

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A KOLEJOVÝCH VOZIDEL

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Metody eliminace nežádoucích elektromechanických
interakcí zcela odpruženého pohonu dvojkolí*

Ing. Vojtěch Dybala

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: *Dopravní stroje a zařízení*

Školitel: *doc. Ing. Josef Kolář, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

listopad 2023

Název anglicky: *Methods of elimination of unwanted electromechanical interactions in a fully-suspended drive of a wheelset.*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Vojtěch Dybala*

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta
strojní ČVUT v Praze

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Technická 4, 160 00 Praha 6

Školitel: *doc. Ing. Josef Kolář, CSc*

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta
strojní ČVUT v Praze

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Technická 4, 160 00 Praha 6

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, Praha 6 před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním
oboru Dopravní stroje a zařízení.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph. D.

předseda oborové rady oboru *Dopravní stroje a zařízení (2302V004)*

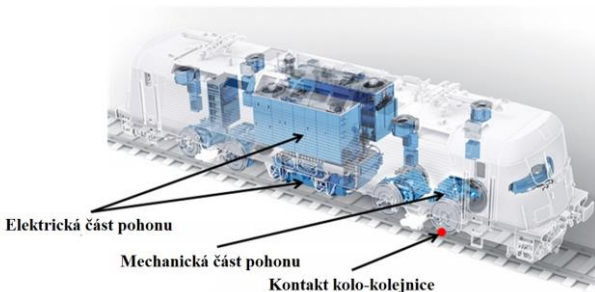
Fakulta strojní ČVUT v Praze

1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

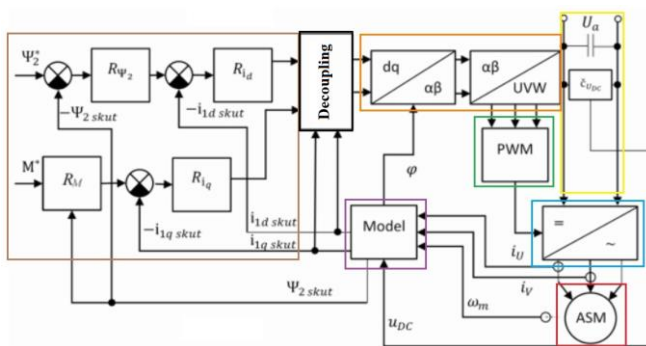
V této kapitole bude věnována pozornost popisu základních principů fungování zcela odpružených trakčních pohonů lokomotiv a vysvětlení základních pojmů. Také v této kapitole uvádím přehled výzkumu z oblasti elektromechanických jevů, který byl realizovaným ostatními autory přede mnou.

1.1 Trakční pohon lokomotivy

Trakční pohon lokomotivy je složitý technický celek, od sběrače až po dvojkolí. Z pravidla se však vždy jedná o soustavu, kterou lze z hlediska konstrukce rozdělit do dvou základních skupin – elektrická část a mechanická část, viz Obr. 1. Nelze samozřejmě opomenout fenomén adheze v kontaktu kolo-kolejnice, který umožňuje přenášet hnací síly, a tedy umožňuje pohyb vozidla.



Obr. 1 Vizualizace trakční výzbroje a výstroje lokomotivy. [1]



Obr. 2 Schéma vektorové regulace v kartézských souřadnicích. [2]

Pro moderní trakční pohony je již dlouhou dobu typické použití frekvenčních měničů při řízení trakčních motorů. Právě vývoj a následná aplikace výkonových polovodičových součástek v trakti kolejových vozidel umožnily i rozšíření, ve srovnání s pohony využívajícími stejnosměrné trakční motory, výkonnějších a

efektivnějších motorů, kterými jsou asynchronní motory a synchronní motory s permanentními magnety.

V následujících odstavcích budou popsány základní skupiny pohonu lokomotivy, který je uvažován jako předobraz matematických a simulačních modelů aplikovaných v rámci mého výzkumu.

1.1.1 Elektrická část

Elektrická část je zaměřená na trakční asynchronní motor a jeho regulaci dle Obr. 2, kde je vidět, že podle tohoto schématu vytvořený model obsahuje několik submodelů:

- Blok regulátorů – hnědý obdélník
- Blok transformace mezi souřadnými systémy – oranžový obdélník
- Blok modelu motoru – fialový obdélník
- Blok pulsně šířkové modulace (PWM) – zelený obdélník
- Blok stejnosměrného meziobvodu frekvenčního meniče – žlutý obdélník
- Blok střídače – modrý obdélník
- Blok motoru – červený obdélník

Fungování regulačního schématu je založeno na matematickém popisu asynchronního motoru prostřednictvím napěťových a tokových rovnic, specificky (1) až (8) v souřadném systému $\alpha\beta$.

$$\mathbf{u}_{1\alpha}(t) = \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_{1\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{1\alpha}(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_{1\beta}(t) = \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_{1\beta}(t) + \frac{d\Psi_{1\beta}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{2\alpha}(t) = \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{2\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} + \mathbf{p}_p \omega_m(t) \Psi_{2\beta}(t) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{2\beta}(t) = \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{2\beta}(t) + \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} - \mathbf{p}_p \omega_m(t) \Psi_{2\alpha}(t) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\Psi_{1\alpha}(t) = L_1 \mathbf{i}_{1\alpha}(t) + L_h \mathbf{i}_{2\alpha}(t) \quad (5)$$

$$\Psi_{1\beta}(t) = L_1 \mathbf{i}_{1\beta}(t) + L_h \mathbf{i}_{2\beta}(t) \quad (6)$$

$$\Psi_{2\alpha}(t) = L_2 \mathbf{i}_{2\alpha}(t) + L_h \mathbf{i}_{1\alpha}(t) \quad (7)$$

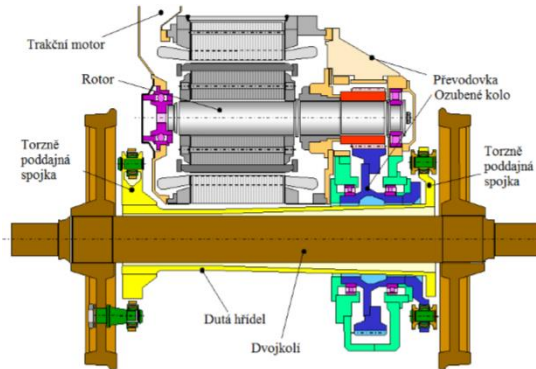
$$\Psi_{2\beta}(t) = L_2 \mathbf{i}_{2\beta}(t) + L_h \mathbf{i}_{1\beta}(t) \quad (8)$$

Z hlediska zkoumané elektromechanické vazby mají podstatný význam rovnice (3) a (4), kde vystupují mechanické otáčky rotoru motoru ω_m a tím tuto vazbu mezi elektrickými a mechanickými veličinami zprostředkovávají. Výsledný elektromagnetický moment motoru pak představuje vztah (9). Další detaily ke této problematice lze nalézt v [3].

