklánění vagonu [15]	17
Obr. 2.9 Poloha snímačů a pohonů pro aktivní řízení pantografu [16]	17
Obr. 2.10 Oscilace dvojkolí [9].....	18
Obr. 2.11 F-z a F-v charakteristiky Lauova MR tlumiče [18]	19
Obr. 2.12 Schématický diagram vagonu vybaveného MR tlumiči [18]	20
Obr. 2.13 Svislé kinematické buzení modelu [18]	20
Obr. 2.14 Laboratorní experimentální stand [19]	21
Obr. 2.15 Porovnání vlivu jednotlivých semi-aktivních strategií [19].....	21
Obr. 2.16 Dynamický model vlaku o 17 stupních volnosti [20]	23
Obr. 2.17 Umístění podélného aktuátoru [21].....	24
Obr. 2.18 Diagramy kontrolních strategií pro řízení bogie [22].....	25
Obr. 2.19 Schéma vagonu se dvěma bogie [22]	25
Obr. 2.20 Srovnání použitých strategií řízení [22].....	25
Obr. 2.21 IRW (vlevo) [24] a DSW (vpravo) dvojkolí [23].....	26
Obr. 2.22 Výsledky pro testované strategie [23]	26
Obr. 2.23 Aktivně řízené dvojkolí [25]	27
Obr. 2.24 Srovnání laterálních a podélných vibrací pro pasivní a adaptivní mód [25]	27
Obr. 2.25 Rezonanční módy dvojkolí [25]	28
Obr. 2.26 Dynamický model podvozku vlaku 17DOF [26]	28

Obr. 2.27 Výsledky semi-aktivního řízení dvojkolí pomocí skyhook [26]	29
Obr. 2.28 Pákový systém aktivního natáčení dvojkolí [28]	30
Obr. 2.29 Systém aktivního natáčení dvojkolí [29]	30
Obr. 2.30 Aktuátor místo tlumiče vrtění [31].....	31
Obr. 2.31 schéma kontrolní strategie pro průjezd obloukem [31].....	32
Obr. 2.32 Porovnání laterálních vibrací bogie při jízdě po přímé trati pro pasivní tlumič (a) a aktuátor (b) [31]	33
Obr. 2.33 Porovnání sil na první a druhé dvojkolí při jízdě obloukem pro pasivní tlumič (a) a aktuátor (b) [31]	33
Obr. 2.34 Síly působící na podvozek [32]	34
Obr. 2.35 Schéma výpočtu síly aktuátoru [32].....	34
Obr. 2.36 Laterální síly mezi kolem a kolejí [32].....	35
Obr. 2.37 Kritická rychlost pro tlumič OFF (vlevo), ON (vpravo) a semi-aktivní mód (dole) [33]	36
Obr. 2.38 Poloviční model vlaku [34].....	37
Obr. 2.39 schéma LQG řídicí strategie s použitím Kalmanových filtrů [34].....	37
Obr. 2.40 EHA aktuátor pro řízení podvozku vlaku [35]	38
Obr. 6.1 Myšlenková mapa	40
Obr. 9.1 Schématický postup řešení	48
Obr. 9.2 Schéma ideálního skyhooku a groundhooku [48]	49
Obr. 9.3 Model o 1. stupni volnosti	50
Obr. 9.4 Poloviční model železničního vozidla o 3. stupních volnosti	51
Obr. 9.5 Bouc-Wen model tlumiče [5].....	53
Obr. 9.6 Hydraulický pulzátor Inova	55
Obr. 9.7 Vizualizace modelu lokomotivy v SJKV systému [53]	55

18 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry projížděného oblouku.....	29
Tab. 2 Míra vibrací pro simulované typy tlumení [34].....	37
Tab. 3 Shrnutí článků	39