



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Využití aktivních prvků ve vypružení
a pojezdech kolejových vozidel

Utilization of active controlled elements in
suspensions and running gears of railway
vehicles

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2024

Lukáš ŠLOSÁR

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šlosár** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **509050**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití aktivních prvků ve vypružení a pojezdech kolejových vozidel

Název bakalářské práce anglicky:

Utilization of active controlled elements in suspensions and running gears of railway vehicles

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši literatury a dalších informačních zdrojů na téma využití aktivních prvků v pojezdech a vypružení kolejových vozidel. Zaměřte se na jednotlivé způsoby využití aktivních prvků a specifikujte jejich přínosy, principy použití a konkrétní technická řešení. Uveďte příklady využití aktivních prvků v pojezdech kolejových vozidel v běžném provozu i v rámci vývojových experimentů a testování.
2. Seznamte se s modelovým kladkovým stavem a experimentálním podvozkem v laboratořích U12120.
3. Vypracujte popis základních komponent kladkového stavu, popište způsob jeho ovládání a základní typy experimentů, které na něm lze provádět.
4. Popište systém aktivního natáčení dvojkolí experimentálního podvozku a proveďte měření demonstrující vliv aktivního natáčení dvojkolí na velikost vodících sil při průjezdu vozidla obloukem koleje.

Seznam doporučené literatury:

[1] Fu, B., Giossi, R.L., Persson, R. et al. Active suspension in railway vehicles: a literature survey. Rail. Eng. Science 28, 3–35 (2020). [2] Rickard Persson, Roger M. Goodall & Kimiaki Sasaki (2009) Carbody tilting – technologies and benefits, Vehicle System Dynamics, 47:8, 949-981. [3] online informační zdroje

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Kalivoda, Ph.D. Fakulta strojní

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Lukáš ŠLOSÁR

Název práce: Využití aktivních prvků ve vypružení a pojezdech kolejových vozidel

Anglický název: Utilization of active controlled elements in suspensions and running gears of railway vehicles

Rozsah práce:

- 47 stran
- 27 obrázků
- 6 tabulek
- 11 grafů

Akademický rok: 2023/2024

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D

Klíčová slova: kolejová vozidla, aktivní prvek, aktivní natáčení náprav, kladkový stav, vodící síla

Key words: Rail vehicles, active element, active steering bogie, roller rig, guiding force



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím aktivních prvků v pojezdech kolejových vozidel. Úvodní část je věnována rešerši, kde jsou popsány různé možnosti využití aktivních prvků. Druhá část se zaměřuje na technický popis kladkového stavu, na kterém byla provedena měření simulující jízdu v přímé trati a průjezd obloukem. Během simulace jízdy v přímé trati byla měřena příčná výchylka podvozku a při průjezdu obloukem byly měřeny vodící síly.

Abstract

This bachelor thesis deals with the utilization of active elements in running gears of railway vehicles railway vehicles. The introductory section focuses on a literature review describing various possibilities of utilizing active elements. The second part focuses on the technical description of the roller rig, on which measurements simulating travel on a straight track and passage through a curve were conducted. During the simulation of travel on a straight track, the lateral displacement of the bogie was measured, while during passage through a curve, guiding forces were measured.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou na téma: “ Využití aktivních prvků ve vypružení a pojezdech kolejových vozidel ” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



Poděkování

Chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kalivolovi, Ph.D za poskytnutí informací o problematice, pomoci při měření a rad při psaní práce.



Obsah

1 Úvod.....	8
2 Základní pojmy.....	9
2.1 Pojezd kolejového vozidla	9
2.2 Řídicí systém.....	9
3 Rozdělení aktivních prvků pojezdu kolejových vozidel	10
4 Aktivní prvky v primárním vypružení.....	11
4.1 Aktivní natáčení dvojkolí	11
4.2 Natáčení podélníků vůči příčniku	14
4.3 Aktivní řízení nezávisle otáčejících se kol	15
5 Aktivní prvky v sekundární vypružení.....	17
5.1 Náhrada tlumiče vrtivých pohybů aktuatorem	17
6 Technický popis kladkového stavu a podvozku	19
6.1 Řízení otáček a natáčení kladek	20
6.2 Naklápění kladkového stavu	23
6.3 Natáčení naprav podvozku do radiální polohy.....	25
7 Měřicí přístroje použité na podvozku a kladkovém stavu.....	27
7.1 Poloha	27
7.2 Síla.....	27
8 Měření	30
8.1 Simulace jízdy v prime trati	30
8.2 Simulace průjezdu obloukem	33
8.2.1 Natáčení dvojkolí	33
8.2.2 Měření vodících sil v oblouku	37
9 Závěr	41
10 Bibliografie.....	42
11 Seznam použitých zkratk	44
12 Seznam obrázků.....	45
13 Seznam grafů	46
14 Seznam tabulek	47



1 Úvod

Železnice, jako klíčový segment ve veřejné dopravě, prochází neustálým vývojem a inovacemi s cílem zvýšit efektivitu, bezpečnost a komfort cestujících. Jednou z mnoha oblastí modernizace kolejových vozidel je implementace aktivních prvků s cílem zlepšit jízdní vlastnosti vozu.

V následujících kapitolách budou popsány konkrétní technologie a systémy, které jsou v současné době testovány nebo využívány v kolejových vozidlech, a bude posuzováno, jakým způsobem přispívají k zvyšování bezpečnosti a snížení nakladů na údržbu vozidel a kolejnic.

V první části se rešerše zaměřuje na technologie a koncepty využívající aktivní prvky, které snižují kontaktní síly mezi kolem a kolejnici. To vede k zlepšení jízdních vlastností vozidla a zároveň snižují opotřebení kola a kolejnice, což prodlužují jejich životnost. V druhé části je popsán kladkový stav a podvozek, na kterém bylo provedeno několik měření. Jsou zde uvedeny všechny mechanismy, kterými je tento kladkový stav vybaven, aby co nejpřesněji simuloval jak jízdu po přímé trati, tak i průjezd obloukem. Poslední část je pak věnována samotným měřením.

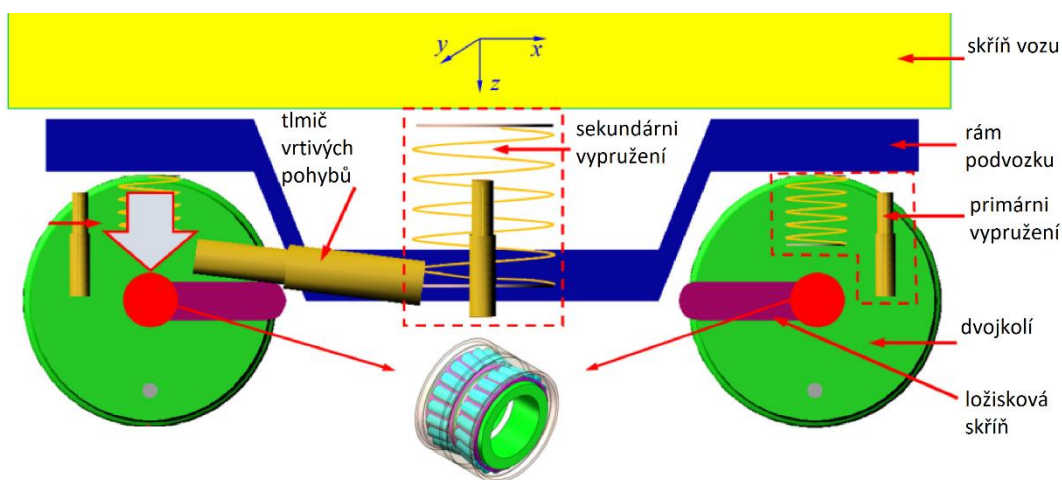


2 Základní pojmy

Pro lepší pochopení problematiky je potřeba vysvětlit některé základní pojmy.

2.1 Pojezd kolejového vozidla

Pojezd kolejového vozidla je sestava komponentů, které umožňují pohyb kolejového vozidla po kolejích. Schéma pojezdu kolejového vozidla je zobrazeno na Obrázek 1. Pojezd kolejového vozidla je složen z dvojkolí, rám podvozku, brzdy, pohon a odpružení. Nachází se mezi skříní vozidla a kolejemi.



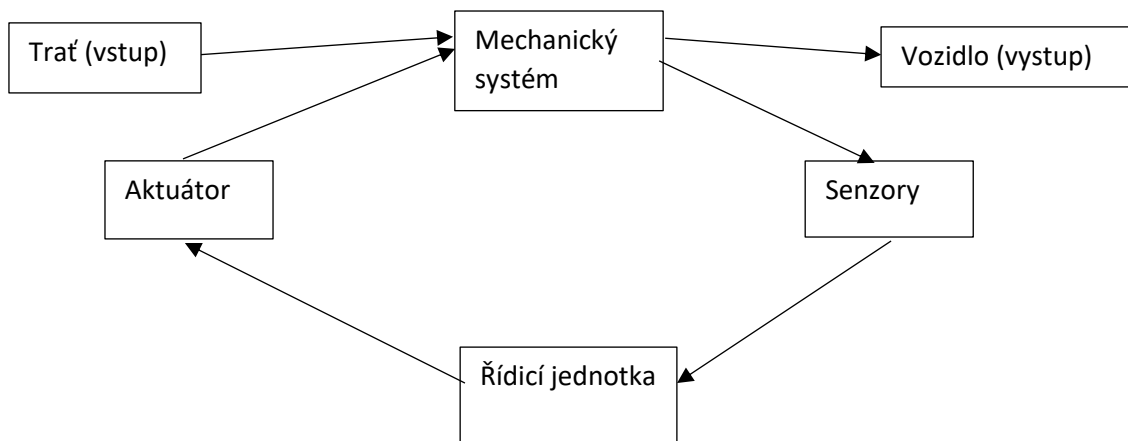
Obrázek 1 Pojezd kolejového vozidla [1]

Pojezdy kolejových vozidel mají obvykle dva stupně vypružení. Primární vypružení zahrnuje pružiny a tlumiče umístěné přímo mezi rámem podvozku a nápravami a slouží k absorbování přímých nárazů a vibrací způsobených nerovnostmi koleje. Sekundární vypružení nalezneme mezi skříní vozu a rámem podvozku a úkolem je minimalizovat přenos dynamických rázů, vzniklých při jízdě kolejového vozidla.

Existují různé způsoby využití aktivních prvků v pojezdu kolejového vozidla. Některé z nich budou popsány v následujících kapitolách. Pro správnou funkci všechny tyto prvky musí mít svůj řídicí systém.

2.2 Řídicí systém

Řídicí systém spojuje senzory, řídicí jednotku a aktuátory, aby efektivně řídil chování vozidla. Schéma řídicího systému je zobrazeno na Obrázek 2.



Obrázek 2 Schéma řídicího systému

Senzory jsou zařízení, která slouží k detekci nebo vnímání fyzikálních vlastností a převádějí tyto informace na elektrické signály nebo jiné formy, které jsou následně zpracovány.

Řídicí jednotka je navržena tak, aby přijímala vstupy ze senzorů, zpracovávala je a generovala odpovídající výstupy, které ovládají aktivní členy (aktuátory).

Aktuátor je zařízení, který slouží k vyvolání pohybu nebo provedení určité akce. Jeho hlavní funkcí je přeměnit vstupní signály, obvykle z elektrického zdroje, na konkrétní pohyb nebo úkon. Aktuátory můžeme klasifikovat na základě zdroje síly. Existují pneumatické, hydraulické, elektro-hydraulické nebo elektrické aktuátory.

3 Rozdělení aktivních prvků pojezdu kolejových vozidel

Aktivní prvky v pojezdu kolejového vozidla lze rozdělit podle těchto kritérií:

Podle umístění:

- a) Prvky v sekundárním vypružení

Tato kategorie aktivních prvků je umístěna mezi podvozkem a skříní vozu. Aktuátor v tomto případě může být orientován svisle s vypružením například pro optimalizaci svislé výchylky skříně vozu, příčně například pro naklápění vozové skříně nebo podélně například jako náhrada tlumičů vrtivých pohybů.

- b) Prvky v primárním vypružení

Aktivní prvky, které se nacházejí mezi nápravou a rámem podvozku. Zde můžeme zařadit například aktivní natáčení dvojkolí a aktivně řízená nezávisle se otáčející kola.



Podle cíle:

- a) Prvky pro zlepšení komfortu (např. vlaky s naklápěcí skříňi)
- b) Prvky pro zlepšení stability (např. náhrada tlumičů vrtivých pohybů aktuátorem)
- c) Prvky pro snížení opotřebení kol a kolejnic (např. aktivní natáčení dvojkolí)

4 Aktivní prvky v primárním vypružení

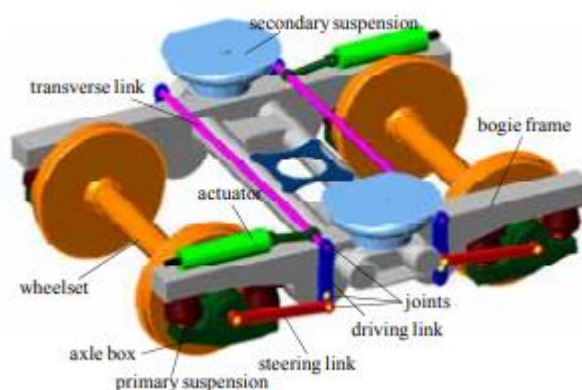
Aktivní prvky v primárním odpružení hrají důležitou roli v moderním vývoji kolejových vozidel, nabízející inovativní přístup k optimalizaci jízdních vlastností a zlepšení celkové efektivity provozu. Tato kapitola se zaměří na různé způsoby umístění aktivních prvků přímo v rámci primárního vypružení, kde mohou mít nejnápadnější dopad na stabilitu, opotřebení kolejnic a kol, emise hluku a vibrace.

4.1 Aktivní natáčení dvojkolí

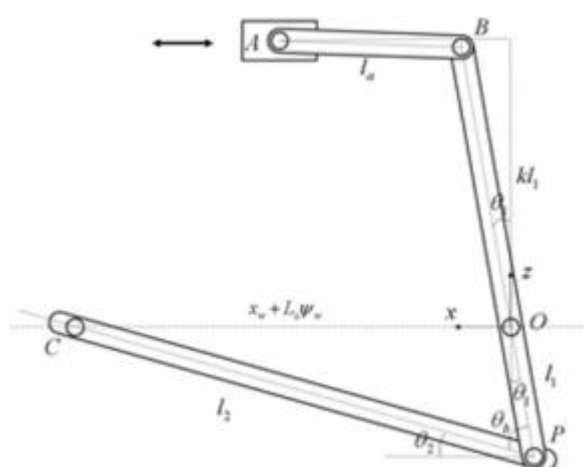
V dnešní době, kdy se neustále zdokonalují technologie kolejových vozidel, je stále více kladeno důrazu na zlepšení stability a bezpečnosti provozu na kolejích. Jedním z klíčových faktorů ovlivňujících tyto parametry je schopnost vozidel adaptovat se na různé jízdní podmínky a situace jako je například jízda v oblouku. Jednou z inovativních metod, která přináší významné vylepšení, je využití aktivních prvků pro natáčení dvojkolí do radiální polohy během jízdy.

Tradiční kolejová vozidla jsou vybavena tuze vedenými nápravami, což omezuje jejich schopnost přizpůsobit se obloukům. Toto omezení může mít za následek větší opotřebení kol a kolejnic a v extrémních případech i bezpečnostní rizika. Tato technologie nabízí různé koncepty, které umožňují řízení natáčení dvojkolí a optimalizaci jízdních vlastností. Je více možností, kam umístit aktivní člen, a také jaký počet aktivních členů je potřeba na dosažení uspokojivého výsledku.