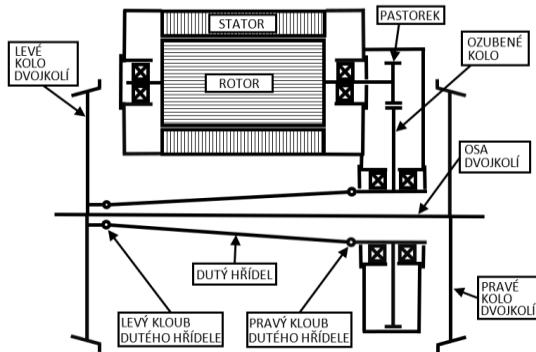
$$\mathbf{M}(t) = \frac{3}{2} \mathbf{p}_p \left(\mathbf{i}_{1\beta}(t) \Psi_{1\alpha}(t) - \mathbf{i}_{1\alpha}(t) \Psi_{1\beta}(t) \right) \quad (9)$$

1.1.2 Mechanická část

V kontextu prezetovaného výzkumu, bude dále popisován zcela odporužený pohon dvojkolí lokomotivy jakožto nejmodernější a nejvíce sofistikované řešení, viz Obr. 3. Výhody toho řešení tkví v tom, že snižují hmotnost neodpružených hmot a tedy i sil působících vlivem nerovností trati, což je důležité z hlediska provozu vysokými rychlostmi na tratích běžné kvality.



Obr. 3 Vizualizace zcela odporuženého pohonu lokomotivy. [4]



Obr. 4 Schéma konstrukčního uspořádání zcela odporuženého individuálního pohonu dvojkolí – 7 hmotová soustava. [5]

Základní komponenty zcela odporuženého pohonu dvojkolí, které jsem uvažoval pro tvorbu simulačních modelů, jsou následující:

- Trakční motor rozdělený na stator a rotor
- Převodovka s pastorkem a velkým ozubeným kolem
- Dutá hřídel s poddajnými klouby/spojkami
- Dvojkolí sestávající se z osy nápravy a nalisovaných kol

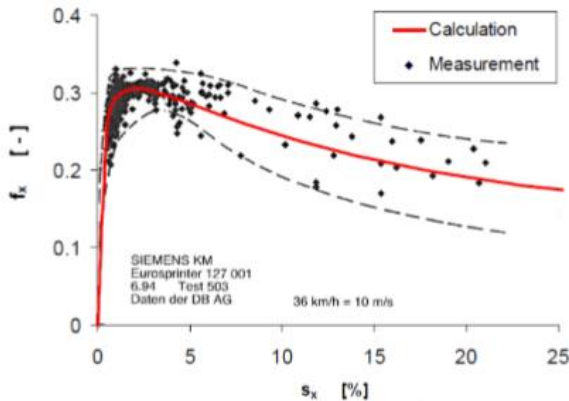
Zcela odporužený pohon dle Obr. 3 lze pak schematicky reprezentovat jako na Obr. 4.

1.1.3 Kontakt kolo-kolejnice

Pro tvorbu mých simulačních modelů je znalost problematiky kontaktu mezi odvalujícím se kolem a nepohyblivou kolejnicí důležitým předpokladem. Vznikají zde totiž tečné síly a spinové momenty. Při tvorbě svých modelů jsem se omezil pouze na podélné tečné síly brzděného a hnacího charakteru. Podmínkou vzniku těchto sil je skluz kola, který vyjadřuje rozdíl mezi teoretickou rychlostí jízdy vozidla odpovídající otáčkám kol a skutečnou rychlostí vozidla. Z rovnice (10) je vidět, že skluz je bezrozměrná veličina.

$$s = \frac{r_k \omega_k - v}{v} \quad (10)$$

Ze znalosti skluzu kola a adhezni charakteristiky můžeme určit součinitel adheze. Adhezni charakteristika vyjadřuje závislost součinitele adheze na skluzu kola. Výzkumu adhezni charakteristik se trvale věnuje řada autorů, kteří postupem času vytvořili řadu teorií a metod. Od původní Carterovy teorie až po moderní Polachovu teorii. Ucelený přehled těchto teorií lze nalézt např. v [6].



Obr. 5 Použití Poláčovy teorie. [7]

1.1.4 Torzní kmitání a přístupy k jeho uchopení a řešení

Základním prvkem při zkoumání torzního kmitání je torzní soustava, která je modelována pomocí schématické náhradní torzní soustavy mechanické části trakčního pohonu. Jak je chápána i v případě mé práce. Tato mechanická část trakčního pohonu je soustavou rotačních hmot, které charakterizuje moment setrvačnosti J , spojených vazebními prvky, které představují torzní tuhosti k_t a případně torzní tlumení b_t . Základní, ale příkladný popis takovéto soustavy uvádím v předchozí kapitole 1.1.2. Zkoumat torzní kmitání samo osobě však již v dnešní době nemá opodstatnění z vědeckého hlediska. Ta cesta, která se nabízí a je i zobecněním tématu mé disertace, je cesta ke zkoumání vzájemných interakcí mezi mechanickou a elektrickou částí trakčních pohonů. A právě tyto snahy o komplexní uchopení a modelování trakčních pohonných systémů jsou současným směřováním výzkumu v oblasti torzní dynamiky pohonů kolejových vozidel.

Ruku v ruce se snahou o komplexní uchopení problematiky jde i motivace. Ta přichází často i z provozu reálných vozidel, a to formou zaznamenaných poruch.

Obr. 6 je ukázkou takového případu, kdy bylo zaznamenáno protočení kola trakčního dvojkolí lokomotivy TRAXX sloužící u DB. Tento případ svou závažností opět vzbudil zájem o problematiku torzního kmitání a přetěžování dvojkolí.



Obr. 6 Pootočení kola trakčního dvojkolí lokomotivy TRAXX. [8]

Způsoby, jak se v dnešní době vypořádat s negativními vlivy torzního kmitání a tím i přetěžování jednotlivých komponent trakčního pohonu, lze v principu rozdělit do dvou skupin:

- 1) Způsoby omezení těchto vlivů v provozu
- 2) Způsoby predikování těchto vlivů a zohlednění při návrhu

První skupina zahrnuje metody zpětnovazební regulace trakčních motorů, které umožňují za provozu identifikovat nežádoucí jevy vyvolané rozkmitáním např. dvojkolí a následně je utlumit [9], [10], [11].

Druhá skupina představuje snahu o vytvoření simulačních modelů, které umožní navodit předpokládané provozní stavy, predikovat tím zatěžování mechanických dílů trakčního pohonu vlivem dynamického chování torzní soustavy a zohlednění těchto vlivů v konstrukčním řešení [12], [13], [14], [15], [16].

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V úvodu v Kapitole 1 byly zmíněny současné potřeby a zároveň i motivace k širšímu využívání železniční přepravy. Ze strany kolejových vozidel to také znamená neustálý vývoj a výzkum moderních výkonných pohonů.

Zaměření mého výzkumu provedeného v disertační práci mohu shrnout těmito čtyřmi cíli:

1. **Určení vlivů vzájemného působení elektrické a mechanické části individuálního pohonu dvojkolí z hlediska buzení torzního kmitání.**
Tyto stavy by mělo být možno navozovat opakovaně pro různé podmínky.
2. **Identifikovat projevy vzájemného elektro-mechanického působení v soustavě trakčního pohonu vozidla se zaměřením se na negativní ovlivňování jednotlivých komponent vozidla,** např. krátkodobé či dlouhodobé přetěžování – životnost, pevnost.
3. **Návrh opatření ke zmírnění nebo výrazné redukci identifikovaných negativních projevů torzního kmitání** v pohonné soustavě individuálního pohonu dvojkolí kolejového vozidla.
4. **Posouzení možností experimentálního měření zkoumaných zákonitostí na kladkových stenech FS ČVUT** za účelem podpory této práce i následného rozšíření možností experimentálních měření začlenitelných do výuky.

