

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV U12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Dynamické vlastnosti pohonů moderních kolejových vozidel

Tomáš Fridrichovský

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."

Název anglicky: Dynamic properties of drives of modern railway vehicles

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu U12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Tomáš Fridrichovský

Ústav U12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4

166 07 Praha 6 - Dejvice

Školitel: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

Ústav U12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4

166 07 Praha 6 - Dejvice

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.

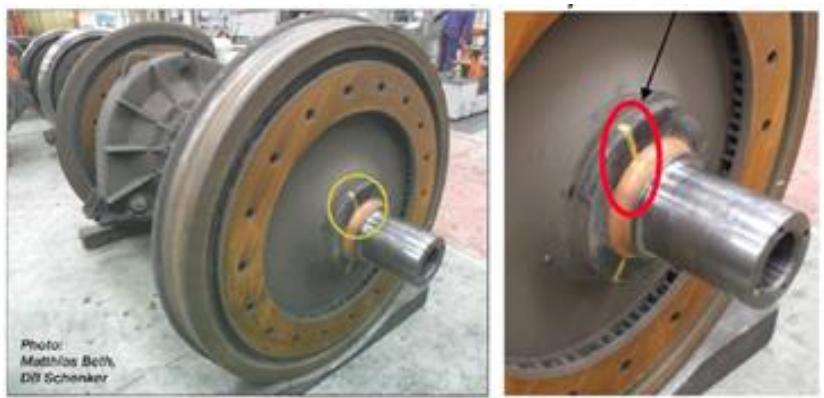
S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

předseda oborové rady oboru

Fakulta strojní ČVUT v Praze

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Doktorská práce se zabývá problematikou torzního kmitání hnacích dvojkolí moderních kolejových vozidel. Torzní kmitání dvojkolí je poměrně známým jevem, kterého si lze v běžném životě všimnout například při průjezdu tramvají ostrým obloukem (zpravidla křižovatkou), kdy začne vozidlo vydávat vysoké tóny. Jde o situaci, kdy jedno kolo dvojkolí kmitá vůči druhému a náprava se při tom mírně zkrucuje. Tento jev byl díky okolnostem v uplynulém desetiletí často diskutován a byl cílem mnoha výzkumů a publikací nejrůznějších autorů.



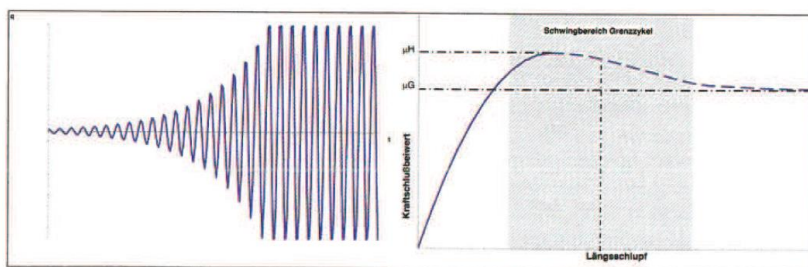
Obr. 1 Vlevo dvojkolí lokomotivy TRAXX s vyznačením výskytu závady. Vpravo detail kola pootočeného vůči nápravě [14]

Problematika torzního kmitání dvojkolí vešla ve známost v roce 2009 [14], kdy se začalo více diskutovat o jeho výskytu a možném negativním vlivu na jednotlivé části pohonu. Příčinou byla detekce mírného pootočení lisovaného spoje kola a nápravy na jednom z dvojkolí lokomotivy Německých drah (DB) z rodiny TRAXX, viz detail na obr 1. Pootočení kola v jakékoliv míře značí selhání pevnosti lisovaného spoje. Ten nejen že brání vzájemné rotaci obou součástí, ale také jejich vzájemnému posouvání podél osy rotace (nápravy). To může v extrémním případě (průjezd obloukem, jízda po výhybce) vést k nepřijatelnému zmenšení rozkolí a v konečném důsledku i vykolejení vozidla.