Park a kolektiv [2] navrhli mechanismus pro natáčení dvojkolí pomocí dvou aktuátorů umístěných v podélném směru na rámu podvozku (viz. Obrázek 3). Díky pákovému principu (viz. Obrázek 4) je možné použít menší síly. Kinematické vazby jsou navrženy tak, aby přenášely vzájemně opačné síly na levém a pravém konci každého dvojkolí.



Obrázek 3 Podvozek EMU pro zadního elektrickou městskou jednotku vybavení aktivním natáčením dvojkolí [2]



Obrázek 4 Kinematická schéma pákového mechanismu [2]

Numerická simulace provedená v softwaru VI-Rail jasně ukázala výrazně menší opotřebení okolku kola, a to až o 80 %, v případě použití aktivního natáčení dvojkolí ve srovnání s pasivním podvozkem. Zajímavým faktem je, že největší míra opotřebení byla identifikována na předním vnějším kole zadního podvozku u aktivního podvozku, na rozdíl od pasivního podvozku, kde největší opotřebení bylo zaznamenáno na předním vnějším kole předního podvozku. Toto zjištění naznačuje, že aktivní natáčení dvojkolí může významně přispět k ochraně kol a kolejnic a snížení opotřebení, zejména na vnějších kolech podvozku, což má potenciál pozitivně ovlivnit náklady na údržbu a dlouhodobou spolehlivost kolejových vozidel.

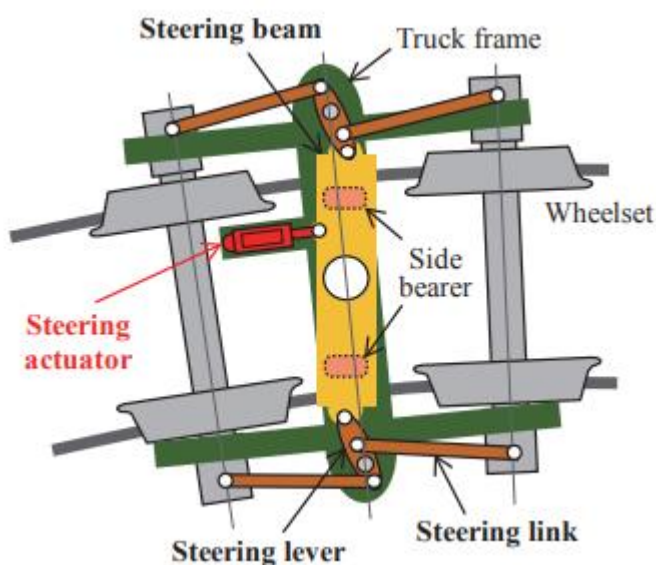
Pro ověření výsledků numerické simulace navrženého aktivního mechanismu řízení bylo vytvořeno zmenšené vozidlo v měřítku 1/5. Použití zmenšeného měřítka má výhodu snižování nákladů. Jedním z hlavních cílů testu je porovnat podvozek s aktivním natáčením dvojkolí a podvozek bez natáčení dvojkolí. Zmenšené vozidlo se skládá z trakčního podvozku, aktivního řídicího podvozku a skříně vozu. V experimentu byli měřeny příčné výchylky jednotlivých dvojkolí pomocí čtyř laserových snímačů posunu. Celková délka



koleje je 27 metrů, včetně přímých úseků a oblouků. Boční síly, které působí na dvojkolí v důsledku reakce s kolejnicí lze získat pomocí naměřených dat z tenzometrů na kolejnicích. Měření prokázalo snížení příčných sil přibližně o 70%.

Umehara a kolektiv [2] se zabývali vylepšením podvozku s nuceným natáčením náprav, který natáčí dvojkolí v závislosti na relativním úhlu natočení mezi skříní vozu a podvozkem (viz. Obrázek 5). Tato technologie dokáže výrazně snížit boční síly působící na kola při průjezdu obloukem. Problémem tohoto systému je však menší účinek snižování bočních sil na kola v úsecích, kde vůz přechází z přímé trati do oblouků a naopak. Proto byl podvozek vybaven jedním aktuátorem, který natáčí obě dvojkolí najednou.

Během experimentálních testů při průjezdu obloukem o poloměru 100 metrů a rychlosti 20 km/h bylo zjištěno výrazné snížení bočních sil v přechodnicovém úseku. Při použití maximální řídicí síly 55 kN bylo snížení laterálních sil oproti podvozku bez aktivního řízení 60%. Toto snížení bylo dosaženo řízením elektrohydraulického aktuátoru, který generoval řídicí sílu v souladu s otáčením vozu. Výsledky naznačují, že aplikace tohoto systému vedla k účinnému snížení bočních sil a optimalizaci průjezdu vozidla přechodnicovým úsekem oblouku.

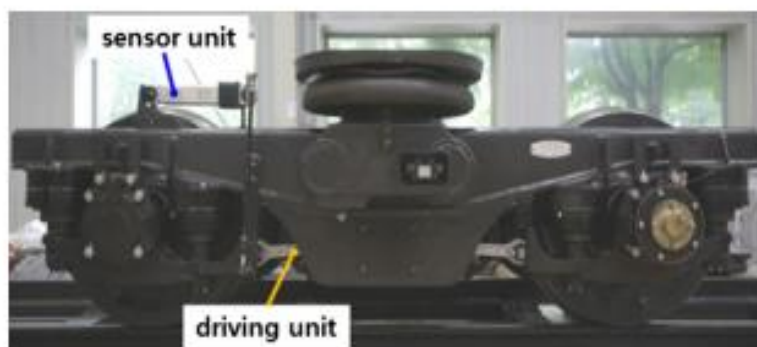


Obrázek 5 Aktivně řízení podvozek s jedním aktuátorem [3]

Další možností, jak dosáhnout natáčení dvojkolí, přišel Hur a kolektiv [3]. Na rozdíl od Umehara [4], který vyvinul elektro-hydraulický aktuátor, Hur využil elektro-mechanický typ aktuátoru. Autoři se věnují návrhu podvozku pro městský elektrický vůz (viz. Obrázek 6), který umožňuje aktivní natáčení svých dvojkolí při jízdě v oblouku. Ovládání obou dvojkolí



na podvozku je zajištěno dvěma aktuátory umístěnými podélně po stranách rámu podvozku. Také byly provedeny experimenty na skutečné trati. Třetí vůz šestivozové soupravy byl vybaven aktivními podvozky. Během experimentálních jízd bylo zaznamenáno, že úhel náběhu vozu do oblouku se snížil na čtvrtinu, což vedlo k výraznému snížení bočních sil působících na kola.

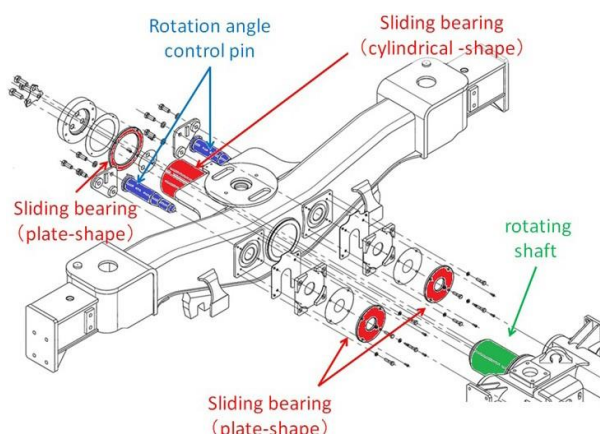


Obrázek 6 Prototyp podvozku s aktivním natáčením dvojkolí [4]

4.2 Natáčení podélníků vůči příčnicku

Při průjezdu vozidel zakřivenými úseky s výraznými nerovnostmi v obloucích, jako je například pokles vnější kolejnice při vyjíždění z oblouku, může dojít ke snížení zatížení kola na přední nápravě na vnější kolejnici. Přidáním velké boční síly působící v tomto okamžiku na podvozek kolo začne šplhat po okolku na kolejnici, což zvyšuje riziko vykolejení. [5]

Suzuki a kolektiv [5] vyvinuli nový podvozek, který ovládá pokles zatížení kol pomocí otáčecího mechanismu ve speciálním rámu. Nový podvozek má rám složený ze tří bloků (viz. Obrázek 7), které jsou spojeny rotačními vazbami, což umožňuje, aby se podvozek mohl přizpůsobit oblouku, a tím ovládat pokles zatížení kol. Do příčnicku byla umístěná řízená hřídel, která natáčí s podélníky.



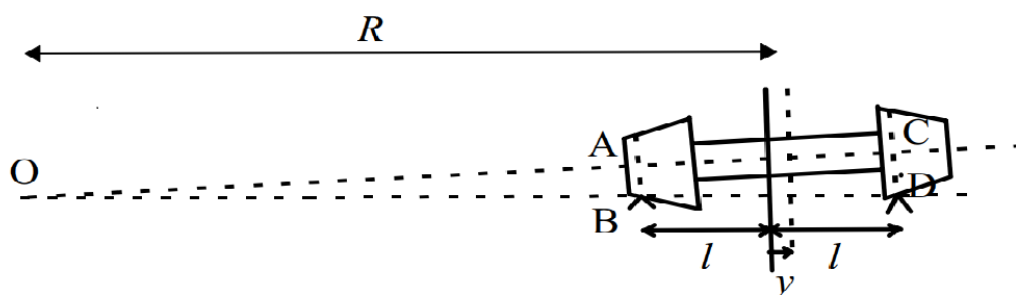
Obrázek 7 Schéma rotačního mechanismu [5]



Testy nového podvozku proběhly na testovacím okruhu o délce 3,2 km s šesti oblouky o poloměrech 120 až 700 m a přímým úsekem 1 km. Hlavním měřeným parametrem bylo zatížení kol předního dvojkolí. Výsledky ukázaly, že poměr boční složky k svislé složce síly vyvinutého podvozku byl vždy nižší než u normálního podvozku při každé z testovaných rychlostí.

4.3 Aktivní řízení nezávisle otáčejících se kol

Náprava s nezávisle otáčejícími se koly, na rozdíl od konvenčního dvojkolí nemá kola nalisované na ose. Díky tomu má konvenční dvojkolí schopnost se přirozeně centrovat. Konvenční dvojkolí je při průjezdu obloukem vytlačováno odstředivou silou a díky své kuželové geometrii kol má vnější kolo větší průměr než vnitřní kolo, což mu umožňuje projet delší dráhu kolem vnější kolejnice (viz. Obrázek 8). To se nazývá přirozený diferenciál. [6]

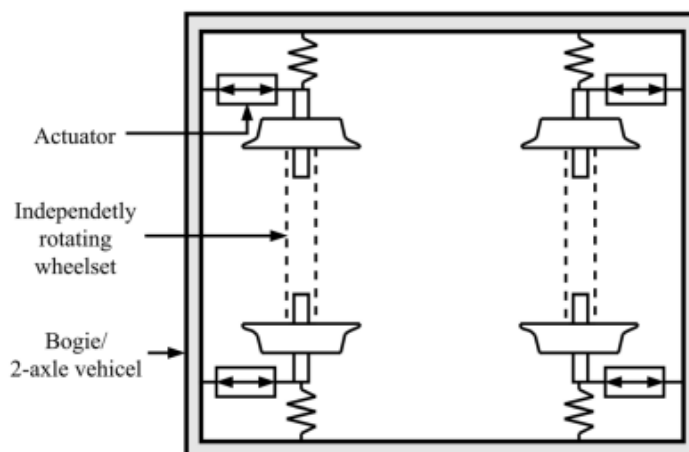


Obrázek 8 Přirozený diferenciál [6]

Aktivně řízená nezávisle se otáčející kola představují další možnost využití aktivních prvků v primárním vypružení. V porovnání s konvenčním dvojkolím je možné dosáhnout lepší stability vozu při vysokých rychlostech na přímé trati, kdy u podvozku s konvenčním dvojkolím dochází k vlnivému pohybu, což může způsobit vykolejení vlaku. Také díky aktivnímu řízení se sníží skluzová síla při průjezdu obloukem s malým poloměrem, kdy přirozený diferenciál není dostatečný.

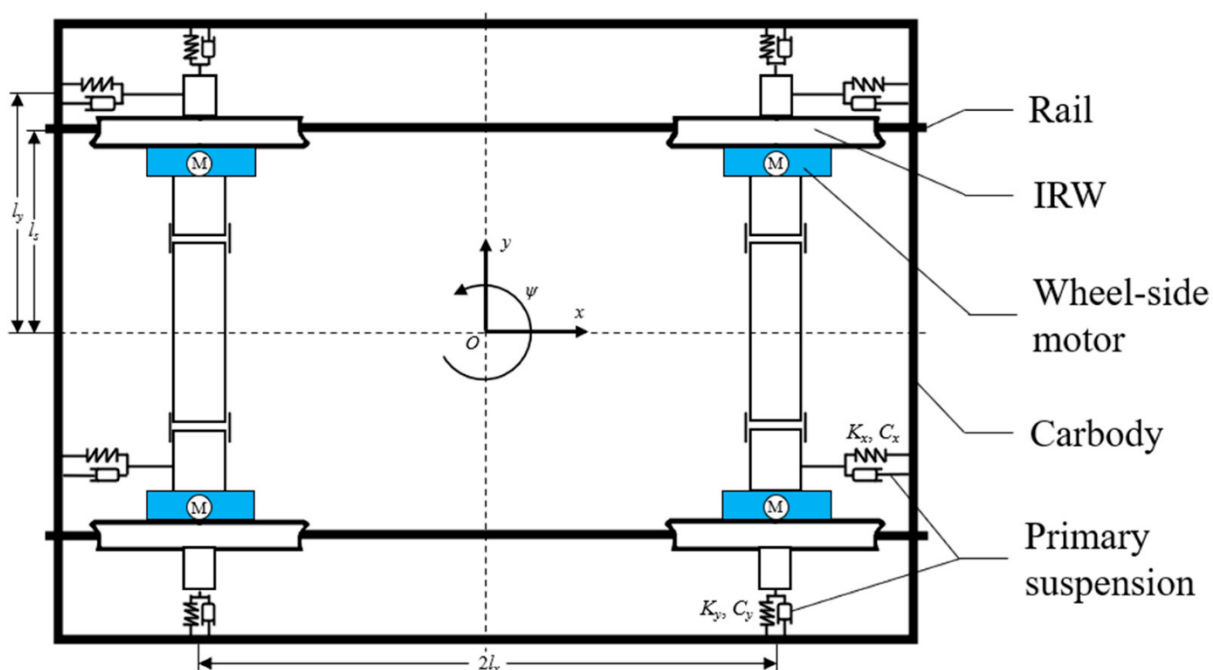
Toto řešení je zvláště užitečné v případě tramvajových vozidel, která často provozují v městském prostředí kde je velké množství oblouku s malými poloměry. Tramvaje jsou zpravidla nízkopodlažní vozidla, což znamená, že umožňují snadný nástup a výstup cestujících a jsou vhodné pro použití v městské dopravě. Nezávisle otáčející se kola umožňují, aby tramvaje byly nízkopodlažní po celé své délce, což zvyšuje pohodlí a bezbariérový přístup pro cestující.

Pérez a kolektiv [7] řešili problém stability použitím dvou lineárních aktuátorů (viz. Obrázek 9).



Obrázek 9 Použití lineárních aktuatoru [7]

Zhenggang a kolektiv [8] se ve svém výzkumu zabývali návrhem regulátoru pro řízení nezávisle otáčejících kol přivedením momentu na každé kolo (viz. Obrázek 10). Výsledky simulací i experimentů na zmenšeném modelu ukazují, že jejich řídicí strategie překonává předchozí metody. Díky zásahu aktivního řídicího systému Ape-X DDPG mají vozidla s nezávisle se otáčejícími koly lepší centrování v přímé trati a schopnost vedení v oblouku, přičemž se snižuje opotřebení kol a kolejnic.