K naplnění prvních tří cílů využívám simulačních modelů, které i s určitou mírou idealizace, vycházející ze základní představy o uspořádání modelu – Obr. 1, dostatečně respektují reálné uspořádání a parametry prvků pohonné soustavy kolejového vozidla.

Pro realizaci čtvrtého cíle byla využita zrekonstruovaná starší verze kladkového stavu a model dvounápravového podvozku s hnacími dvojkolými v měřítku 1:3,5.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ

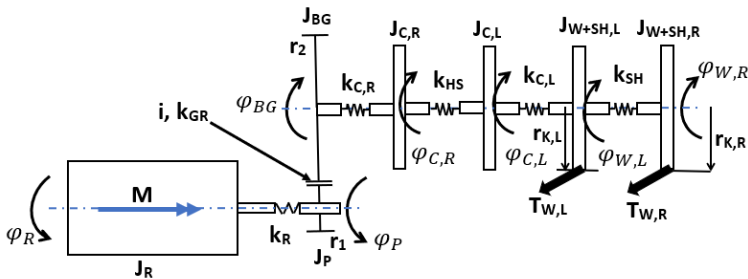
Pro popis jakékoliv dynamické soustavy je nutné sestavit její fyzikální a matematický model. V dnešní době lze s výhodou využít k provádění výpočtů a simulací na takových modelech softwarové prostředky. Nástroji výzkumu této disertace jsou matematické modely sestavené v programu MATLAB („Základní simulační model“) a MATLAB Simulink („Komplexní simulační model“).

Základní simulační model vypočítává základní charakteristiky torzní soustavy – vlastní frekvence a vlastní tvary torzních kmitů. Komplexní simulační model umožňuje simulovat rozjezd a jízdu trakčního vozidla. Výsledky dosažené simulacemi byla snaha podpořit měřeními na modernizovaném kladkovém stavu.

Tato kapitola dále popisuje způsob řešení cílů této práce prostřednictvím analyzování jak dynamických charakteristik samotné torzní soustavy zcela odpruženého pohonu lokomotivy, tak dynamického chování celého trakčního pohonu jakožto elektromechanické soustavy při simulaci rozjezdu a jízdy vlaku.

3.1 Základní simulační model

Základní simulační model byl sestaven v prostředí Matlab k výpočtu základních charakteristik torzní soustavy pohonu lokomotivy – vlastních tvarů kmitů, vlastních frekvencí kmitání. Schéma náhradní torzní soustavy dle Obr. 7 reprezentuje mechanickou část zcela odpruženého pohonu, jehož předlohu lze vidět na Obr. 3.



Obr. 7 Schéma torzní soustavy.

Torzní soustava představuje sedm hmotných rotačních těles charakterizovaných momenty setrvačnosti, které jsou propojeny torzními pružinami charakterizovanými torzními tuhostmi. Převod mezi pastorkem a ozubeným kolem je charakterizován stálým konstantním převodem, tj. poměrem poloměrů r_2/r_1 .

Základní simulační model je založen na řešení soustavy pohybových rovnic v maticovém tvaru (11) nebo (12), které torzní soustavu popisují.

$$[J][\ddot{y}] + [B][\dot{y}] + [K][y] = [F] \quad (11)$$

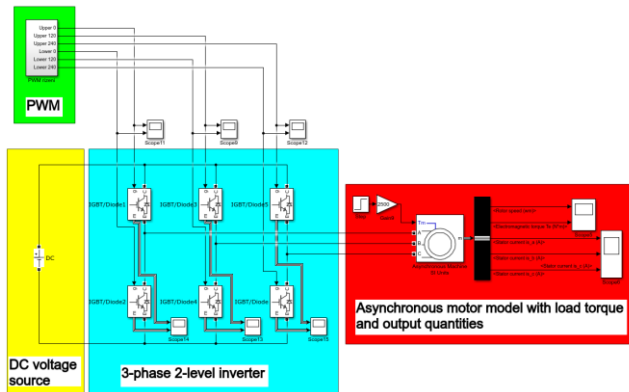
$$[J][\ddot{y}] + [B][\dot{y}] + [K][y] = [0] \quad (12)$$

3.2 Komplexní simulační model

Výše představený základní matematický model je dostatečným nástrojem pro poskytnutí informace o základních vlastnostech soustavy, jak bylo uvedeno v kapitole 3.1. Avšak pro provádění komplexních simulací celého pohonného řetězce kolejového vozidla, zahrnující elektrickou část pohonu, mechanickou část pohonu, kontakt kolo-kolejnice a model dynamiky jízdy vozidla, bylo nutné přejít do prostředí Matlab SIMULINK, které je sofistikovanějším a efektivnějším prostředím pro sestavení a používání simulačního modelu samotného. Tento simulační model byl vytvořen a již dlouhou dobu používán. Průběžně však doznává modifikací, jejichž cílem je přiblížit fungování simulačního modelu co nejvíce pohonnému systému skutečného kolejového vozidla, a tedy získávat i relevantnější výsledky simulací. Základním kamenem však stále zůstává uspořádání modelu do 4 bloků, které jsou vzájemně propojeny. Popis jednotlivých bloků je uveden v následujících kapitolách. Z důvodu značné rozsáhlosti jednotlivých bloků, jakožto i celého simulačního modelu, bude popis zaměřen na obecný popis a základní charakteristiky.

3.2.1 Elektrická část

Základním podkladem pro sestavení a fungování bloku elektrické části simulačního modelu je schéma regulační soustavy dle Obr. 2. Modifikací této části, kterou jsem se zabýval, je doplnění soustavy o blok pulsně šířkové modulace a o blok střídače se zdrojem napětí napájející model trakčního ASM, viz Obr. 8.



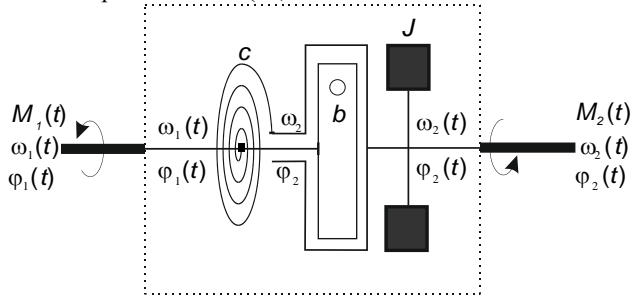
Obr. 8 Bloky nově modifikované elektrické části. [17]

Důvodem pro úpravu modelu formou doplnění střídače a souvisejících simulačních bloků bylo zavedení dalšího zdroje buzení torzních oscilací v pohonu. Konkrétně se snahou simulovat vyšší harmonické složky elektromagnetického momentu a podchytit jejich vliv v mechanické části pohonu.