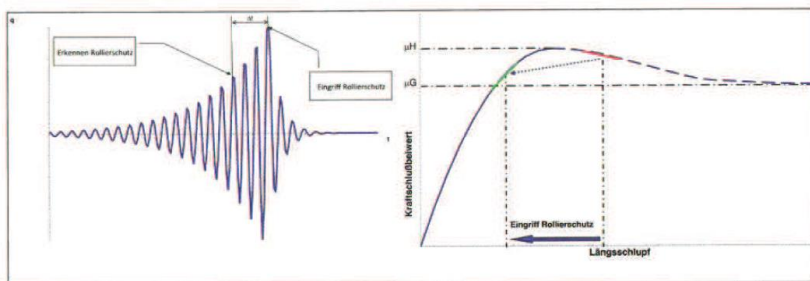
Jedním z prvních článků, které se zabývaly možnou problematikou torzního kmitání, byl příspěvek od autorů Kadeřávka & Perničky [14]. Tento článek popisoval historii problematiky, a rizika s ní spojená.

Detailnějším popisem dvojkolí, jakožto mechanického oscilátoru (kterým dvojkolí v zásadě je) se zabývali autoři Benker a Weber [15]. Autoři se zaměřili na dvojkolí jakožto na mechanický oscilátor, protože v tomto případě

Lze kolo chápat jako hmotnost a nápravu jako pružinu s určitou tuhostí. Silovou vazbu mezi kolem a kolejnicí pak lze chápat jako tlumič a to silně nelineární. Celá tato soustava je pak buzena vnějšími silovými účinky – především se jedná o kvazistatickou rovnováhu mezi hnacím momentem trakčního motoru a adhezní sílu v kontaktu kolo-kolejnice. V rámci výzkumu se zabývali chováním dvojkolí při překročení meze adheze a následném chování pracovního bodu. Uvažují se dva scénáře – 1. pracovní bod zůstává v nestabilní oblasti – dvojkolí se rozkmitává do svého maxima, viz obr. 2; 2. pracovní bod se vrátí do stabilní oblasti – oscilace se utlumí, viz obr. 3. Kde pracovním bodem se rozumí velikost skluzu mezi kolem a kolejnicí (Längsschlupf) a tomu dopovídající součinitel tření/třecí síla (Kraftschlußbeiwert), viz křivky na obr. 2 a obr 3. (vždy v levé části obrázku).

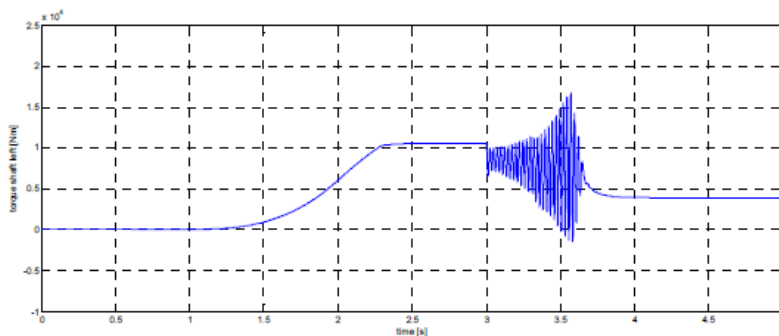


Obr. 2 Vlevo dvojkolí lokomotivy TRAXX s vyznačením výskytu závady. Vpravo detail kola pootočeného vůči nápravě Pracovní bod v oblasti Grenzykel bez snížení hnacího momentu – dvojkolí torzně téměř volně kmitá s určitou maximální amplitudou. [15]