Obrázek 10 Pohaněné nezávisle otočné kola [8]



5 Aktivní prvky v sekundární vypružení

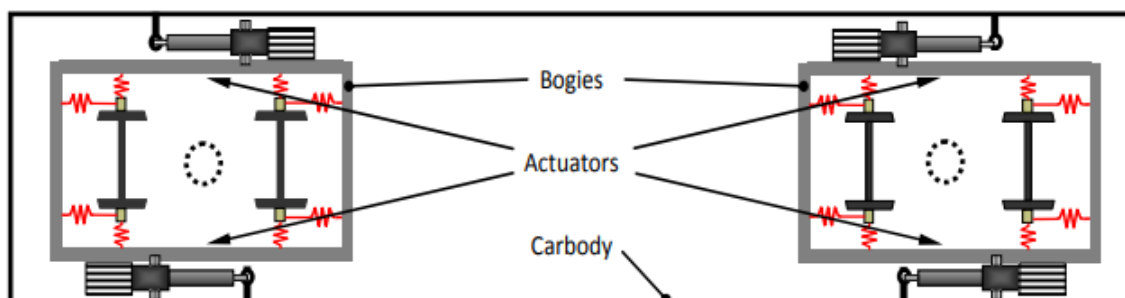
Sekundární odpružení, hraje důležitou roli v dosažení optimální stability a pohodlí v různých podmínkách jízdy. Přestože pasivní systémy často splňují většinu požadavků, aktivní prvky nabízejí možnost zlepšit jízdní vlastnosti, zejména při průjezdu obloukem. Jednou z možností je nahrazení klasických tlumičů vrtivých pohybů podvozku aktuátorem, což vede k lepšímu přizpůsobení vozidla podmínkám oblouku a zajištění stabilního pohybu na přímých úsecích trati.

5.1 Náhrada tlumiče vrtivých pohybu aktuátorem

Alfi a kolektiv [9] provedli numerickou simulaci, ve které porovnávali stabilitu vozu s podvozkem se schopností se aktivně natáčet oproti pasivnímu podvozku (viz. Obrázek 11). Autoři použili poddajné primární vypružení, aby dosáhli dobrého chování v oblouku. Výsledky naznačují, že navržený aktivní systém výrazně zlepšuje stabilitu vozidla na přímém úseku, překonávající i vozidlo s tuhým pasivním primárním vypružením. Při jízdě v oblouku byli vyhodnocovány tři parametry:

- **Koeficient vykolejení Y/Q:** Poměr boční složky Y k svisle složce Q síly v kontaktu kolo kolejnice, vyhodnocený pro vnější kolo přední nápravy.
- **Součet bočných sil Y:** Součet sil Y působících na vnitřních a vnějších kolech nápravy v zadním podvozku.
- **Třecí energie:** Množství třecí energie vytvářené při vjezdu do oblouku.

Přínosy aktivního řízení v obloucích jsou však pouze malé, což je očekávatelné, jelikož je řídicí strategie navržena především k zlepšení stability vozidla.



Obrázek 11 Schéma rozložení aktuátoru [9]

Michálek a kolektiv [10] se zabývali implementací aktivního tlumiče do sekundárního odpružení lokomotivy Škoda 109E. Na základě provedených simulací lze říci, že systém aktivních tlumičů se jeví jako účinný způsob, jak snížit kvazistatické vodící síly a tím i opotřebení kolejnic a kol v oblouku. Simulace průjezdu obloukem s poloměrem 300 m při



rychlosti 89,5 km/h ukázaly, že pro snížení kvazistatických vodících sil o 15 % ve srovnání s vozidlem, které bylo vybaveno hydraulickými tlumiči je potřeba použít aktuator s akční silou 15 kN. Aktivní tlumiče vyvinuté firmami Siemens a Liebherr, které jsou schopny generovat sílu v rozmezí 10 až 15 kN, jsou dostatečné pro toto snížení kvazistatických vodících sil.

V roce 2018 byly aktivní tlumiče od firmy Liebherr poprvé nasazeny na rakouských železnicích (ÖBB) ve spojení s lokomotivami Siemens Vectron (viz. Obrázek 12). Toto historické uvedení představovalo první sériové využití těchto systémů v lokomotivách. Testovací a zkušební jízdy následně úspěšně potvrdily funkčnost aktivních tlumičů v reálném provozu. [11]

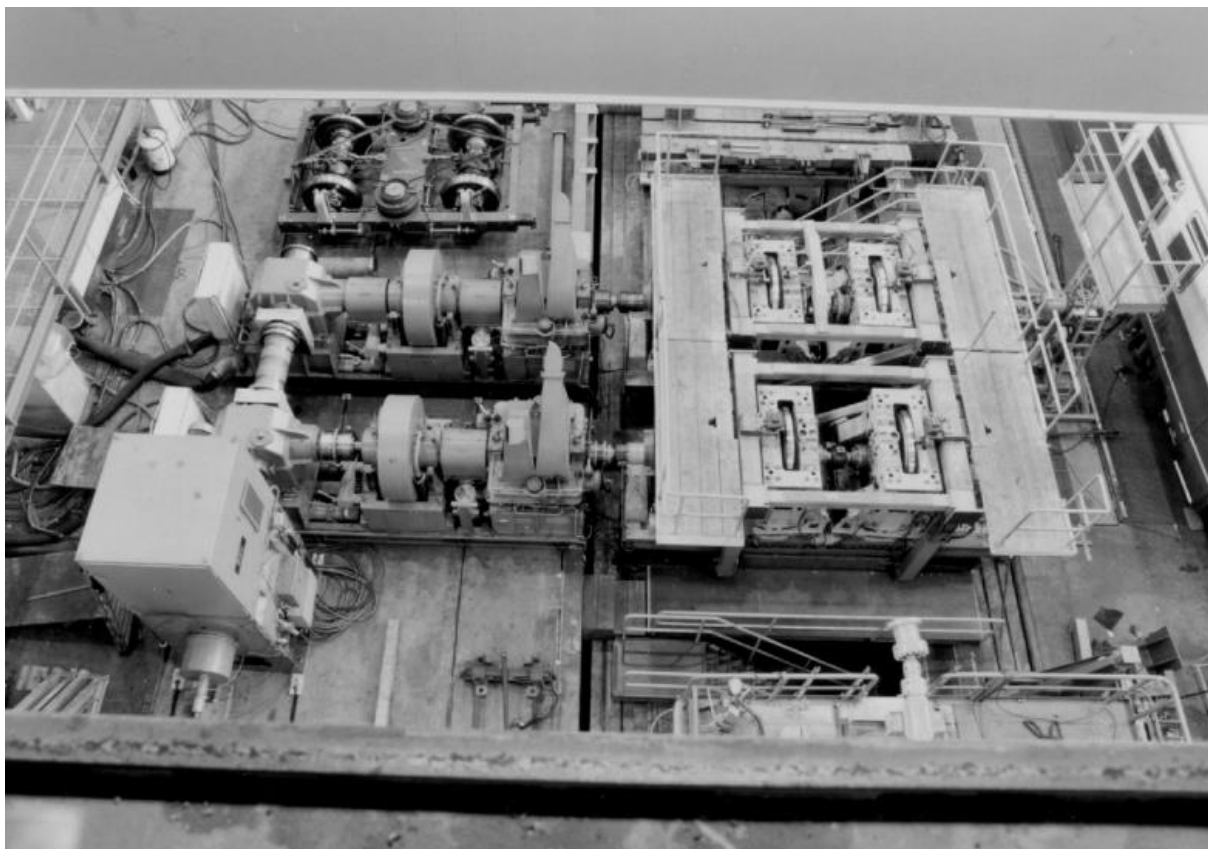


Obrázek 12 Nová lokomotiva Vectron ÖBB [11]



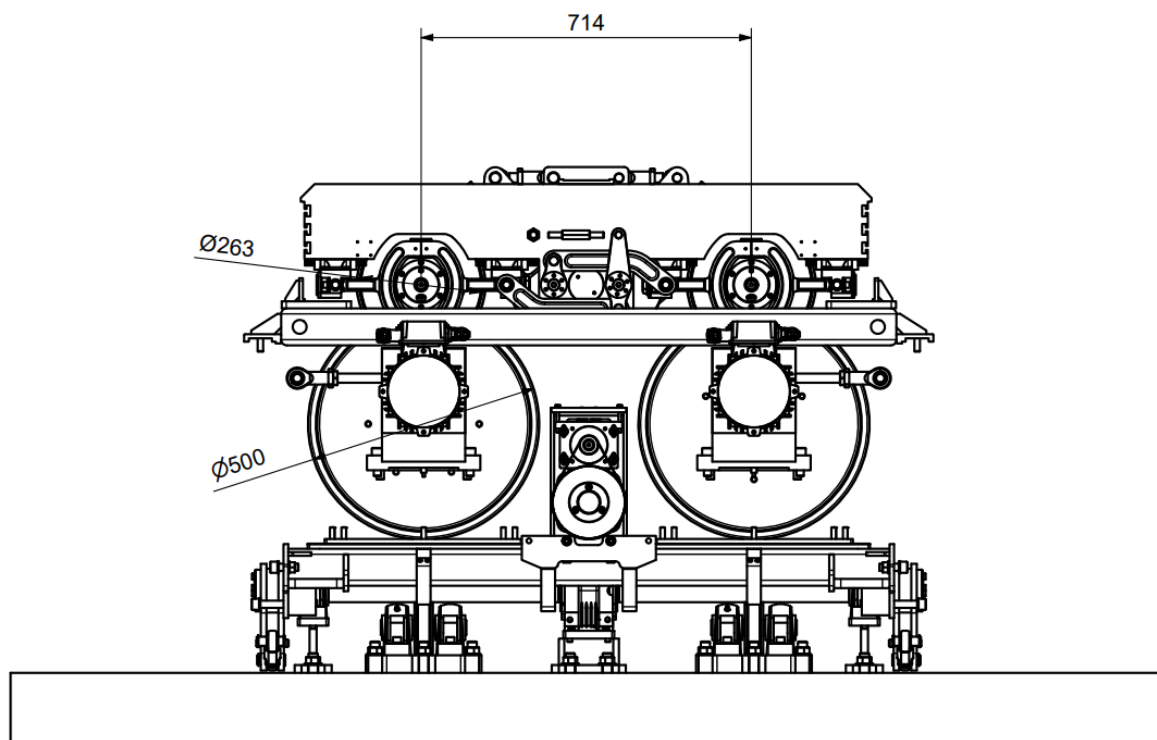
6 Technicky popis kladkového stavu a podvozku

Kladkový stav představuje experimentální zařízení, které významně přispívá k zkoumání a ověřování různých aspektů dynamiky kolejových vozidel. Hlavním principem kladkového stavu je nahrazení kolejnice rotujícími kladkami, na které se umístí podélně ukotvený podvozek nebo cele vozidlo. Existují dvě hlavní formy testovacích zařízení: pro vozidla skutečné velikosti (viz. Obrázek 13), kde rozměry a působící síly zůstávají nezměněny ve srovnání s reálem a zmenšené verze (viz. Obrázek 15), kde jsou rozměry a související parametry zmenšeny v konkrétním poměru.

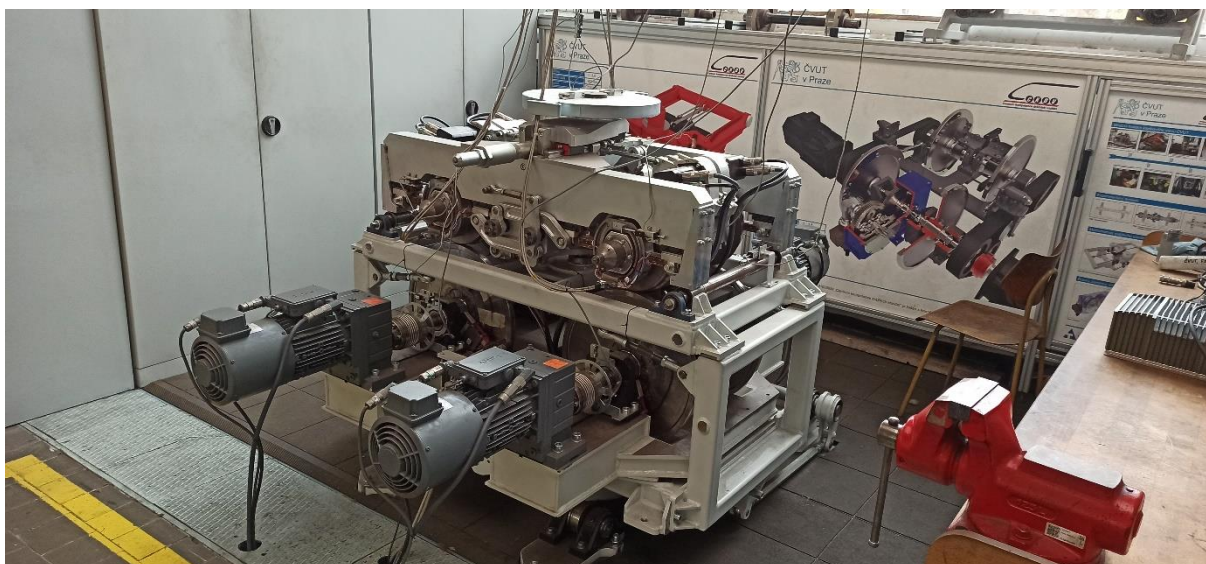


Obrázek 13 Kladkový stav skuteční velikosti v Mnichově [12].

Kladkový stav, který je umístěn na fakultě strojní ČVUT (viz. Obrázek 14 a Obrázek 15) a bude v této kapitole popsán, využijeme k simulaci průjezdu podvozku obloukem. Tento kladkový stav je v měřítku 1:3,5. Pro dosažení podmínek odpovídajících průjezdu obloukem, je kladkový stav vybaven mechanismy.



Obrázek 14 Skica hlavních rozměrů



Obrázek 15 Kladkový stav ČVUT

6.1 Řízení otáček a natáčení kladek

Vzhledem k tomu, že vnitřní kolo při přejezdu obloukem přejde menší vzdálenost než kolo vnější, každá kladka je vybavena vlastním třífázovým asynchronním elektromotorem s výkonem 7,5 kW. Tato konfigurace umožňuje nezávislé otáčení kladek. Otáčky kladek v přímé trati n se vypočítají pomocí Rovnice 1.



$$n = \frac{60 * v}{D_{kladky} * \pi} \quad (1)$$

Kde D_{kladky} je průměr kladky a v je rychlost vozu.

Pro simulaci jízdy v oblouku budou otáčky vnitřních kladek sníženy a otáčky vnějších kladek zvýšeny. Pro výpočet otáček se do Rovnice 1 za rychlost v dosadí rychlosti v_i a v_e , které se vypočítají pomocí podobnosti trojúhelníka (viz. Obrázek 16). Tyto rychlosti se spočítají pomocí Rovnice 2.

$$v_{e,i} = \frac{(R \pm s) * v}{R} \quad (2)$$

R je poloměr oblouku a $2s$ je příčná vzdálenost dotykových bodů kolo - kolejnice.