3.2.2 Mechanická část

Stejně jako elektrická, tak i mechanická část má svůj principiální vzor, a to ve schématu torzní soustavy na Obr. 7. Toto schéma zjednodušuje soustavu na rotační hmoty o momentu setrvačnosti spojené torzními pružinami, které charakterizuje torzní

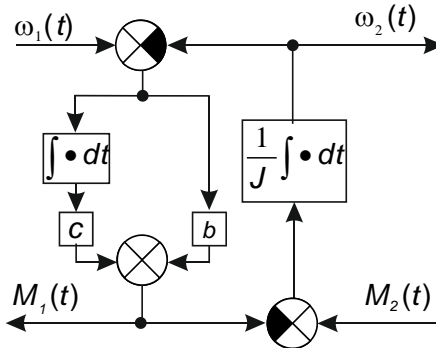
tuhost. Principiálně lze tyto prvky zakreslit pomocí schématu dle Obr. 9. Matematický popis tohoto schématu odpovídá rovnici (13).



Obr. 9 Náhradní schéma pro modelování prvků tuhosti, tlumení a momentu setrvačnosti. [18]

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_2(t) &= M_1(t) - M_2(t) = \\ &= b(\dot{\varphi}_1(t) - \dot{\varphi}_2(t)) - c(\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) - M_2(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Naprogramování prvků dle schématu na Obr. 9 v prostředí Matlab SIMULINK prezentuje Obr. 10. Spojení těchto bloků pak simuluje jednotlivé části mechanického pohonu (rotor trakčního motoru, pastorek, ozubené kolo, spojky/klouby, dutý hřídel, kola dvojkolí a osu dvojkolí) a tuhostní vazby mezi nimi.



Obr. 10 Blokové schéma modelovaných prvků tuhosti, tlumení a momentu setrvačnosti. [18]

3.2.3 Kontakt kolo-kolejnice

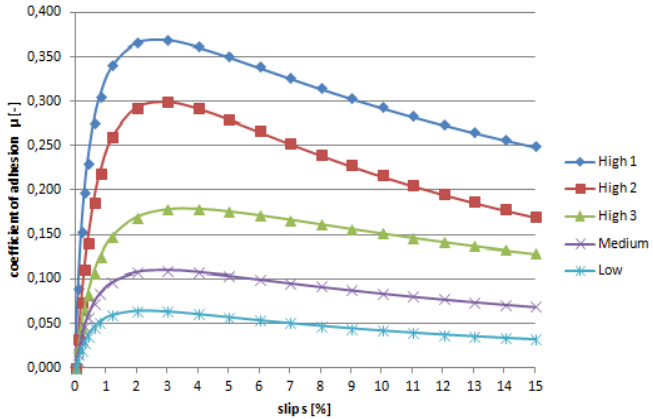
Problém kontaktu kola a kolejnice je zásadní záležitostí, protože vlivem vzájemné interakce v něm dochází ke vzniku tečných sil – hnacích i brzdných. Adhezní model závislosti součinitele adheze/tření na skluzu kola, který toto zajišťuje, vychází z empiricky zjištěných charakteristik dle Popoviče - Obr. 11.

Závislost součinitele adheze na jednotlivých úrovních vychází ze statistického zpracování dat měřených v reálném provozu vozidel.

Průběhy součinitele adheze jsou dány vztahem (14).

$$\mu = A \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(s)-B)^2}{C}\right) \quad (14)$$

kde: A je maximální součinitel adheze, stejně jako μ_{\max}
 s je podélný skluz
 B je parametr sloužící k aproximaci naměřených dat
 C je parametr sloužící k aproximaci naměřených dat



Obr. 11 Empiricky stanovené adhezní charakteristiky dle Popoviče. [19]

4 VÝSLEDKY

Tato kapitola dále popisuje způsob řešení cílů této práce prostřednictvím analyzování jak dynamických charakteristik samotné torzní soustavy zcela odpruženého pohonu lokomotivy, tak dynamického chování celého trakčního pohonu jakožto elektromechanické soustavy při simulaci rozjezdu a jízdy vlaku.

4.1 Analýza základních dynamických charakteristik torzní soustavy

Základními dynamickými charakteristikami torzní soustavy jsou pro účely této práce nazývány vlastní tvary kmitů a vlastní frekvence kmitání torzní soustavy. K jejich analýze je používán výpočetní matematický model výše nazývaný „Základní simulační model“. Ten je založen na představě torzní soustavy zcela odpruženého pohonu dvojkolí, viz Obr. 7, jehož předobrazem je schéma konstrukčního uspořádání dle Obr. 4. Tato torzní soustava je popsána pomocí pohybových rovnic (diferenciální rovnice II. řádu), které vyjadřují momentovou rovnováhu jednotlivých těles soustavy. V obecném maticovém tvaru mají zápis, jak je uvedeno v kapitole 3.1.

4.1.1 Základní frekvenční analýza

Vlastní frekvence kmitání torzní soustavy zcela odpruženého pohonu dvojkolí jsou shrnuty v Tab. 1. Zde je uveden i zjednodušený popis vlastních tvarů kmitání s přiřazením dominantních kmitů konkrétních rotačních hmot.

Pořadí vlastního tvaru	Příslušná vlastní frekvence [Hz]	Dominantní kmitání hmot	Méně významné kmitání
1.	29	Ozubené kolo vůči kloubu duté hřídele	-
2.	62	Kola dvojkolí vůči sobě	Ozubené kolo vůči kloubu duté hřídele
3.	435	Kloub duté hřídele vůči kolu dvojkolí	Pastorek vůči rotoru
4.	570	Pastorek vůči rotoru	-
5.	873	Klouby dutého hřídele	-
6.	2451	Pastorek vůči rotoru Pastorek vůči ozubenému kolu	-

Tab. 1: Popis vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání.

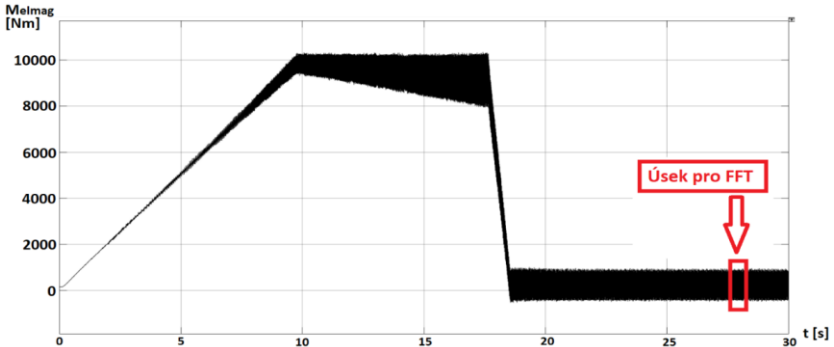
4.1.2 Zhodnocení zastoupení harmonických složek

Nejprve byly provedeny simulace za účelem zjištění zastoupení základních harmonických složek v elektromagnetickém momentu, které není stejné jako v případě zastoupení frekvencí ve statorovém proudu dle vztahů (2.26) a (2.27). Jednalo se o simulaci jízdy vozidla v ustáleném stavu – jízda konstantní rychlostí a s konstantní hodnotou hnacího momentu.