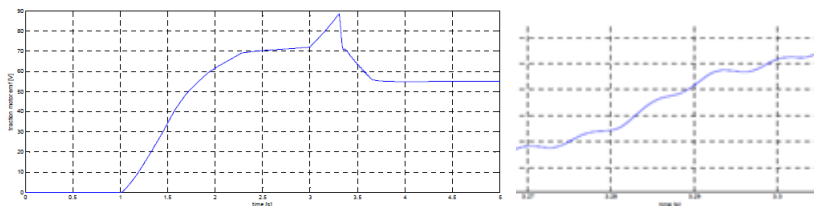


Obr. 3 Redukce hnacího momentu vede na posun pracovního bodu zpět do stabilní části charakteristiky. Popis obrázku – Levá část znázorňuje rozvoj oscilací v čase, zaznamenání oscilací (Erkennen Rolierschutz) a zásah ochrany (Eingriff Rolierschutz) s určitým časovým zpožděním Δt . Pravá část znázorňuje posun pracovního bodu mezi nestabilní a stabilní oblastí charakteristiky. [15]

Z hlediska elektromechanického popisu pohonného řetězce (přenos síly mezi trakčním motorem a kolejnicí) a možností detekce oscilací u kolejového vozidla se zabývali autoři Markovic, Kostic a Bojovic [16]. Na zjednodušeném modelu pohonu stejnosměrné lokomotivy ukázali, že v okamžiku, kdy dochází ke zhoršení adhezních podmínek vedoucích k prokluzu kola, dochází k rozkmitání dvojkolí. To se projevuje i na průběhu hnacího momentu a především napětí v samotném trakčním motoru, viz zvlnění na obr. 5.



Obr. 4 Torzní oscilace dvojkolí modelu – časový průběh zkroucení dvojkolí při rozkmitání dvojkolí [16]



Obr. 5 Průběh napětí při prokluzu včetně detailu zvlnění [16]

Kromě popisu jevu, jeho detekce se některé práce zaměřovaly i na možnosti redukce – např. formou dynamického hltiče v podobě brzdových kotoučů umístěných na kolech dvojkolí, viz Bieker, Dede, Dörner, Klein a Pusnik [17].

Problematika torzního kmitání zasahuje do mnoha oborů. Jde o problémy čistě mechanické, elektrické a tribologické. To vytváří poměrně široké pole působnosti, ale zároveň zesložituje možnosti popisu dané problematiky, které tak vždy vedlo na určitou míru idealizace popisu elektro-mechanické soustavy.

Z jejího popisu vyplývá, že problém torzních oscilací je obecně spojen se změnou, případně ztrátou adheze mezi kolem a kolejnicí. To má za důsledek uvolnění energie naakumulované v nápravě dvojkolí, které se díky tomu rozkmitá. To, zda se kmity utlmí, anebo začnou rozvíjet je otázkou vnějších podmínek (kvalita adheze, hnací moment, vliv regulace atd.).

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce následující body:

- Tvorba vhodného simulačního prostředku pro analýzu dynamických dějů v pohonech moderních kolejových vozidel, který by dostatečně podrobně popisoval jak mechanické, tak elektrické děje v pohonech těchto vozidel a umožňoval jejich real-time propojení.
- Definice kritérií nutných pro vznik torzních oscilací dvojkolí za situace, kdy se vozidlo pohybuje po jízdni dráze a pracuje s definovanými hodnotami výkonu při současné proměnlivosti vnějších provozních podmínek. Pro zlepšení představy o maximálních hodnotách oscilací a případné indikace.
- Nalézt možnosti detekce a následné redukce torzních oscilací. Navrhnout metodu pro ochranu hnacích dvojkolí před vlivem torzních oscilací a vyzkoušet prostřednictvím vytvořených prostředků - modelů.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Pro řešení cílů práce byly zvoleny simulační metody. To je dáno jednak komplikovanou organizací zkoušek vozidel (příprava tratě, vozidla, personálu; finance), ale také minimální upravitelností parametrů u reálného vozidla (mechanických i softwarových). Pro tyto účely byly vytvořeny matematické modely. Jejich parametry byly uvedeny v [3], základní členění modelů je následující:

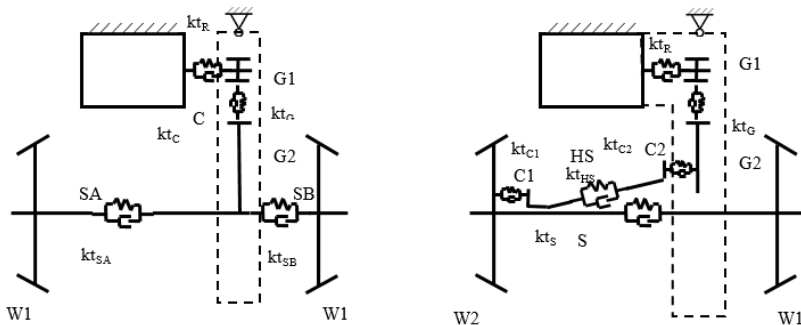
- Zjednodušený simulační model individuálního pohonu dvojkolí čtyřnápravové elektrické lokomotivy ve variantách:

- a) s plně odpruženým pohonem dvojkolí
- b) s částečně odpruženým pohonem dvojkolí.

- Pokročilý simulační model čtyřnápravové elektrické lokomotivy ve variantách:

- c) s plně odpruženým individuálním pohonem dvojkolí
- f) s částečně odpruženým pohonem dvojkolí.

K analýze bylo zvoleno vozidlo odpovídající moderním lokomotivám. Zde konkrétně byla inspirace čerpána z lokomotivy Siemens Vectron a Škoda řady 380. Schematické znázornění obou typů pohonů včetně rozdělení na základní komponenty je uvedeno na obr 6 [1,2 a 4].



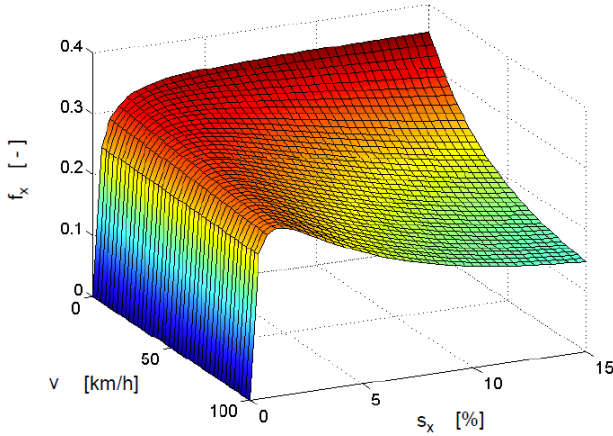
Obr. 6 Schéma částečně a zcela odpruženého pohonu lokomotivy

Základní komponenty (kola, hřídele apod.) byly uvažovány ve zjednodušené podobě. Hmotové vlastnosti všech dílčích částí byly centralizovány do bodů a opatřeny danými mechanickými vlastnostmi. Pružné vlastnosti pak byly nahrazeny formou lineárních torzních pružin. Model by vytvořen v SW Matlab Simulink.

Tvorba modelu zahrnovala jak mechanickou část samotného pohonu, tak také část elektrickou (model asynchronního motoru včetně regulace) a část adhezni (přenos tečných třecích sil mezi kolem a kolejnicí).

Adhezní model byl založen na Polachově teorii přenosu tečných sil dle upraveného vzorce (1). Jed o vztah mezi rychlostí skluzem, rychlostí atd.

$$\mu = \left(1 - e^{-\frac{s_x}{c}}\right) \cdot \mu_0 \cdot [(1 - A) \cdot e^{-B \cdot v_{sk}} + A] \quad (1)$$



Obr. 7 Skluzová charakteristika s vlivem skluzu a rychlosti vozidla [18]

Model asynchronního motoru je dán napěťovými a tokovými rovnicemi. Ty obsahují veličiny elektrické, ale také mechanickou rychlost otáčení ω_m .