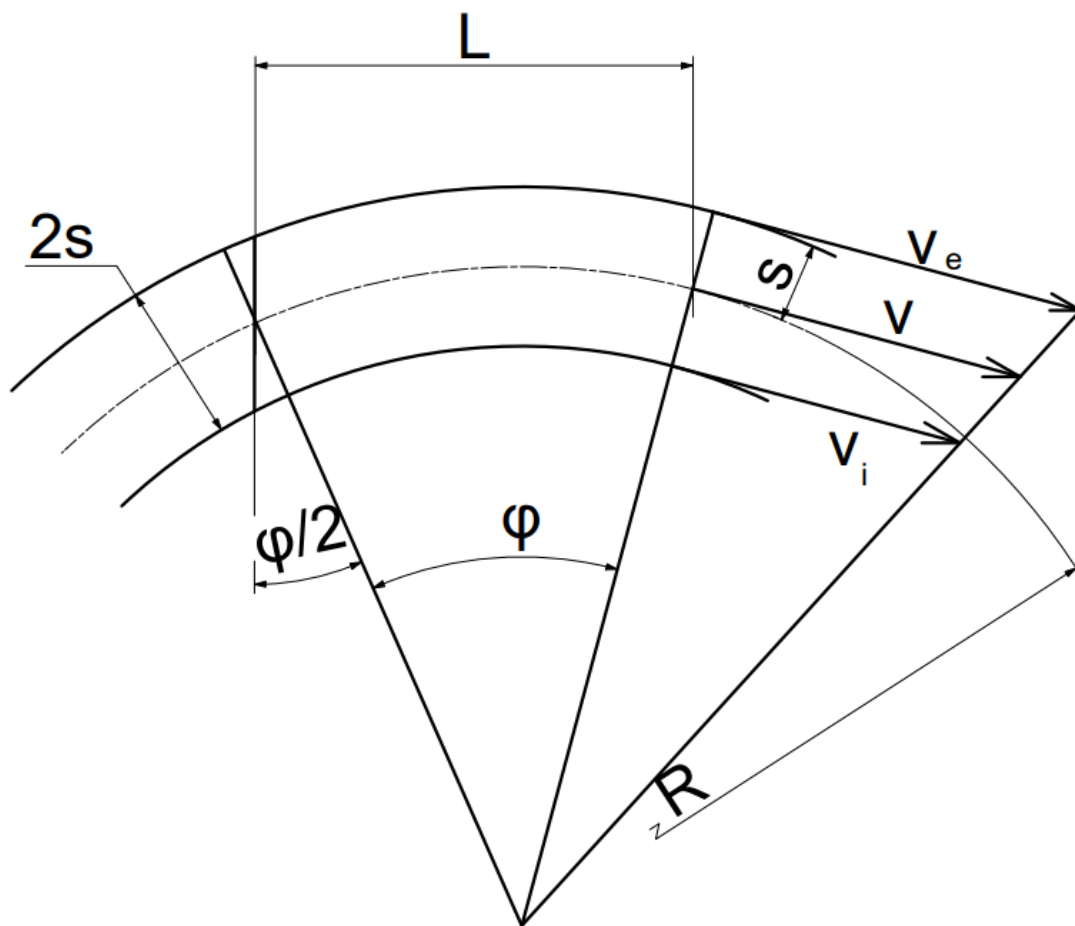
Pro správnou simulaci průjezdu obloukem je nezbytné nastavit kladky tak, aby byly tečně s myšlenými skutečnými kolejnicemi. K tomu účelu je kladkový stav vybaven mechanismem (viz. Obrázek 17 a Obrázek 18). Synchronní servomotor přes řemenový převod otáčí matici a ta pomocí pohybového šroubu pohybuje táhlem a tímto způsobem otáčí kladkami kolem čepů. Potřebný úhel natočení kladek $\frac{\varphi}{2}$, jak je znázorněn na Obrázek 16, se vypočítá pomocí Rovnice 3 a následně z Rovnice 4 získáme úhel pootočení servomotoru γ_1 potřebný k dosažení tohoto úhlu.

$$\frac{\varphi}{2} = \arctan\left(\frac{0,5 * L}{R}\right) \quad (3)$$

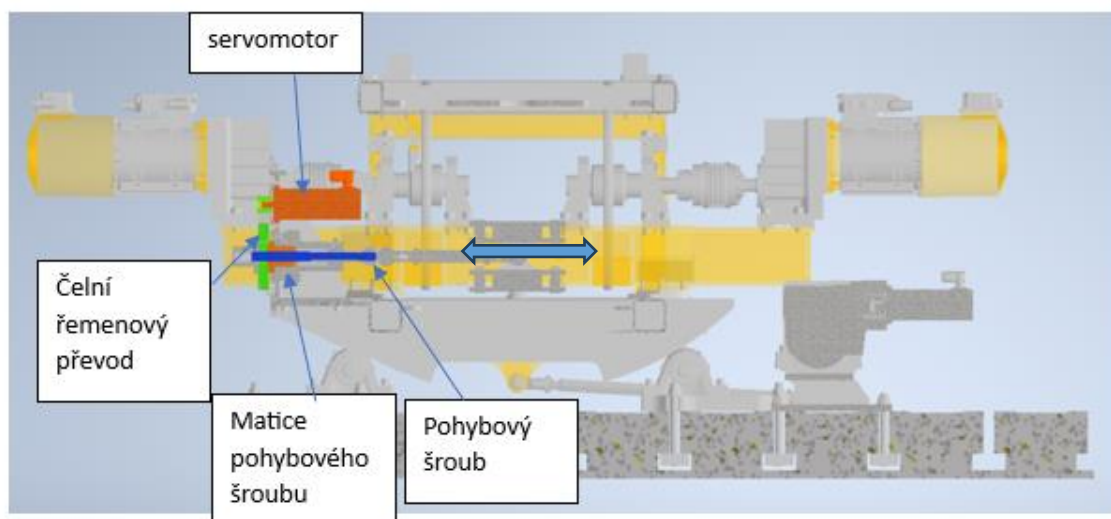
Kde L je rozvor podvozku a R je poloměr oblouku.

$$\gamma_1 = \frac{i_1 * l * \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) * 360}{P} \quad (4)$$

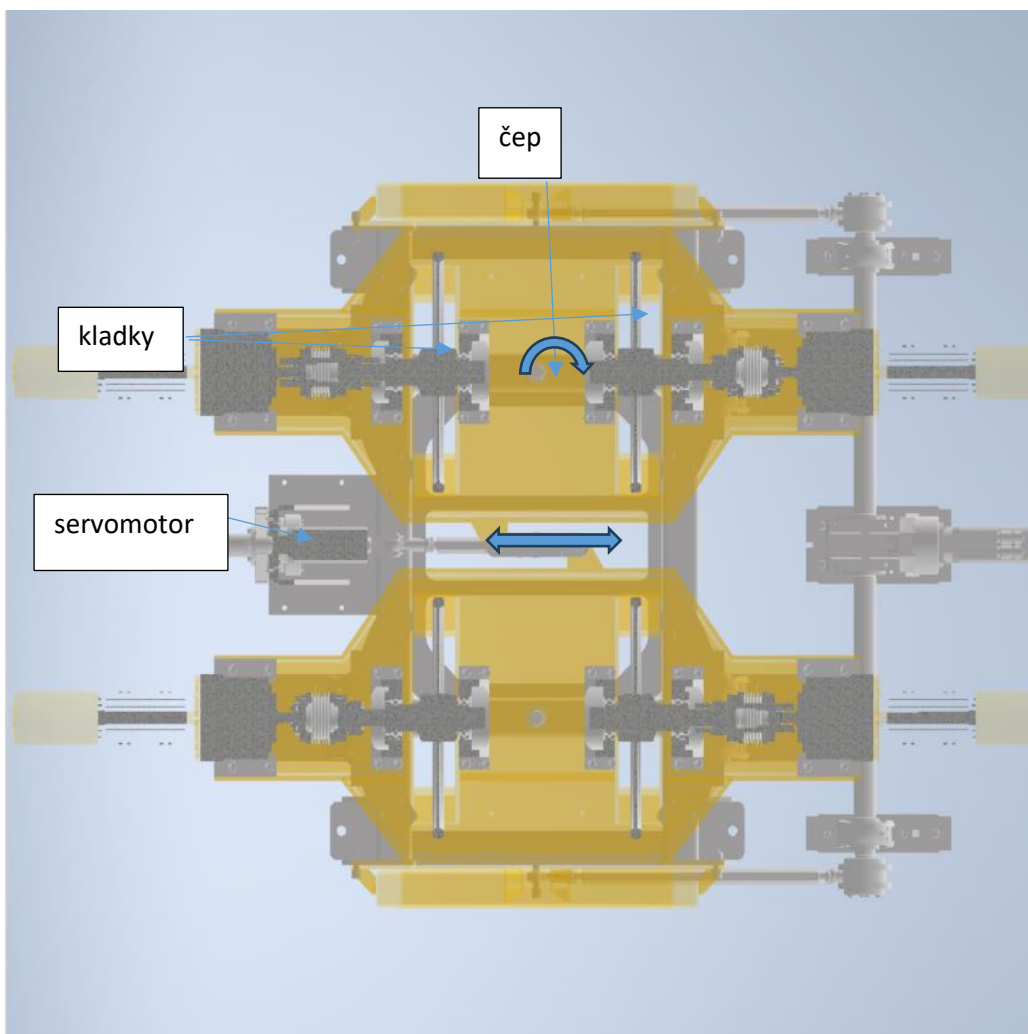
Kde i_1 je řemenový převod, l je vzdálenost čepu od táhla, která se rovná 357 mm a P je rozteč závitu pohybového šroubu.



Obrázek 16 Schéma pro výpočet uhlu natočení kladek v oblouku



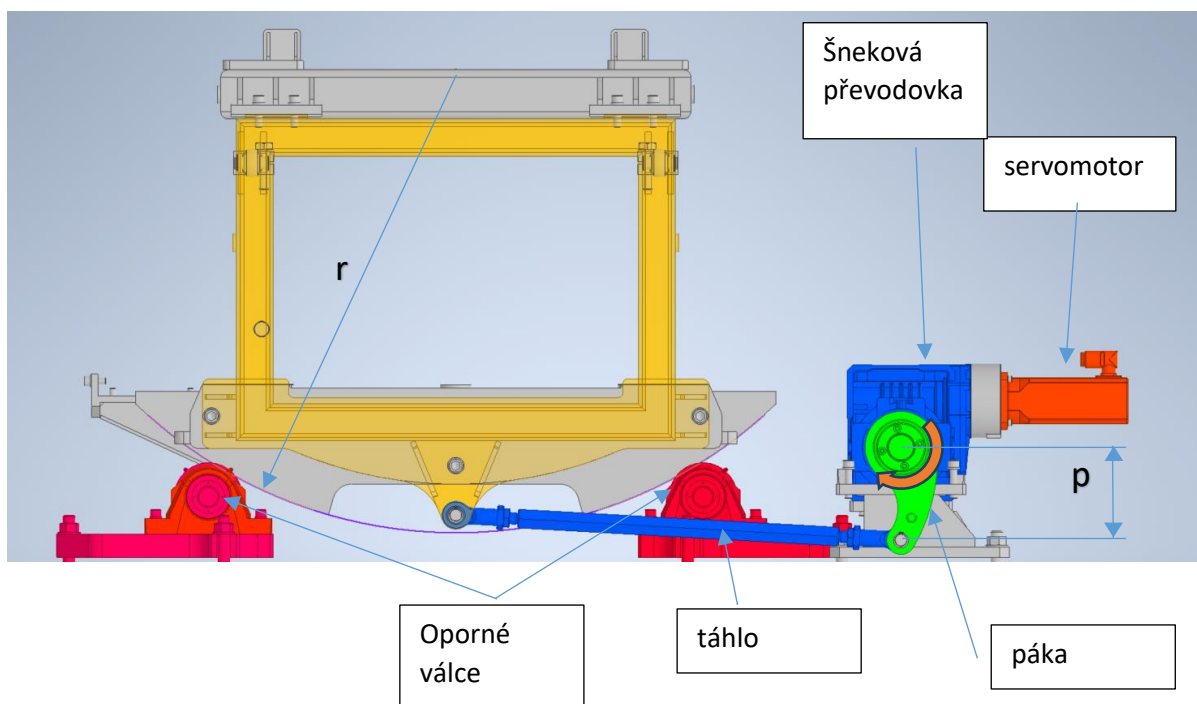
Obrázek 17 Mechanismus pro natáčení kladek



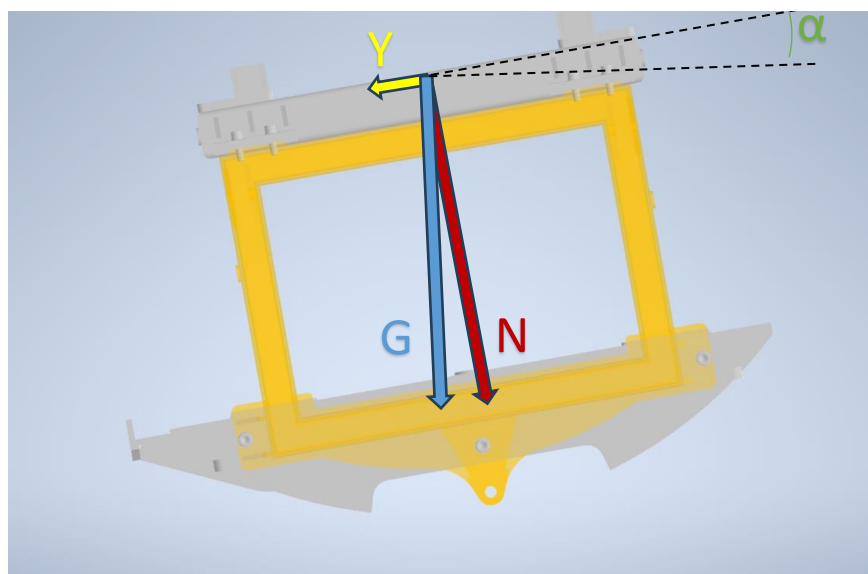
Obrázek 18 Mechanismus pro natáčení kladek

6.2 Naklápění kladkového stavu

Pro simulaci příčného zrychlení má kladkový stav schopnost se při průjezdu obloukem naklopit. Mechanismus (viz Obrázek 19), pomocí kterého se provádí toto natočení, se skládá ze synchronního servomotoru, který otáčí hřídelí přes šnekovou převodovku, a ta přes páku posouvá táhlo. Kladkový stav je umístěn na válcích a plochách, které mají tvar části kružnice. Tímto způsobem rozložíme tíhovou sílu (G) na normálovou (N) a odstředivou (Y) složku (viz. Obrázek 20).



Obrázek 19 Mechanismus pro natáčení kladkového stavu



Obrázek 20 Rozklad sil

Složka odstředivý síly Y se dopočte pomocí Rovnice 5.

$$Y = G * \sin(\alpha) \quad (5)$$

Potřebný uhel γ_2 servomotoru pro požadovaný uhel se určí z Rovnice 6

$$\gamma_2 = i_{\text{šnek}} * \text{asin} \frac{\tan \alpha * r}{p} \quad (6)$$

Kde $i_{\text{šnek}}$ je převod šnekový převodovky a rozměry r, α a p (viz. Obrázek 20).



6.3 Natáčení naprav podvozku do radiální polohy

Podvozek, umístění na kladkovém stavu je vybaven aktivním řízením natáčení dvojkolí. Realizováno je pomocí dvou synchronních servomotorů s jmenovitým momentem 3 Nm. Jeden servomotor pro jednu nápravu, který přes řemenový převod otáčí hřídel. Ta pak přes páku táhne za táhlo, které posouvá ložiskovými komorami (viz. Obrázek 21 a Obrázek 22). Potřebný úhel natočení dvojkolí do radiální polohy se vypočítá stejným způsobem jako pro natočení kladek z Rovnice 3, a následně se pomocí tohoto výpočtu určí potřebné posunutí ložiskových komor x podle Rovnice 7.