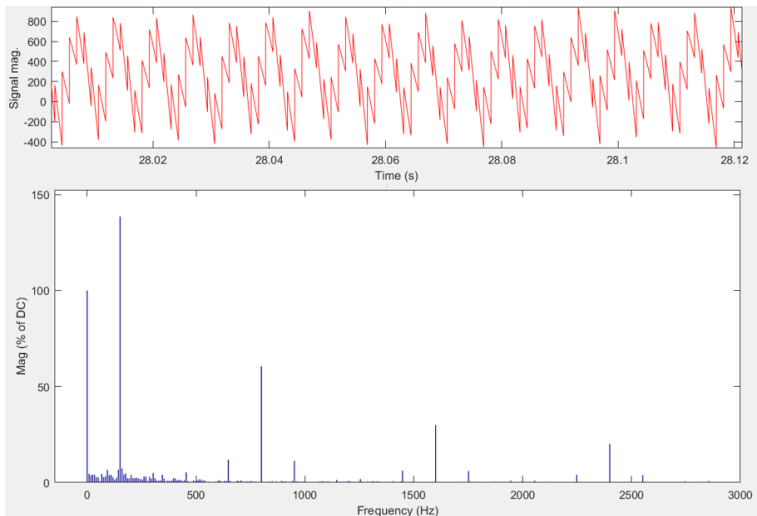
Tento jízdní cyklus se skládá ze tří následujících částí:

1. Rozjezd po momentové rampě 1000 Nms^{-1} na maximální hodnotu momentu cca 10 kNm , viz Obr. 12.
2. Setrvání na maximálním momentu motoru až po dosažení rychlosti jízdy vlaku cca 50 kmh^{-1} .
3. Po dosažení této rychlosti dojde ke snížení hnacího momentu motorů pro udržení jízdy touto konstantní rychlostí, viz Obr. 12

Průběh hnacího momentu rotoru M_{elmag} [Nm], který tento jízdní cyklus reprezentuje, je na Obr. 12.



Obr. 12: Průběh signálu elektromagnetického momentu motoru. [5]



Obr. 13: Grafické zobrazení výsledků FFT elektromagnetického momentu. [5]

Obr. 12 a z něj vycházející tabulka (Tab. 2) prezentují frekvence harmonických složek zastoupených v elektromagnetickém momentu motoru. Z výsledků FFT na Obr. 13 je vidět, že se zastoupení frekvencí v elektromagnetickém momentu neshoduje zcela se

zastoupením frekvencí ve statorovém proudu. To je dáno odlišnostmi simulačního modelu (vlivy prvků regulace a napájení) od měření těchto jevů na samostatných komponentách – cívkách. V elektromagnetickém momentu se pak spíše dá očekávat, že zastoupení harmonických složek bude dále odlišné, neb vznikne složením jevů ze třech fází střídavého asynchronního motoru.

Vyniklá frekvence [Hz]	Velikost amplitudy vyniklé frekvence vůči jmenovité hodnotě signálu [%]	Popis jevu
152	139	3. násobek f_l
800 a její násobky	65 až 20	Sudé a liché násobky spínací frekvence f_{PWM}
+/-152	10 až 0	Postranní pásma všech násobků spínací frekvence

Tab. 2: Přehled a popis vyniklých frekvencí elektromagnetického momentu. [5]

4.1.3 Simulace vybuzení rezonančního stavu

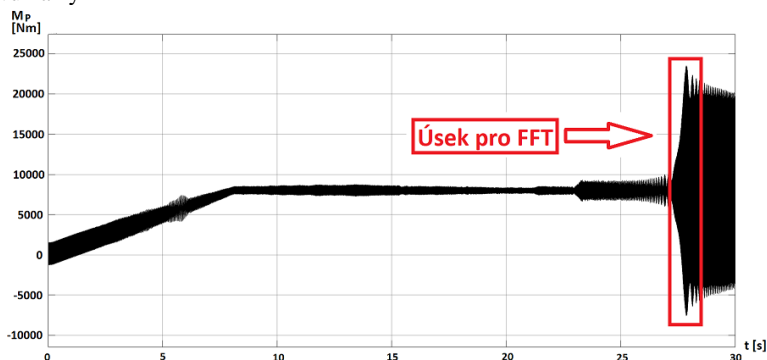
Cílem této simulace bylo odhalit nebezpečné stavy torzních oscilací (rezonanční stavy) a jejich projev z hlediska přetěžování komponent torzní soustavy. Simulace představuje rozjezd vozidla z nulové rychlosti na rychlost, při které je ještě přenášena maximální hnací síla. Tato rychlost byla určena na cca 86 kmh^{-1} a je odvozená od předpokladu minimálního poměru frekvence spínání polovodičových prvků ve střídači a frekvence první harmonické napájecího napětí asynchronního motoru. Tento poměr f_{PWM}/f_l je předpokládán minimálně 10, jakožto hodnota použitelná z hlediska dostatečného promodulování signálu napájecího napětí. Simulační model pracuje s konstantní hodnotou spínací frekvence $f_{PWM} = 800 \text{ Hz}$. S rostoucí rychlostí poměr f_{PWM}/f_l klesá.

Dále jsou výsledky simulací zaměřeny specificky na část torzní soustavy od rotoru motoru po ozubená kola převodovky. Konkrétněji po pastorek, který byl v rámci vlastních tvarů kmitů identifikován jako dominantně kmitající komponenta. Již v první simulaci bylo totiž zjištěno, že zbytek torzní soustavy je postupně od vybuzeného kmitání izolován prostřednictvím poddajných pružin $k_{C,R}$, k_{HS} , $k_{C,L}$.

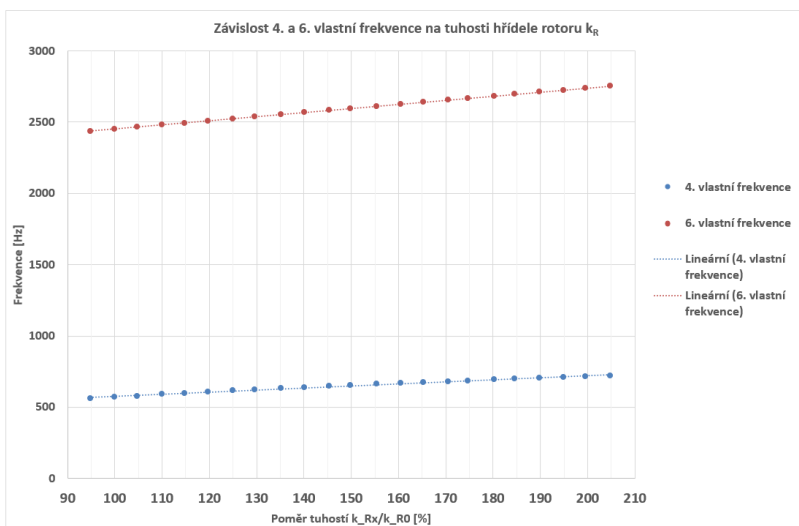
Na Obr. 14 je vidět, že při průjezdu otáčkovým spektrem došlo k vybuzení značných torzních oscilací. Frekvenční analýza odhalila, že toto enormní torzní kmitání se odehrává na frekvenci 568 Hz. Jedná se tedy o frekvenci blízkou 4. vlastní frekvenci torzní soustavy. Trojnásobek první harmonické napájecí frekvence je $3f_l = 230 \text{ Hz}$ a po jeho odečtení od hodnoty spínací frekvence 800 Hz získáme v tomto časovém okamžiku hodnoty buďící frekvence postranního frekvenčního pásma 570 Hz.