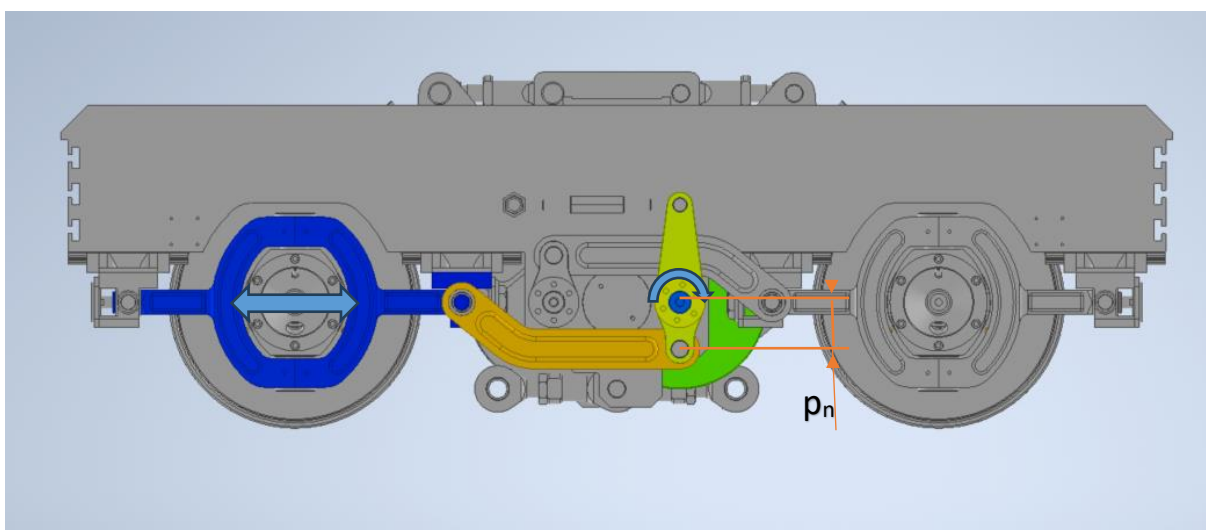
$$x = \frac{a}{2} * \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

Kde a je vzdálenost ložiskových komor.

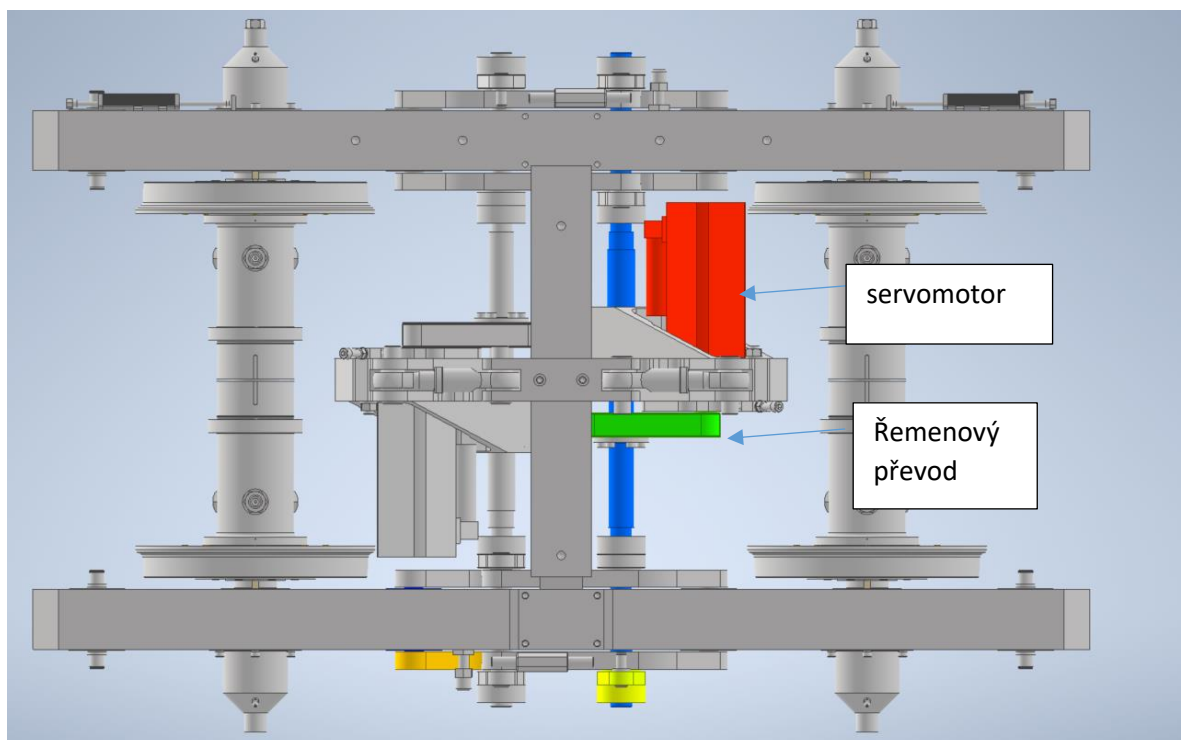
Pomocí vypočtené vzdálenosti x se následně vypočítá potřebný úhel pootočení servomotoru podle Rovnice 8.

$$\delta = i_n * \operatorname{atan}\left(\frac{x}{p_n}\right) \quad (8)$$

Kde p_n je vzdálenost hřídele od táhla (viz. Obrázek 21), a i_n je převod řemenového převodu

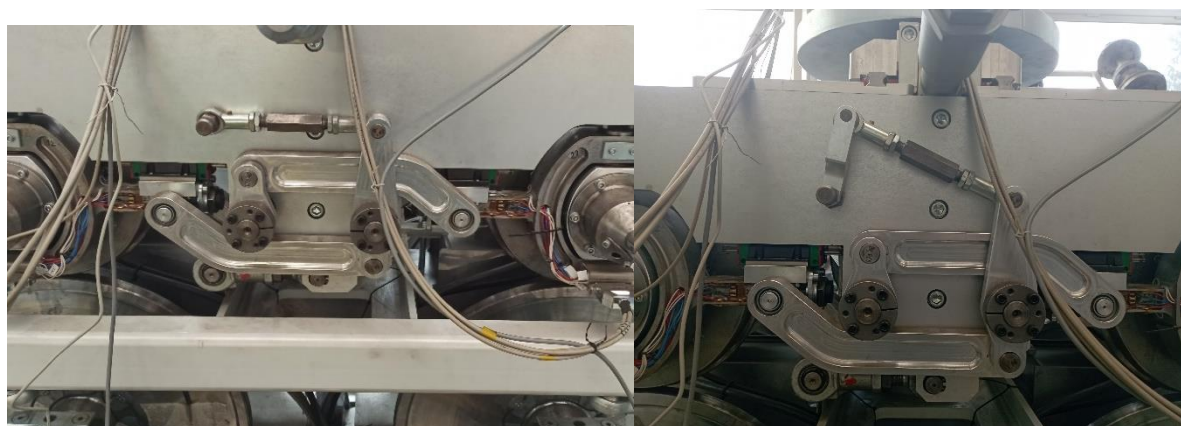


Obrázek 21 Schéma mechanismu pro natáčení dvojkolí (pohled z boku)



Obrázek 22 Schéma mechanismu pro natáčení dvojkolí (pohled shora)

Tento podvozek má schopnost fungovat jak jako podvozek s aktivním řízením natočení dvojkolí, tak i jako konvenční podvozek s tuze vedenými nápravami. Proto, aby nápravy byly v poloze, která přesně odpovídá konvenčnímu podvozku, musí být obě páky zajištěny o rám podvozku pomocí táhla. (viz. Obrázek 23). Podvozek má oba režimy proto, aby bylo možné porovnat výsledky měření, a to podle toho, o kolik se síly v kontaktu mezi kolem a kolejnici změny při použití aktivního řízení.



Obrázek 23 Porovnání mezi variantami pro pevné nápravy (vlevo) a pro natáčecí nápravy (vpravo)

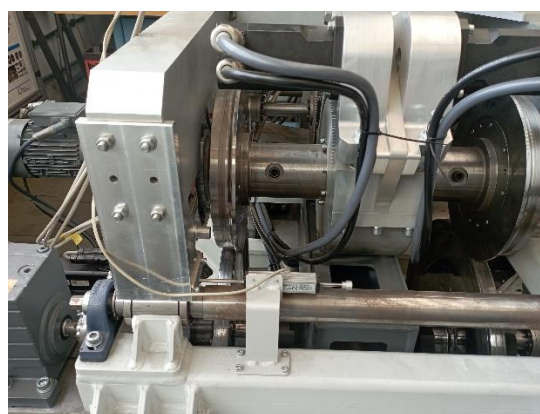
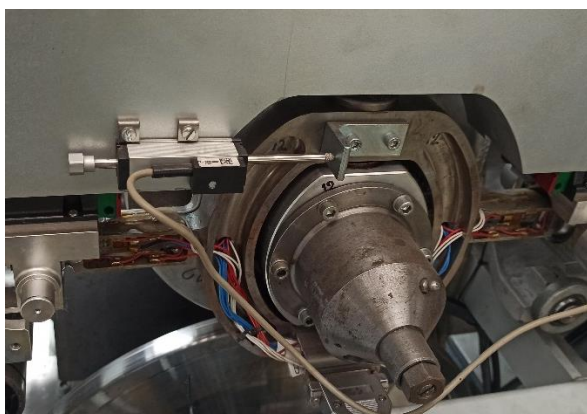


7 Měřicí přístroje použité na podvozku a kladkovém stavu

Měřicí přístroje jsou nezbytnou součástí kladkového stavu. Jejich správné využití a aplikace umožňují získání důležitých dat a informací o chování podvozku a kladkového stavu. Sensory, které jsou součástí tohoto měřicího zařízení, poskytují data potřebná pro vyhodnocování výsledků, anebo také slouží k monitorování správného chodu kladkového stavu. V této části budou popsány měřicí přístroje použité na kladkovém stavu, které umožňují monitorování pohybu, polohy, síly a dalších důležitých parametrů.

7.1 Poloha

Pro měření polohy jsou používány lineární potenciometry Novotechnik TR, které fungují na principu změny elektrického odporu při posunutí jezdce. Pomocí těchto potenciometrů s rozsahem 50 mm jsou měřena posunutí ložiskových komor při natočení dvojkolí a pomocí potenciometru s rozsahem 25 mm se měří příčné výchylky podvozku vůči kladkovému stavu. Příklady použití potenciometru (viz. Obrázek 24).



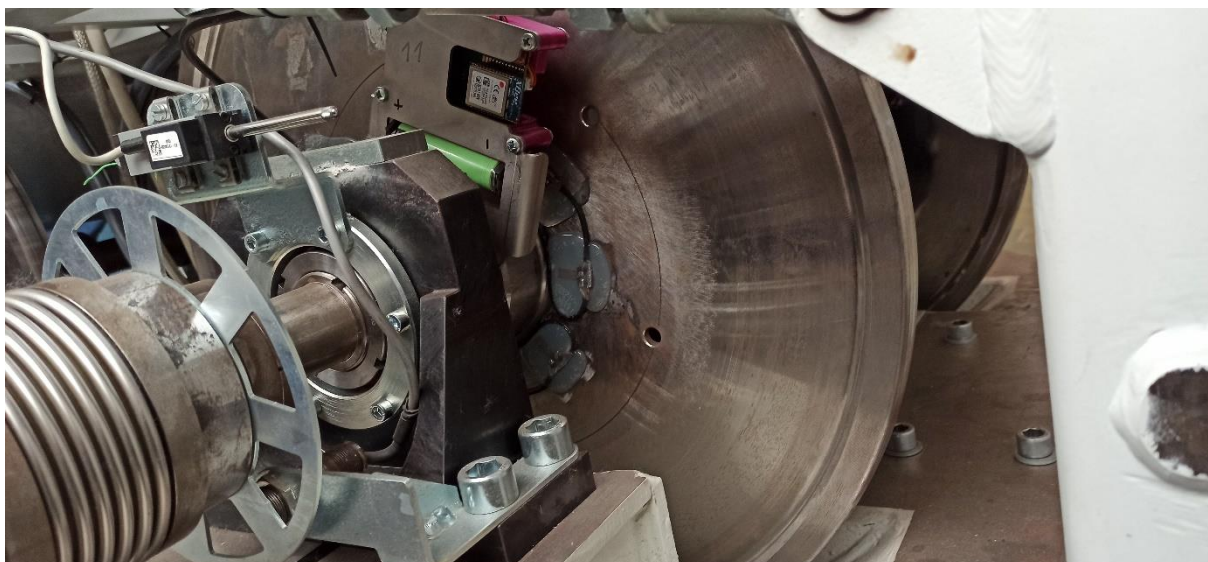
Obrázek 24 Měření posunutí ložiskových komor (vlevo), příčné výchylky podvozku (vpravo)

7.2 Síla

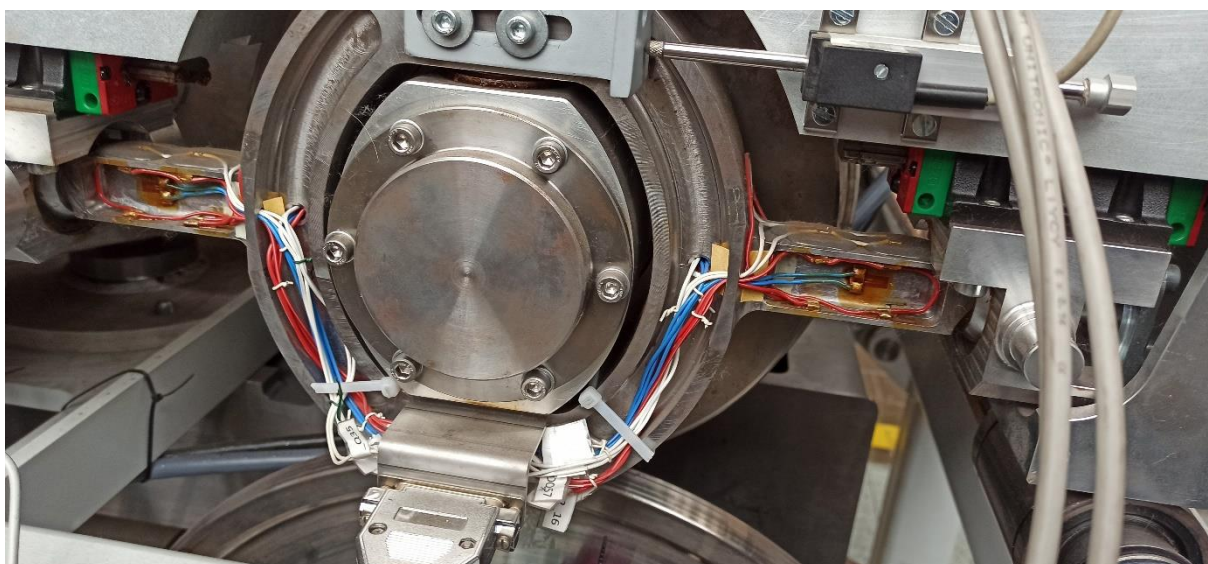
Síly v kontaktu mezi kladkou a kolem se měří pomocí deformace kladky, která je měřena pomocí tenzometrů zapojených v plném můstku. Jelikož se kladka otáčí, signál je do počítače přenášen bezdrátově. Řešení umístění tenzometru na kladkách a zařízení pro bezdrátový přenos dat do PC je na Obrázek 25.

Pro měření sil na ložiscích nápravy jsou zapojeny tenzometry v můstku a umístěny tak, aby mohly měřit sílu ve třech osách (viz. Obrázek 27 a Obrázek 27).