Dalším krokem bylo provedení řady simulací s různými torzními tuhostmi hřídele rotoru, který spojuje rotační hmotu rotoru motoru J_R a rotační hmotou pastorku J_P . V rámci schématu torzní soustavy zcela odpruženého pohonu tedy představuje nehmotnou torzní pružinu k_R . Zvyšováním a snižováním této torzní tuhosti byla torzní soustava přeladována. Byly zvyšovány a snižovány vlastní frekvence torzního

kmitání. To se týkalo významně 4. a 6. vlastní frekvence, neboť to jsou obě frekvence, při kterých dominantně kmitá právě pastorek. Cílem tohoto přeladování bylo přesouvání předpokládaných rezonančních stavů otáčkovým spektrem a sledování vlivu na vybuzení konkrétního rezonančního stavu.



Obr. 14: Průběh signálu hnacího momentu pastorku. [20]

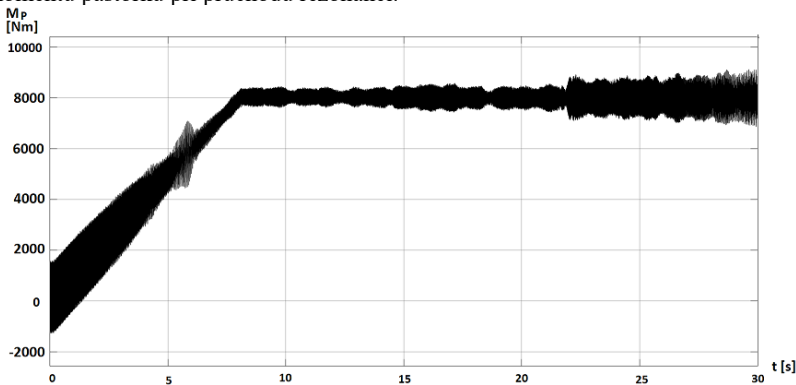


Obr. 15: Graf závislosti vlastních frekvencí na tuhosti hřídele rotoru. [20]

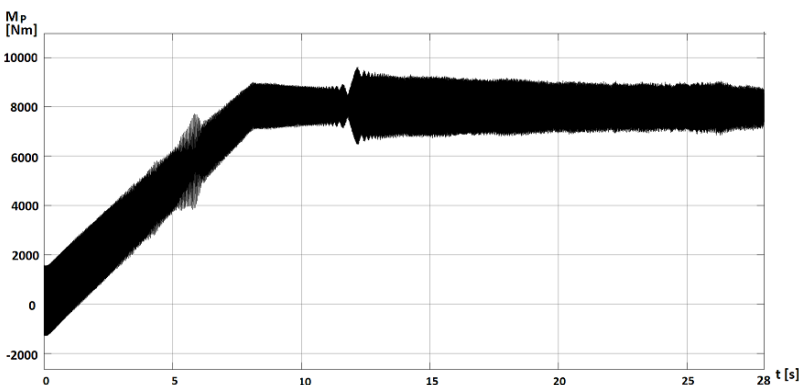
4.1.4 Analýza vlivu torzní tuhosti hřídele rotoru na vybuzení rezonančního kmitání

Výpočty a simulace byly provedeny pro řadu torzních tuhostí, které měnily 4. a 6. vlastní frekvenci torzní soustavy, jak je zobrazeno na Obr. 15. Základní torzní tuhost k_{R0} zde představuje bod 100 % na ose „x“. Tuhosti, resp. vlastní frekvence byly jednak snižovány za účelem jejich přesunutí mimo oblast budících frekvencí, pak také zvyšovány za účelem přesunutí do oblastí, kde má budící signál menší amplitudy, tedy sílu k vybuzení rezonance. Simulace se snížením torzní tuhosti na 85 % (k_{R1}) dle

předpokladů prokázala efekt „vytlačení“ rezonance mimo pásmo budících frekvencí – rezonance nenastala, viz Obr. 16. Druhou realizovanou možností eliminace rezonančního stavu bylo zvyšování 4. vlastní frekvence prostřednictvím zvýšení tuhosti k_R . Předpokladem k tomu bylo, že tím dojde k přesunu rezonance do nižších otáček, kde je lepší promodulování statorových napětí, a tedy i menší zvlnění elektromagnetického momentu motoru. Buzení má pak menší amplitudy, a tedy i menší sílu k buzení rezonance. Z hlediska reálného konstrukčního řešení hřídele rotoru je tento přístup vhodnější než metoda předchozí, tedy redukování průměru hřídele. I když i zde lze předpokládat nutnost konstrukčních úprav souvisejících dílů, jako je např. uzel labyrintového těsnění. Vliv této metody na redukcii a posun rezonančního stavu ve frekvenčním spektru buzení je vidět na Obr. 17, kde ve srovnání s Obr. 14, došlo k přesunu a výraznému snížení amplitudy rozkmitu hnacího momentu pastorku při průchodu rezonancí.



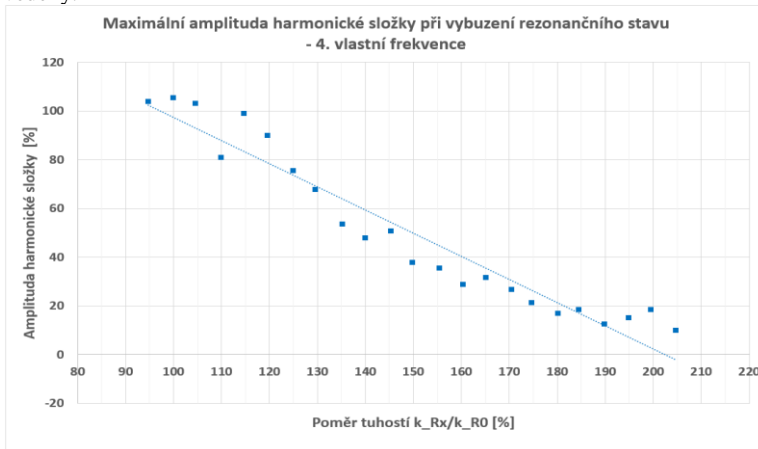
Obr. 16: Průběh signálu hnacího momentu pastorku pro k_{R1} .



Obr. 17: Průběh signálu hnacího momentu pastorku pro k_{R23} .

Zásadní je ale dále uvedený Obr. 18, který prezentuje to, jak se pro všechny dílčí varianty torzní tuhosti k_R měnila amplituda harmonické složky hnacího momentu v rezonanci – 4. vlastní frekvence. Tento obrázek celkově shrnuje výsledky

frekvenčních analýz vybuzeých rezonančních stavů 4. vlastní frekvence soustavy všech simulací. Je patrné, že s rostoucí tuhostí k_R amplituda zkoumané harmonické složky klesá. To je závěr, který potvrzuje předpoklad, na jehož základě byly simulace provedeny.



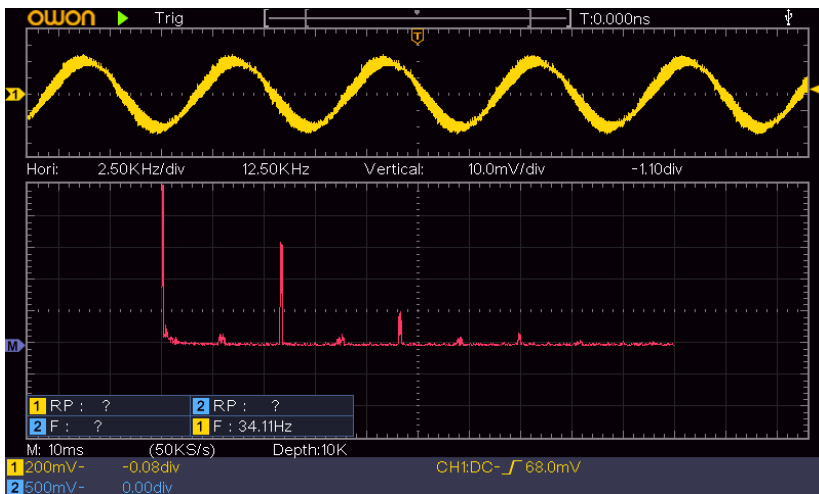
Obr. 18: Závislost amplitudy harmonické složky při vybuzení rezonančního stavu 4. vlastní frekvence. [20]

Jak již bylo výše popsáno, tak ve své disertaci jsem se specificky zaměřil na jev rezonance pastorku a možností jeho následné eliminace. Právě rezonance pastorku se ukázala jako kritický jev, když ostatní potenciální rezonanční stavy nenastaly a jeho projev v rámci zbytku torzní soustavy je postupně izolován vlivem následujících poddajností. To jsou závěry, které plynou i ze zvolených metod řešení této problematiky.

4.1.5 Stendová měření

Praktickou částí mé disertační práce byla rekonstrukce kladkového stendu se záměrem realizovat měření torzních vibrací k ověření teoretického zkoumání na simulačních modelech. V průběhu této rekonstrukce kladkového stendu v laboratořích na Julisce se podařilo rozšířit možnosti experimentálních měření nízkých součinitelů adheze a vlivu ztráty adheze v kontaktu kolo-kladka [23],[25]. Pro účely zde prezentovaného výzkumu se však nepodařilo realizovat všechny potřebné experimenty z důvodu rozměrové a výkonostní disproporcionality stendu. Kladkový stend umožňuje zástavbu průmyslového pohonu do jmenovitého výkonu cca 3kW, který lze koncepčně přirovnat k tlakovému pohonu. Jak se ukázalo, tak takovýto pohon však prakticky nedokáže navodit torzní kmitání, které jsem simuloval pro lokomotivní pohon.

K tématu vztahující se měření lze příkladně vidět na Obr. 19. Jedná se o měření a frekvenční analýzu statorových proudů hnacího motoru dvojkolí, které de facto potvrzují teoretické předpoklady o harmonických složkách statorových proudů simulovaných pomocí matematických modelů.



Obr. 19: Měření zvlnění fázového proudu hnacího motoru dvojkolí – nahoře fázový proud, dole frekvenční analýza.

5 ZÁVĚR

Disertační práce, uváděná touto tezí, navazuje na výzkum z oblasti elektromechanických jevů v trakčních pohonech kolejových vozidel. Specificky je zaměřena na zkoumání negativních vlivů harmonických složek elektromagnetického momentu trakčního asynchronního motoru na buzení torzních oscilací v mechanické části individuálního plně odpruženého pohonu dvojkolí řešeného v praxi pomocí kloubové hřídele objímající nápravu, viz Obr. 3 a možnosti jejich eliminace.

Provedené simulace odhalily to, že tyto vlivy mohou být velmi výrazné a zajisté s negativním dopadem na zatěžování komponent individuálního trakčního pohonu dvojkolí. Dále se také ukázalo to, že tyto vlivy lze eliminovat nebo alespoň omezit prostřednictvím návrhu modifikací konkrétních komponent, které směřují k přeladění torzní soustavy. Případně realizovat torzní tlumič, avšak s velmi omezenou schopností tlumení.

Tento výzkum a jeho výsledky byly realizovány prostřednictvím výpočtů a simulací v matematických modelech. Jednalo se o základní matematický model mechanické části trakčního pohonu – torzní soustavy a o komplexnější simulační model pro nasimulování jízdy vlaku. Oba modely a jejich fungování byly detailněji popsány v předešlých kapitolách. V principu oba vychází z představy o uspořádání trakčního pohonu vysoce výkonné lokomotivy, z hlediska elektrické i mechanické části a jejich vzájemného fungování.

V souvislosti s tématem tohoto výzkumu se po rekonstrukci stendu na Julisce v rámci praktické části podařilo realizovat pouze měření statorových proudů hnacího motoru. Tato měření ověřují předpoklady o zastoupení harmonických složek ve statorovém proudu, které byly definovány jako základní předpoklady pro buzení předpokládaných nebezpečných torzních oscilací.

Stran možností aplikace výsledků výzkumu z této disertace v praxi je situace značně komplikovanější. Vyžadovalo by to totiž jednak testování trakčních asynchronních motorů s reálnou regulační strukturou a jejím nastavením na zkušebně k identifikování reálných harmonických budících složek a následně značný počet zkoušek a měření torzních vibrací a momentů jednotlivých hřídelů pohonu na lokomotivě při reálných jízdách. V tomto směru je situace výzkumu a jeho aplikace do praxe obecně komplikovaná vůbec potřebami a možnostmi výrobců kolejových vozidel. Realizace takového aplikovaného výzkumu a měření sebou totiž nese enormní finanční zátěž, kterou bez podpory výrobců či provozovatelů výkonných lokomotiv není VŠ schopna sama realizovat.

Seznam použité literatury v tezi

- [1] Š. T. a.s., „Pohonné a řídicí systémy pro lokomotivy,“ ŠKODA TRANSPORTATION a.s., [Online]. Available: <https://skoda.cz/reference/pohonne-a-ridici-systemy-pro-lokomotivy>. [Přístup získán 7 prosinec 2021].
- [2] V. Dybala, „Simulace zvlnění elektromagnetického momentu asynchronního trakčního motoru lokomotivy napájeného ze střídače,“ v *Sborník konference STČ na Strojní fakultě ČVUT v Praze*, Praha, 2019.
- [3] J. Javůrek, *Regulace moderních elektrických pohonů*, Praha: Grada Publishing, a.s., 2003.
- [4] J. Kolář, “Design of a Wheelset Drive,” *Transactions on Electrical Engineering*, no. No1, pp. 11-19, 30 March 2020.
- [5] V. Dybala, „Vliv elektromagnetického momentu trakčního motoru na buzení torzních kmitů mechanické soustavy pohonu dvojkolí kolejových vozidel,“ *NOVÁ ŽELEZNIČNÍ TECHNIKA*, pp. 16-21, Zář 2021.
- [6] P. Voltr, *Měření a modelování adheze kola a kolejnice.*, Pardubice, 2017.
- [7] O. Polach, „Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit,“ v *6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, Göthenburg, June 10-13, 2003.
- [8] P. Kadeřávek and J. Pernička, “Torsion oscillations of powered wheelsets,” *Railvolution*, pp. 34-37, 2013.
- [9] M. Fleisher, „Adaptive Reduced Modal Model Identification for Arbitrarily Branched Multi-Inertia Traction Drive-Trains Michael Fleischer,“ *Proceedings of PCIM Europe 2004*, pp. 93-98, 2004.
- [10] M. Fleischer, *Modal State Control in the Frequency Domain for Active Damping of Mechanical Vibrations in Traction Drive-Trains*, Kawasaki: IEEE, 2004.
- [11] T. Fridrichovský, „SOUČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH 2021: XXV. KONFERENCE S MEZINÁRODNÍ ÚČASTÍ, SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ,“ v *Vztah mechanických a elektrických veličin v pohonech moderních kolejových vozidel*, Česká Třebová, 2021.
- [12] R. Schneider, „Torsionsschwingungen von Radsatzwellen - Systemanalyse Teil 1: System - und Modellbeschreibung,“ *ZEVrail*, November-Dezember 2017.