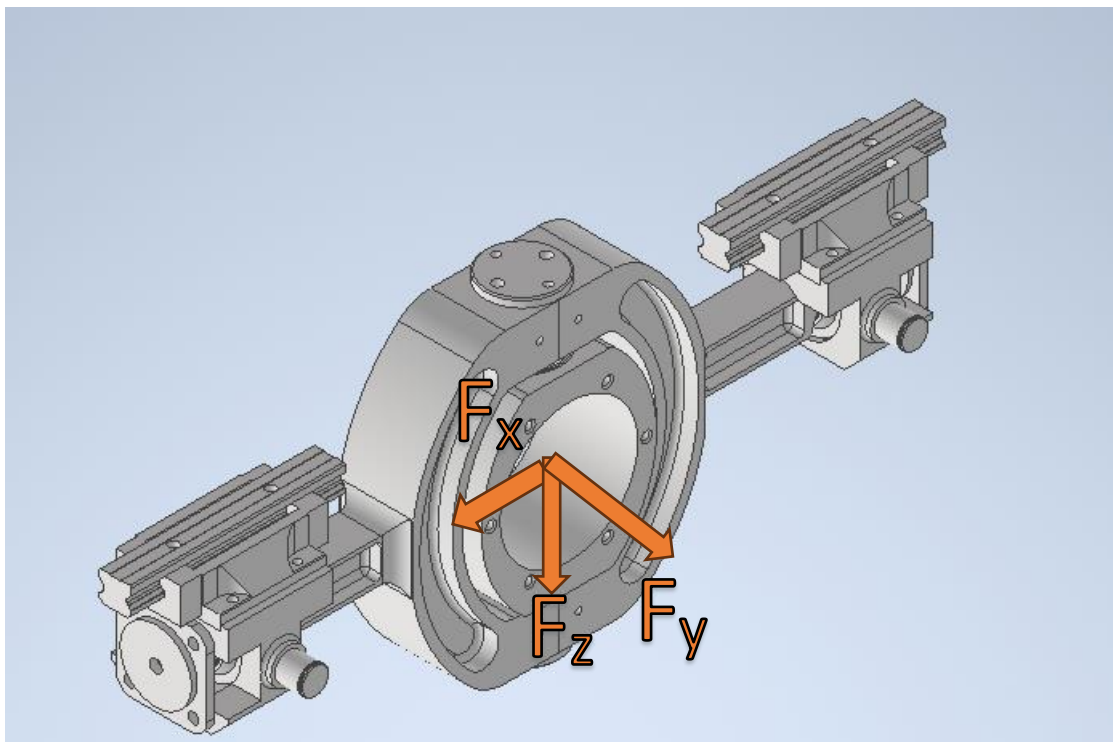
Tenzometr je typ senzoru, jehož elektrický odpor se mění v závislosti na deformaci, kterou tento senzor prochází. Tato deformace způsobí změnu v geometrických rozměrech tenzometru, a to změní elektrický odpor. Když na tenzometr působí tahové napětí, stává se delší a průřezová plocha se zmenšuje, což přispívá k nárůstu elektrického odporu. Obvykle se jedná o vinutý vzor kovového drátu na pružné polyamidové fólii. [13]



Obrázek 25 Tenzometry pro měření sil v kontaktu mezi kladkou a kolem



Obrázek 26 Tenzometry pro měření sil na ložiskových komorách



Obrázek 27 Síly působící na ložisko nápravy



8 Měření

V této části práce jsou popsány série měření provedených na kladkovém stavu, který byl popsán v předchozích kapitolách. Byla provedena měření, při kterých byla simulována jízda v přímé trati a průjezd obloukem. Hlavním cílem měření bylo seznámit se po praktické stránce s kladkovým stavem, naučit se ho ovládat a ověřit jeho funkce. Při měření byly použity různé režimy podvozku.

První část experimentů byla zaměřena na simulaci jízdy po přímé trati při různých rychlostech. Při každé testované rychlosti byl podvozek příčně vychýlen. Byl zkoumán útlum a frekvence vlnivého pohybu podvozku.

V druhé části experimentů byla provedena simulace průjezdu obloukem. Nejprve byla ověřena správnost funkce natáčení náprav. Také byly zjištěny závislosti posunutím ložiskových komor a úhlem natočení dvojkolí na napětí na servomotorech, které jsme použili v následujících měření. Pote byli měření vodící síly na přední vnější kladce v závislosti na různých poloměrech oblouku. Pro jeden z vybraných oblouků bylo navíc provedeno měření kde bylo použito řízené natáčení dvojkolí a byl zkoumán vliv na velikost vodící síly. Data z měřících přístrojů byla zaznamenána v softwaru LabVIEW od National Instruments.

8.1 Simulace jízdy v přímé trati

První měření se zaměřilo na zjištění frekvence vlnivého pohybu podvozku při jeho příčném vychýlení. Bylo provedených celkem šest měření při různých otáčkách kladek, které se pohybovaly od 50 ot/min do 300 ot/min s krokem 50 ot/min. Záznam měření získaný ze snímačů příčného vychýlení pro otáčky kladek 300 ot/min je zobrazen v Graf 1. Pro každé měření byla zjištěna perioda vlnivého pohybu, z níž byla pomocí Rovnice 11 vypočítána délka vlny l_v .

$$l_v = T * v \quad (11)$$

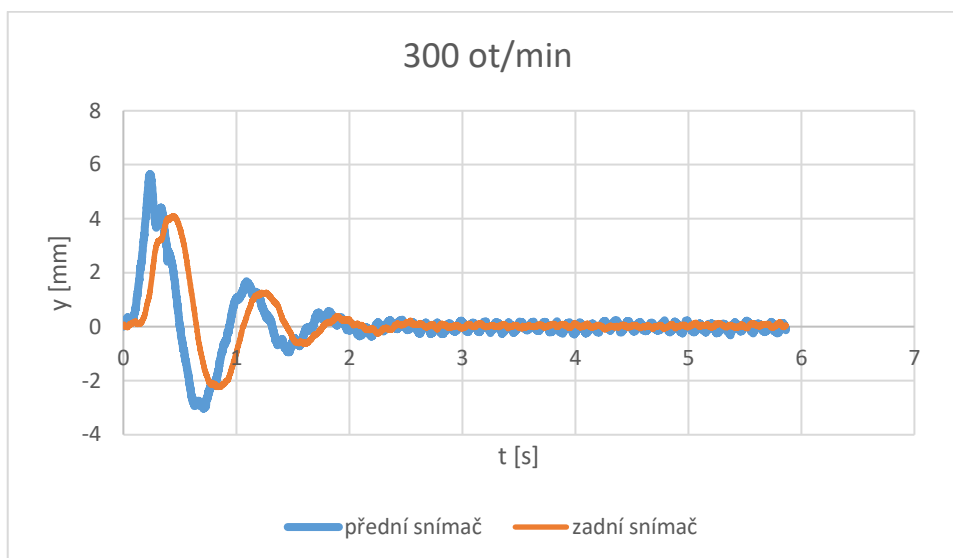
Kde T je perioda vlnivého pohybu a v je obvodová rychlost kladek.

Teoretická délka vlny je spočítána pomocí Rovnice 12. Porovnání s naměřenými hodnotami je v Tabulka 2.

$$l_v^* = 2 * \pi * \sqrt{\frac{s * r_k}{\lambda}} * \sqrt{\frac{L^2}{4 * s^2}} \quad (12)$$



Kde s je poloviční vzdálenost styčných kružnic, r_k je poloměr kola, λ je kuželovitost kola a L je rozvor podvozku.



Graf 1 Záznam měření získaných ze snímače příčného vychýlení

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 1.

Tabulka 1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření vlnivého pohybu

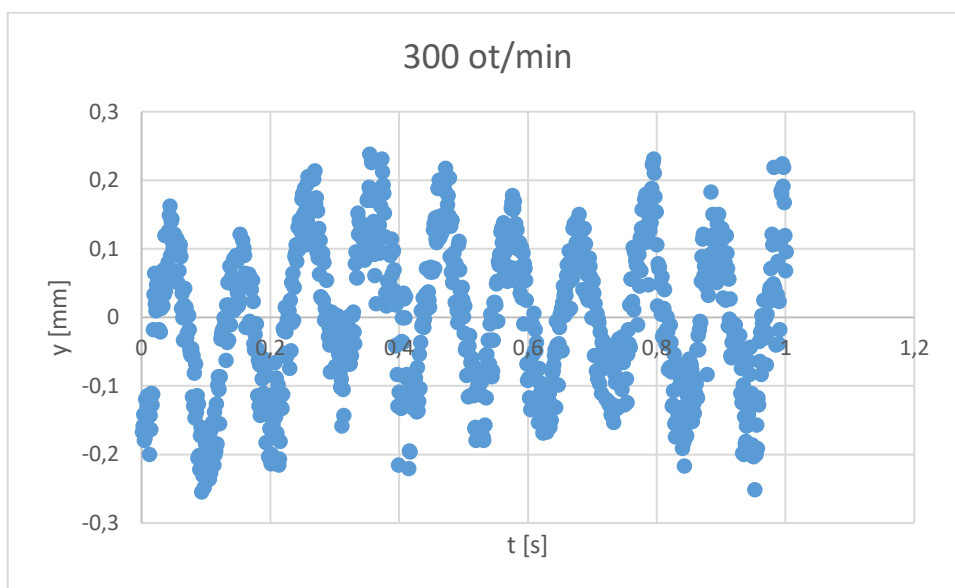
Otáčky kladek [1/min]	v [m/s]	v [km/h]	T [s]	f [Hz]	l_v [m]
50	1,31	4,71	4,98	0,20	6,52
100	2,62	9,42	2,5	0,40	6,54
150	3,93	14,14	1,7	0,59	6,68
200	5,24	18,85	1,2	0,83	6,28
250	6,54	23,56	0,98	1,02	6,41
300	7,85	28,27	0,82	1,22	6,44

Tabulka 2 Porovnání naměřených hodnot s teoretickou

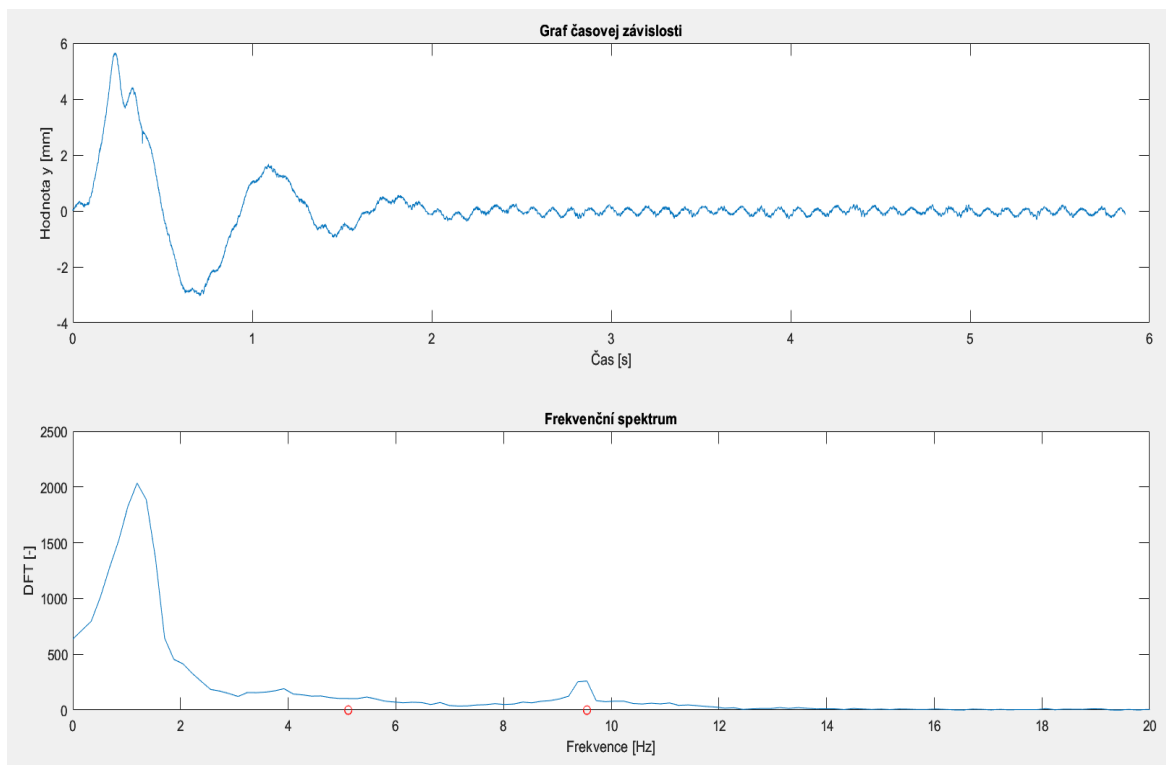
Otáčky kladek [1/min]	l_v [m]	absolutní odchylka [m]	relativní odchylka [%]
50	6,52	0,04	0,58
100	6,54	0,06	0,99
150	6,68	0,19	3,01
200	6,28	0,20	3,05
250	6,41	0,07	1,03
300	6,44	0,04	0,63
Teoretická hodnota [m]	6,48		



Po utlumení vlnivého pohybu, který byl iniciován vychýlení podvozku, byl pozorován harmonický pohyb (viz. Graf 2). Tento pohyb byl pozorovatelný při otáčkách kladek 200 ot/min a více. Nejvíc viditelný byl při maximálních otáčkách. Pro určení frekvence tohoto pohybu byla využita diskretní Fourierova transformace (DFT) signálu, získaného z potenciometru měřícího příčnou výchylku. Data byla analyzována a zpracována v programu Matlab, který byl také použit k vykreslení grafů průběhu měření a k zobrazení frekvenčního spektra (viz. Graf 3).



Graf 2 Záznam měření získaných ze snímače příčného vychýlení po utlumení počátečního vychýlení



Graf 3 Grafy znázorňující frekvence získané pomocí programu Matlab



V grafu jsou označeny červeným kroužkem frekvence otáčení kladek f_{klad} a frekvence otáčení kol f_{kol} , které byly vypočtené pomocí Rovnice 13 a Rovnice 14. Pro otáčky 300 min^{-1} jsou frekvence 5 Hz pro otáčky kladek a 9,5 Hz pro otáčky dvojkolí. V grafu frekvenčního spektra jsou pozorovatelné dvě výrazná lokální maxima. První z nich odpovídá frekvenci 1,2 Hz, což představuje vlnivý pohyb způsobený vychýlením podvozku. Druhé lokální maximum je pozorováno pro frekvenci 9,5 Hz, což odpovídá frekvenci otáčení dvojkolí. To naznačuje, že kmitání podvozku je způsobeno geometrickými nepřesnostmi kol podvozku.

$$f_{klad} = \frac{n}{60} \quad (13)$$

Kde n jsou otáčky kladek.

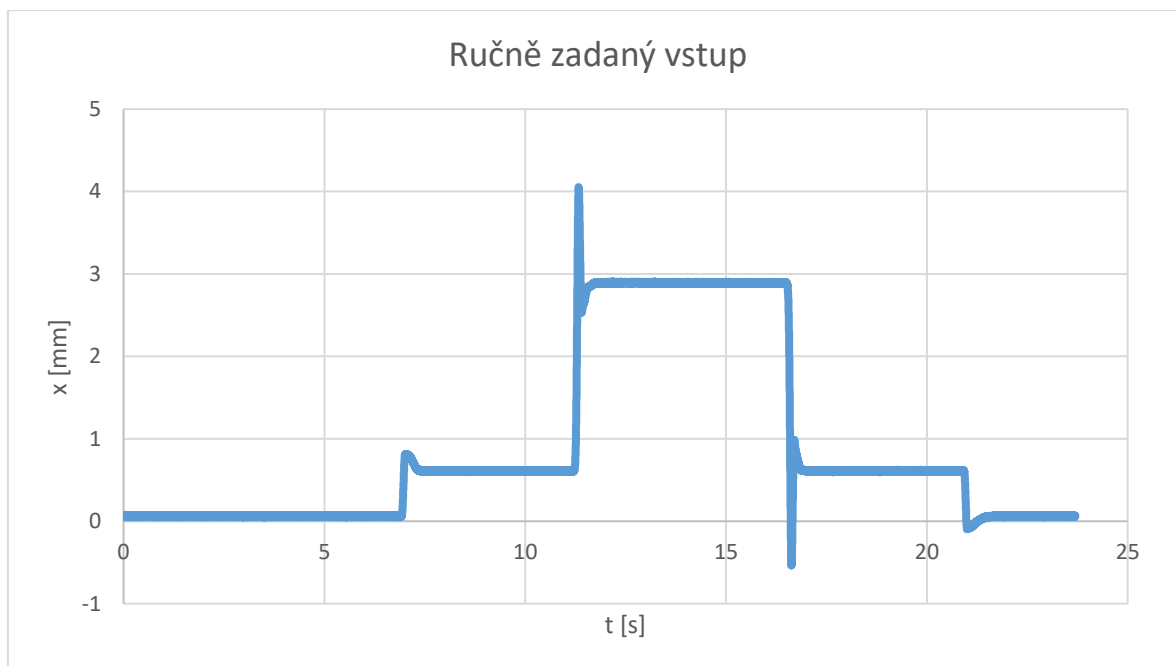
$$f_{kol} = \frac{D_{kladky}}{d_{kola}} * f_{klad} \quad (14)$$

Kde D_{kladky} je průměr kladky a d_{kola} je průměr kola.