- [13] R. Schneider, „Torsionsschwingungen von Radsatzwellen - Systemanalyse Teil 2: Physikalische Untersuchungen und Sicherheitsbetrachtung,“ *ZEVrail*, pp. 27-39, Januar-Februar 2018.
- [14] Yu, Mínyi; Breuer, Werner;, „Energie-Methode: Vorhersage des maximalen dynamischen Torsionsmomentes,“ v *16. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, Dresden, 2018.
- [15] T. Szolc, R. Konowrocki, M. Michajlow a A. PREGOWSKA, „An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine systems driven by asynchronous motors,“ *Mechanical Systems nad Signal Processing*, sv. 49, č. 1-2, pp. 118-134, May 2014.
- [16] M. W. WINTERLING, Delft: Delft University Press, Mekeleg 4, 2628 CD delft, The Netherlands, 1997, p. 193.
- [17] V. Dybala, „Vliv regulace na frekvenční složení fázových proudů a elektromagnetického momentu při simulování napájení asynchronního motoru ze střídače,“ v *Súčasně problémy v kolajových vozidlách - PRORAIL 2019. Diel I*, Žilina, 2019.
- [18] V. Dybala, M. Libenský, B. Šulc a C. Oswald, „Slip and Adhesion in a Railway Wheelset Simulink Model Proposed for Detection Driving Conditions Via Neural Networks,“ v *SBORNÍK vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, Řada strojní*, Ostrava, 2018.
- [19] R. I. Popovici, *Friction in Wheel - Rail Contacts*, Enschede, The Netherlands : University of Twente, 2010.
- [20] V. Dybala, „The electromagnetically excited resonance of the pinion in fully-suspended drive of a locomotive and its sensitivity on the torsion stiffness of its rotor shaft,“ v *Sborník abstraktů konference STČ*, Praha, 2021.

Publikace související s tématem disertace

- [2] V. Dybala, „Simulace zvlnění elektromagnetického momentu asynchronního trakčního motoru lokomotivy napájeného ze střídače,“ v *Sborník konference STČ na Strojní fakultě ČVUT v Praze*, Praha, 2019.
- [5] V. Dybala, „Vliv elektromagnetického momentu trakčního motoru na buzení torzních kmitů mechanické soustavy pohonu dvojkolí kolejových vozidel,“ *NOVÁ ŽELEZNIČNÍ TECHNIKA*, pp. 16-21, Září 2021.
- [17] V. Dybala, „Vliv regulace na frekvenční složení fázových proudů a elektromagnetického momentu při simulování napájení asynchronního motoru ze střídače,“ v *Súčasně problémy v kolajových vozidlách - PRORAIL 2019. Diel I*, Žilina, 2019.
- [18] V. Dybala, M. Libenský, B. Šulc a C. Oswald, „Slip and Adhesion in a Railway Wheelset Simulink Model Proposed for Detection Driving Conditions Via Neural Networks,“ v *SBORNÍK vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, Řada strojní*, Ostrava, 2018.
- [20] V. Dybala, „The electromagnetically excited resonance of the pinion in fully-suspended drive of a locomotive and its sensitivity on the torsion stiffness of its rotor shaft,“ v *Sborník abstraktů konference STČ*, Praha, 2021.

- [21] V. Dybala, „KALKER'S COEFFICIENT c_{11} AND ITS INFLUENCE ON THE DAMPING AND THE RETUNING OF A MECHANICAL DRIVE TORSION SYSTEM OF A RAILWAY VEHICLE,“ Acta Polytechnica CTU Proceedings, 2021.
- [22] V. Dybala, „Elektromagneticky vybuzené rezonanční stavy membránové spojky a pastorku zcela odpruženého pohonu,“ v SOUČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH 2021: XXV. KONFERENCE S MEZINÁRODNÍ ÚČASTÍ, Česká Třebová, 2021.
- [23] V. Dybala, P. Bauer a T. Fridrichovský, „Využití tenzometrie pro měření součinitele adheze na kladkovém stavu ČVUT,“ NOVÁ ŽELEZNIČNÍ TECHNIKA, pp. 26-29, Únor 2021.
- [24] V. Dybala, „Research tools applicable in design of high-speed and high-power rail vehicles,“ v Studentská vědecká konference Vysokorychlostní trať - budoucnost české železnice IRICoN 2020, Praha, 2020.
- [25] V. Dybala, „The measurement of the influence of the adhesion loss on the dynamic load of the drive reaction rod on the roller rig,“ v Studentská vědecká konference - Nové technologie a logistika na železnici, Praha, 2022.

Anotace

Konstrukce moderních kolejových vozidel se postupným vývojem dostávají na meze fyzikálních možností. Takové extrémy však mohou vést ke vzniku vad, které mají podstatu v různých fyzikálních jevech a je nutné je následně zkoumat. V této práci se zabývám analýzou jevu torzních vibrací v mechanické části zcela odpruženého individuálního pohonu dvojkolí vysoce výkonné lokomotivy. Cílem mé práce je kvalifikace buzení těchto torzních oscilací od harmonických složek elektromagnetického momentu a stanovení možnosti jejich eliminace v rámci konstrukce mechanické části trakčního pohonu – torzní soustavy. V podmínkách laboratoře je mým cílem měřit a prezentovat existenci vyšších harmonických složek satorových proudů hnacího motoru dvojkolí na kladkovém stavu. Ty jsou podstatou existence uvažovaných buďících harmonických složek elektromagnetického momentu.

Summary

The design of modern railway vehicles reaches limits of physical abilities. But these extremes can lead to a formation of defects, which have its essence in different physical phenomena and they need to be researched subsequently. In this thesis I have been focused on an analysis of a torsion vibrations phenomenon in a mechanical part of a fully-suspended individual drive of a high-power locomotive wheel-set. The goal of my work is to evaluate an excitation of these torsion oscillations, which has its origin in harmonic components of an electromagnetic torque of an asynchronous traction motor and to determine possibilities of their elimination within the design of the mechanical part of the traction drive – the torsion system. Within conditions of a laboratory my goal is to measure and to present an existence of higher harmonic components of stator currents of a driving motor. This motor drives a wheel-set in the roller rig. The harmonic components of stator currents are the essence of considered harmonic components of the electromagnetic torque.