8.2 Simulace průjezdu obloukem

8.2.1 Natáčení dvojkolí

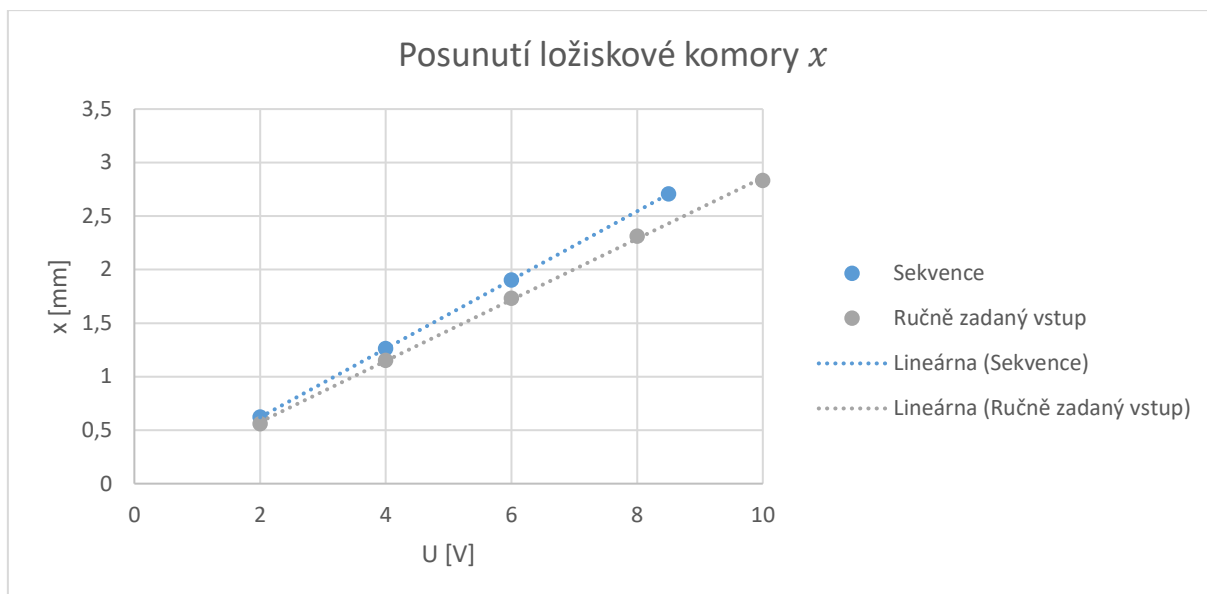
Toto měření bylo zaměřeno na zjištění závislosti posunutí ložiskových komor x a úhlu natočení náprav $\frac{\varphi}{2}$ na napěťovém vstupu. Natočení servomotoru je ovládáno změnou napětí na frekvenčním měniči v rozsahu od -10 V do 10 V. Natočení servomotoru závisí na velikosti napětí, které je přivedeno na frekvenční měnič. Změna napětí může být realizována dvěma způsoby. První způsob je pomocí sekvence, kde jsou nastaveny časové intervaly a pro každý interval je zadáno napětí. Druhý způsob je ruční, kde se napětí zadává manuálně a mění se ihned a není možné to naprogramovat. Pro obě varianty byl zadán skok z 0 V na 2 V a pak na 10 V a zpátky. Pomocí potetometrů byla měřena skutečná poloha ložiskových komor (viz. Graf 4 a Graf 5). Pro zadávání napětí pomocí sekvence je v Graf 5 viditelná chyba, kdy pro napětí 2 V je jiná hodnota posunutí ložiskové komory x , když se napětí mění z 0 V na 2 V na jako při změně z 10 V na 2 V. Dále byla provedena dodatečná měření, při kterých bylo místo 2 V zadáno 4 V, 6 V a 8 V. Závislosti posunutí ložiskových komor x na napětí byly zjištěny pro oba způsoby zadávání vstupu (viz. Graf 6). Kvůli jejich rozdílnosti bylo nutné provést opravy.



Graf 4 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě

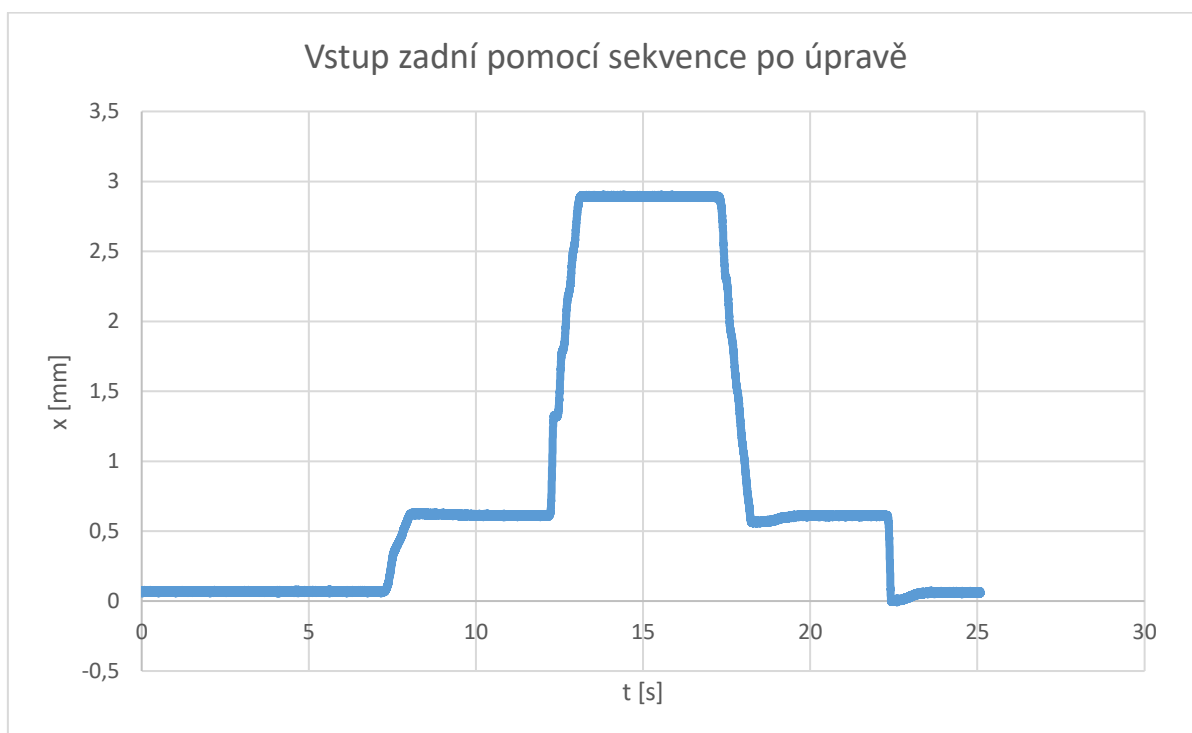


Graf 5 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě

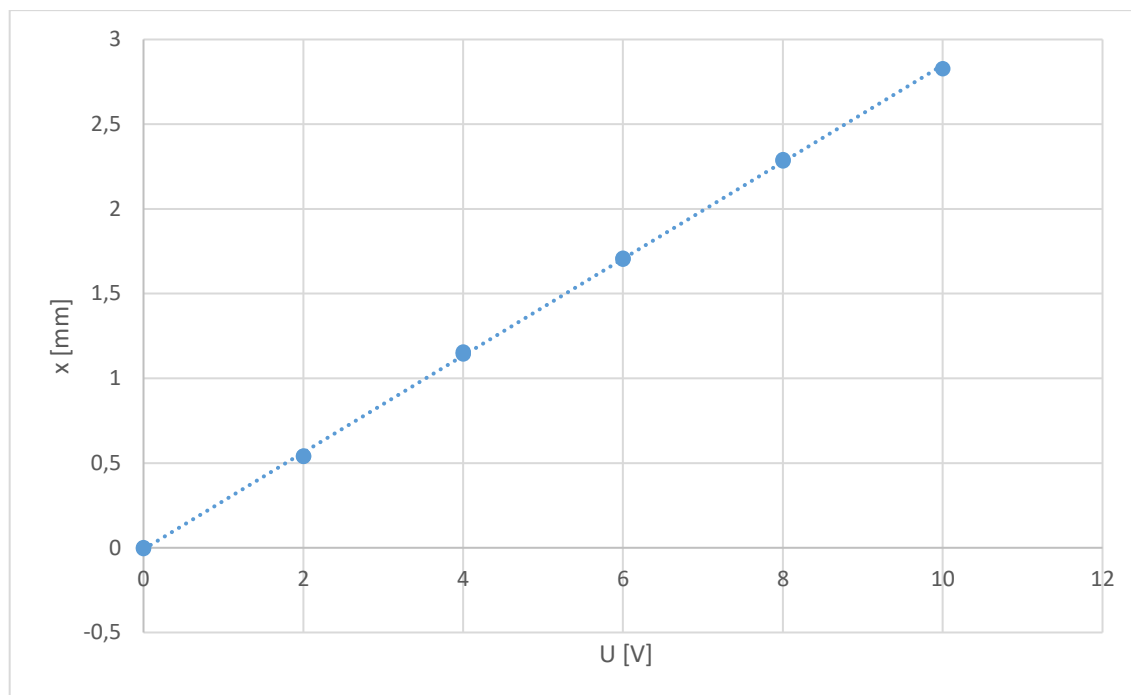


Graf 6 Závislosti posunutí ložiskových komor x na napětí byly zjištěny pro oba způsoby zadávání vstupu

Tyto data byly poskytnuty programátorovi, který opravil zjištěné chyby. Po provedení oprav byli měření opakovány ještě jednou (viz. Graf 7) a pomocí lineární regrese byla zjištěna závislost posunutí ložiskových komor x na napětí (viz. Graf 8).



Graf 7 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě



Graf 8 Závislost posunutí ložiskové komory x na napětí

Vzorec zjištěný pomocí lineární regrese je uveden v rovnici 9.

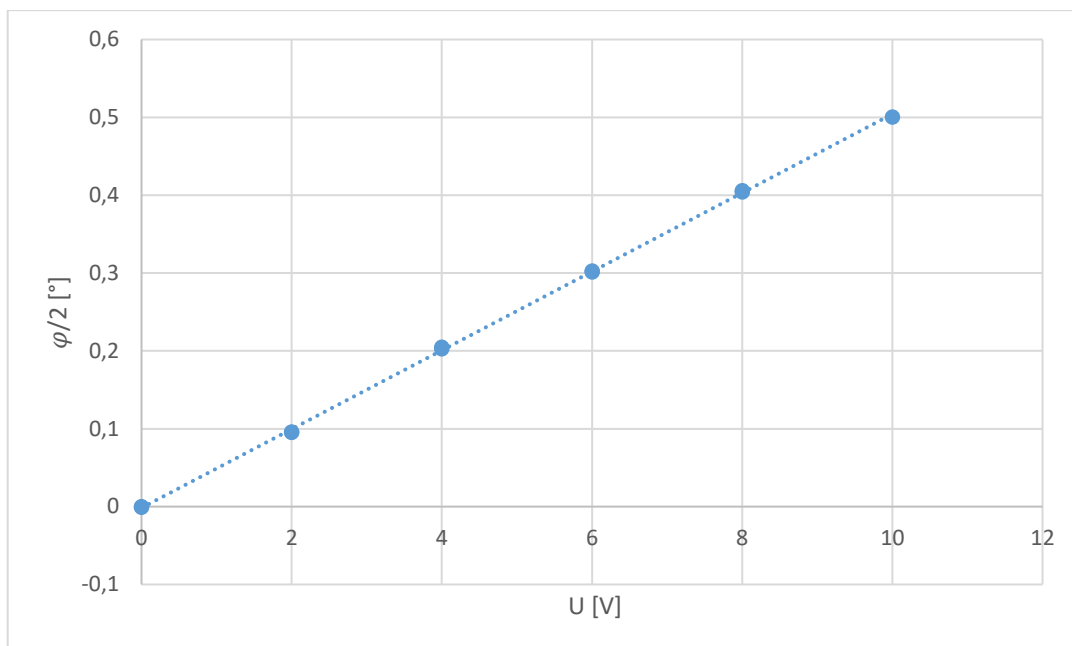
$$x = 0,2857 * U \quad (9)$$

Kde x posunutí ložiskové komory a U je napětí.

Protože je pro další měření lepší znát závislost úhlu natočení dvojkolí vůči podvozku (viz. Graf 9), byl tento úhel vypočten pomocí rovnice 10.

$$\frac{\varphi}{2} = \text{atan}\left(\frac{x}{0,5 * a}\right) \quad (10)$$

Kde a je vzdálenost ložiskových komor.



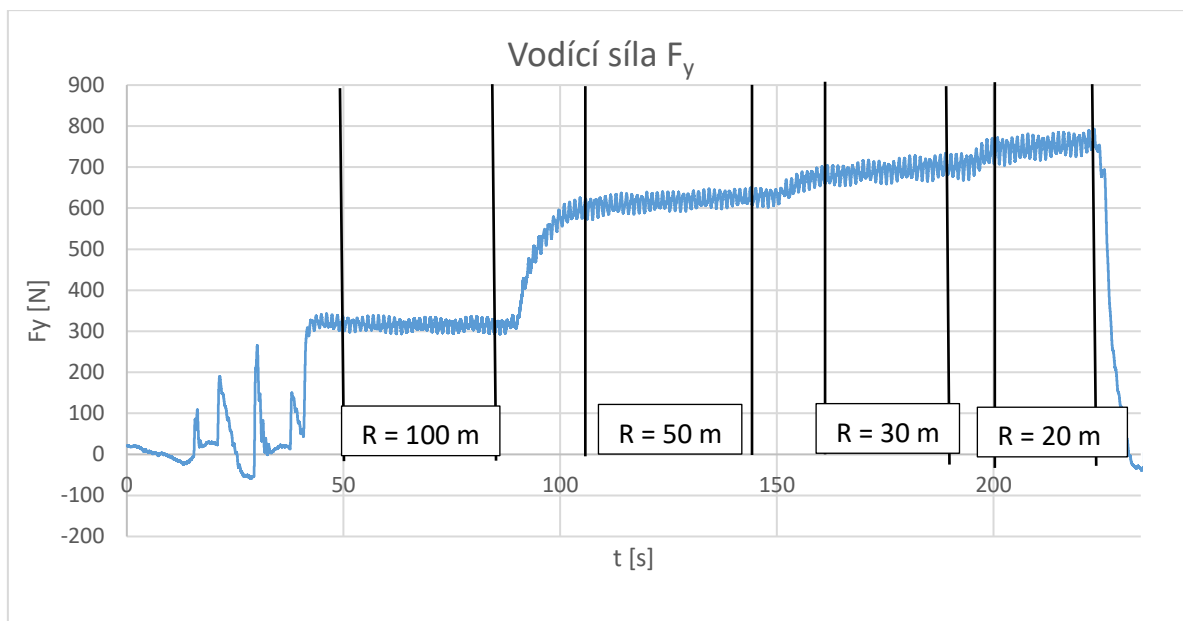
Graf 9 Závislost úhlu natočení náprav $\frac{\varphi}{2}$ na napětí

Vzorec zjištěný pomocí lineární regrese je uveden v rovnici 11.

$$\frac{\varphi}{2} = 0,0506 * U \quad (11)$$

8.2.2 Měření vodících sil v oblouku

Toto měření bylo zaměřeno na zjištění velikosti vodící síly při průjezdu oblouků různých poloměrů. Byly zvoleny poloměry 100 m, 50 m, 30 m a 20 m. Při prvním měření byly nápravy pevně spojeny s rámem podvozku. Vodící síla na předním vnějším kole byla měřena pomocí tenzometrů umístěných na přední vnější kladce. Naměřená data byla vyhlazena pomocí klouzavého průměru vypočteného z 1000 hodnot v okolí jednoho bodu. (viz. Graf 10).



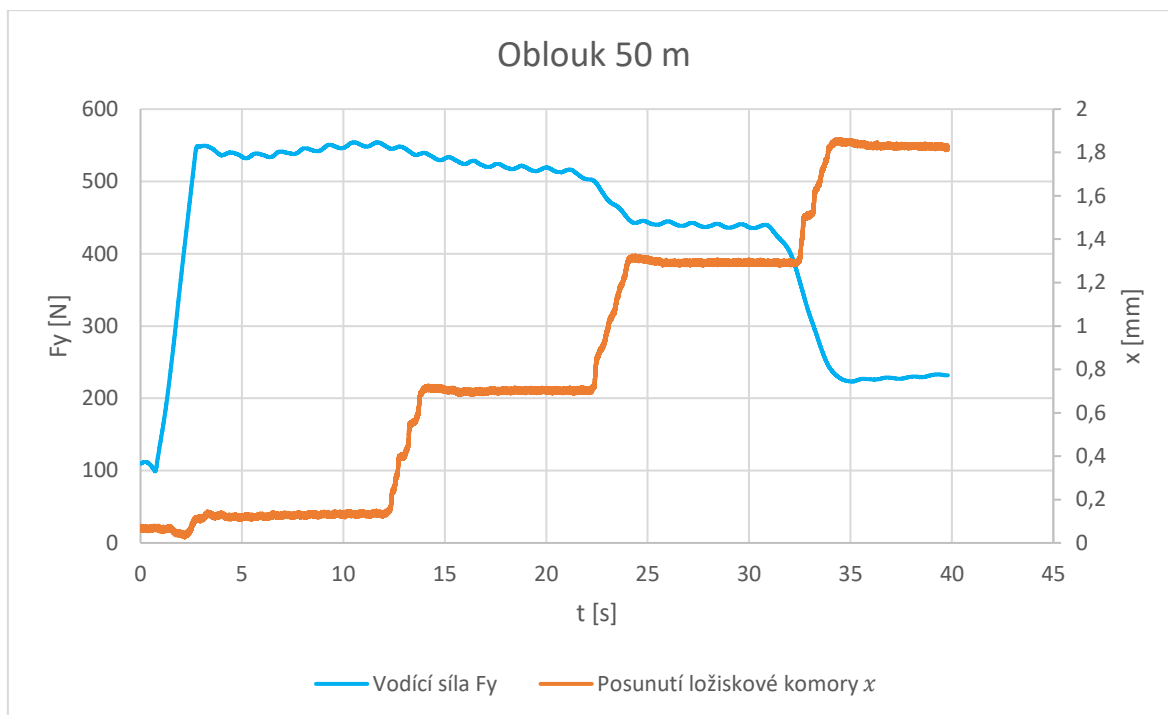
Graf 10 Záznam měření vodící síly pro podvozek s pevnými nápravami

Pro každý oblouk byla zjištěna průměrná hodnota vodící síly (viz Tabulka 3). Průměr byl spočítán z hodnot v časech, kdy se naměřené hodnoty ustálily. Tyto intervaly jsou ohraničeny pomocí svislých čar v Grafu 10 a jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3 Průměrné hodnoty vodící síly F_y

Poloměr oblouku [m]	Vodící síla F_y [N]	Časové intervaly
100	317,10	50 s – 85 s
50	616,00	105 s – 145 s
30	688,98	160 s – 190 s
20	738,91	200 s – 225 s

Při druhém měření byly nápravy na podvozku uvolněny a natočení bylo řízeno pomocí servomotorů. Byl zvolen oblouk o poloměru 50 m a během měření se měnil úhel natočení náprav $\frac{\varphi}{2}$. Průběh síly a posunutí ložiskových komor jsou zobrazeny v Graf 11. V grafu je průběh sil vyhlazen pomocí klouzavého průměru vypočteného z 1000 hodnot v jeho okolí. Odečtené hodnoty vodících sil jsou uvedeny v Tabulka 5.



Graf 11 Průběh síly a posunutí ložiskových komor

V tabulce 4 jsou uvedeny vypočtené hodnoty pomocí rovnice 3 a rovnice 7, které odpovídají radiální poloze pro oblouk s poloměrem 50 m.

Tabulka 4 Hodnoty $\frac{\varphi}{2}$ a x odpovídající radiální poloze

Hodnota $\frac{\varphi}{2}$ odpovídající radiální poloze pro 50m oblouk [°]	0,41
Hodnota x odpovídající radiální poloze pro 50m oblouk [mm]	2,31

Tabulka 5 Naměřené hodnoty x , $\frac{\varphi}{2}$ a F_y pro 50m oblouk

U [V]	x vypočtené [mm]	$\frac{\varphi}{2}$ vypočtené [°]	x naměřené [mm]	$\frac{\varphi}{2}$ naměřené [°]	Vodící síla F_y [N]
0	0,00	0,00	0,10	0,02	537,91
2	0,57	0,10	0,65	0,12	520,68
4	1,14	0,20	1,23	0,22	437,69
6	1,71	0,30	1,77	0,31	231,41

Hodnoty x a $\frac{\varphi}{2}$ byly vypočtené pomocí rovnice 9 a rovnice 11.

V tabulce 6 je provedeno porovnání vodících sil mezi podvozkem bez natáčení náprav a podvozkem s aktivním natáčením náprav. Největší rozdíl byl zaznamenán při napětí 6 V, kdy úhel natočení činil 0,31 °. Síly se snížily o 60 %. Menší síla byla zaznamenána i při napětí 0 V, a to o 12 %. Tento jev je způsoben nižší tuhostí vedení náprav, což vedlo k natočení o 0,02 °.



Tabulka 6 Porovnání vodících sil mezi podvozkem bez natáčení náprav a podvozkem s aktivním natáčením náprav

U [V]	Vodící síla F_y [N]	Rozdíl F_y oproti tuhým nápravám [N]	Rozdíl F_y oproti tuhým nápravám [%]
0	537,91	78,09	12,68
2	520,68	95,32	15,47
4	437,69	178,31	28,95
6	231,41	384,59	62,43
Vodící síla F_y bez použití aktivního natáčení [N]	616		



9 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se v úvodní části zaměřil na rešerši, kde jsem popsal různé možnosti využití aktivních prvků. Následně jsem přistoupil k popisu komponent kladkového stavu a podvozku, na kterém jsem prováděl sérii měření. Tato měření simulovala jak jízdu v přímé trati, tak průjezd obloukem.

Rešerši jsem rozdělil do dvou hlavních kapitol, které se zaměřily na aktivní prvky v primárním vypružení, které jsou popsány v kapitole 4 a aktivní prvky v sekundárním vypružení v kapitole 5. V těchto kapitolách jsem popsal různé možnosti, které snižují velikost vodící síly a tím přispívají k menšímu opotřebení kol a kolejnic nebo zlepšují stabilitu vozidel.

Dále jsem se seznámil a naučil obsluhovat kladkový stav a podvozek, které jsou umístěny na Fakultě strojní ČVUT. V kapitole 6 jsem popsal všechny mechanismy kladkového stavu, které slouží k simulaci průjezdu obloukem. Pomocí rovnic jsem vyjádřil potřebné natočení všech servomotorů v závislosti na simulovaném poloměru oblouku. V rámci této části jsem také popsal aktivní natáčení dvojkolí podvozku, včetně všech komponent, které se na natáčení dvojkolí podílejí, a naučil jsem se, jakými způsoby se natáčení ovládá.

Poslední část mé bakalářské práce byla věnována měřením. Provedl jsem simulaci jízdy v přímé trati, během které jsem měřil frekvenci vlnivého pohybu podvozku, který byl příčně vychýlen. Naměřené hodnoty se od teoretické lišily maximálně o 3 %. Při vyšších rychlostech bylo po utlumení vlnivého pohybu zaznamenáno vlnění podvozku s jinou frekvencí. Provedl jsem frekvenční analýzu naměřených dat a zjistil, že vlnění je způsobeno geometrickými nepřesnostmi dvojkolí. Druhé měření simulovalo průjezd obloukem. Toto měření jsem rozdělil na měření, kdy byl podvozek v režimu bez natáčení dvojkolí, a na měření, ve kterém jsem použil aktivní natáčení. Následně jsem porovnal výsledky měření pro oba režimy a zjistil snížení sil pro oblouk s poloměrem 50 m až o 60 %.



10 Bibliografie

- [1] Zhenggang Lu, Xiaochao Wang, Keyu Yue, Juyao Wei, Zhe Yang,, „Coupling model and vibration simulations of railway vehicles and running gear bearings with multitype defects,“ *Mechanism and Machine Theory*, sv. 157, 2021.
- [2] Park, JH., Koh, HI., Hur, HM. et al., „Design and analysis of an active steering bogie for urban trains,“ *J Mech Sci Technol*, p. 1353–1362, 2010.
- [3] HUR, H., SHIN, Y., AHN, D., HAM, Y., „ Steering Performance Evaluation of Active Steering Bogie to Reduce Wheel Wear on Test Line,“ *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, pp. 1591-1600, 2019.
- [4] UMEHARA, Y., KAMOSHITA,S.,ISHIQURI, K., YAMANAQA,Y, „Development of Electro-hydraulic Actuator with Fail-safe Function for Steering System,“ *Q Rep RTRI*, p. 131–137, 2014.
- [5] Mitsugi SUZUKI, Hisayo DOI, Daichi NAKAJIMA, Takayuki TANAKA, Takatoshi HONDOU, Takayuki TOTAKE, „Evaluation of Performance of Bogie to Control Decrement in Wheel Load in Operating Speed Range,“ 24 Februar 2019. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriq/60/1/60_52/_article/-char/en, Abstract:.
- [6] A. WICKENS, FUNDAMENTALS OF RAIL VEHICLE DYNAMICS, London, 2003.
- [7] Perez J, Mauer L, Busturia JM, „Design of Active Steering Systems for Bogie-Based Railway Vehicles with Independently Rotating Wheels,“ *Vehicle System Dynamics* , č. 37, pp. 209-220, 2002.
- [8] Zhenggang Lu,Juyao Wei, Zhan Wang, „Active Steering Controller for Driven Independently Rotating Wheelset Vehicles Based on Deep Reinforcement Learning,“ 6 September 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr11092677>.
- [9] Stefano ALFI, Davide PRANDI, Christopher WARD, Stefano BRUNI and Roger GOODALL, „Active secondary yaw control to improve curving behaviour of a railway vehicle,“ Chiba, 2015.
- [10] T. Michalek, J. Zelenka, „Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements,“ *Ceská Třebová*, 2011.
- [11] „liebherr transportation systems magazine,“ [liebherr-transportation-systems-magazine-2018-2020-en.pdf](#), 2020.



- [12] ALFRED JASCHINSKI , HUGUES CHOLLET, SIMON IWNICKI, ALAN WICKENS, JURGEN VON WURZEN, „The Application of Roller Rigs to Railway Vehicle,“ *n Vehicle System Dynamics*, č. 31, p. 345–392, 1999.
- [13] Doc. Ing. Josef Jenčík, CSc. Doc. Ing. Jaromír Volf, DrSc., TECHNICKA MĚŘENÍ, Vydavatelství ČVUT, 2003.



11 Seznam použitých zkratek

n	[1/min]	Otáčky kladek
D_{kladky}	[m]	Průměr kladky
v	[m/s]	Rychlost vozidla
R	[m]	Poloměr oblouku
$\frac{\varphi}{2}$	[°]	Úhel natočení kladek/dvojkolí
L	[m]	Rozvor podvozku
$2s$	[m]	vzdálenost styčných kružnic
x	[mm]	Posunutí ložiskových komor
l_v	[m]	Délka vlny
r_k	[m]	Poloměr kola
λ	[-]	Kuželovitost kola
F_y	[N]	Vodící síla



12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Pojezd kolejového vozidla [1]	9
Obrázek 2 Schéma řídicího systému	10
Obrázek 3 Podvozek EMU pro zadního elektrickou městskou jednotku vybavení aktivním natáčením dvojkolí [2]	12
Obrázek 4 Kinematická schéma pákového mechanismu [2]	12
Obrázek 5 Aktivně řízení podvozek s jedním aktuátorem [3].....	13
Obrázek 6 Prototyp podvozku s aktivním natáčením dvojkolí [4]	14
Obrázek 7 Schéma rotačního mechanismu [5]	14
Obrázek 8 Přirozený diferenciál [6]	15
Obrázek 9 Použití lineárních aktuátoru [7]	16
Obrázek 10 Pohaněné nezávisle otočné kola [8]	16
Obrázek 11 Schéma rozložení aktuátoru [9].....	17
Obrázek 12 Nová lokomotiva Vectron ÖBB [11].....	18
Obrázek 13 Kladek stav skuteční velikosti v Mnichově [12].	19
Obrázek 14 Skica hlavních rozměrů	20
Obrázek 15 Kladek stav ČVUT	20
Obrázek 16 Schéma pro výpočet uhlu natočení kladek v oblouku.....	22
Obrázek 17 Mechanismus pro natáčení kladek	22
Obrázek 18 Mechanismus pro natáčení kladek	23
Obrázek 19 Mechanismus pro natáčení kladek	24
Obrázek 20 Rozklad sil	24
Obrázek 21 Schéma mechanismu pro natáčení dvojkolí (pohled z boku)	25
Obrázek 22 Schéma mechanismu pro natáčení dvojkolí (pohled shora)	26
Obrázek 23 Porovnání mezi variantami pro pevné nápravy (vlevo) a pro natáčecí nápravy (vpravo)	26
Obrázek 24 Měření posunutí ložiskových komor (vlevo), příčné výchylky podvozku (vpravo)	27
Obrázek 25 Tenzometry pro měření sil v kontaktu mezi kladekou a kolem	28
Obrázek 26 Tenzometry pro měření sil na ložiskových komorách	28
Obrázek 27 Síly působící na ložisko nápravy.....	29



13 Seznam grafů

Graf 1 Záznam měření získaných ze snímače příčného vychýlení	31
Graf 2 Záznam měření získaných ze snímače příčného vychýlení po utlumení počátečního vychýlení	32
Graf 3 Grafy znázorňující frekvence získané pomocí programu Matlab	32
Graf 4 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě	34
Graf 5 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě	34
Graf 6 Závislosti posunutí ložiskových komor x na napětí byly zjištěny pro oba způsoby zadávání vstupu	35
Graf 7 Posuny odečteny pomocí potenciometru umístěného na levém kole na přední nápravě	35
Graf 8 Závislost posunutí ložiskové komory x na napětí	36
Graf 9 Závislost úhlu natočení náprav φ_2 na napětí	37
Graf 10 Záznam měření vodící síly pro podvozek s pevnými nápravami	38
Graf 11 Průběh síly a posunutí ložiskových komor	39



14 Seznam tabulek

Tabulka 1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření vlnivého pohybu.....	31
Tabulka 2 Porovnání naměřených hodnot s teoretickou	31
Tabulka 3 Průměrné hodnoty vodící síly F_y	38
Tabulka 4 Hodnoty φ^2 a x odpovídající radiální poloze.....	39
Tabulka 5 Naměřené hodnoty x , φ^2 a F_y pro 50m oblouk.....	39
Tabulka 6 Porovnání vodících sil mezi podvozkem bez natáčení náprav a podvozkem s aktivním natáčením náprav	40