$$u_{1\alpha}(t) = R_1 i_{1\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{1\alpha}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$u_{1\beta}(t) = R_1 i_{1\beta}(t) + \frac{d\Psi_{1\beta}(t)}{dt} \quad (3)$$

$$u_{2\alpha}(t) = R_2 i_{2\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} + p_p \omega_m(t) \Psi_{2\beta}(t) = 0 \quad (4)$$

$$u_{2\beta}(t) = R_2 i_{2\beta}(t) + \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} - p_p \omega_m(t) \Psi_{2\alpha}(t) = 0 \quad (5)$$

$$u_{1\alpha}(t) = R_1 i_{1\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{1\alpha}(t)}{dt} \quad (6)$$

$$u_{1\beta}(t) = R_1 i_{1\beta}(t) + \frac{d\Psi_{1\beta}(t)}{dt} \quad (7)$$

$$u_{2\alpha}(t) = R_2 i_{2\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} + p_p \omega_m(t) \Psi_{2\beta}(t) = 0 \quad (8)$$

$$u_{2\beta}(t) = R_2 i_{2\beta}(t) + \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} - p_p \omega_m(t) \Psi_{2\alpha}(t) = 0 \quad (9)$$

Převod střídavých veličin na analogii stejnosměrných je řešen pomocí Parkovi transformace.

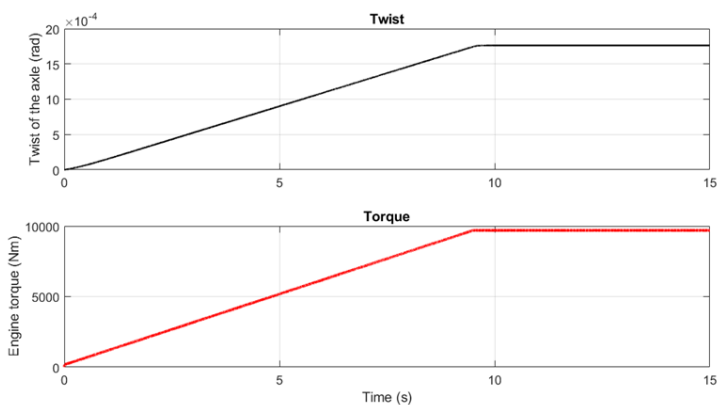
$$i_{1d}(t) = i_{1\alpha}(t) \cos \gamma(t) + i_{1\beta}(t) \sin \gamma(t) \quad (10)$$

$$i_{1q}(t) = -i_{1\alpha}(t) \sin \gamma(t) + i_{1\beta}(t) \cos \gamma(t) \quad (11)$$

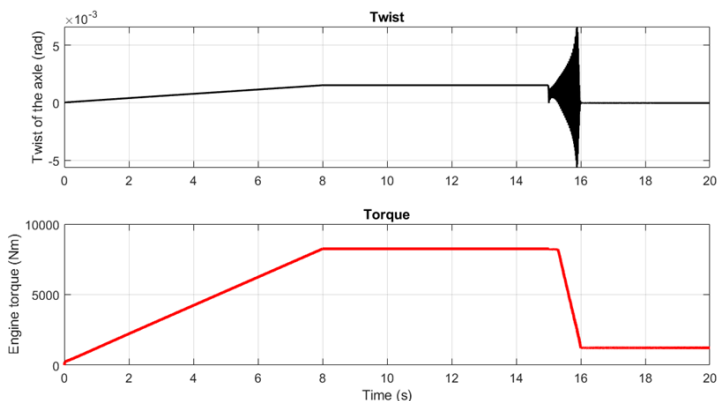
Kde veličiny $i_{jk}(t)$ jsou okamžité hodnoty proudů, úhel γ je fázový posuv mezi dvojicí souřadných systémů. V tomto případě přepočít ze souřadnic statoru (souřadnice α, β) na jeho točivé magnetické pole (souřadnice d, q). Přepočít tak umožňuje dívat se na střídavý stroj jako na stejnosměrný, tzn. řídit ho stejnosměrným proudem podle následujícího vztahu:

$$M(t) \approx k \cdot i_{1q}(t) \quad (12)$$

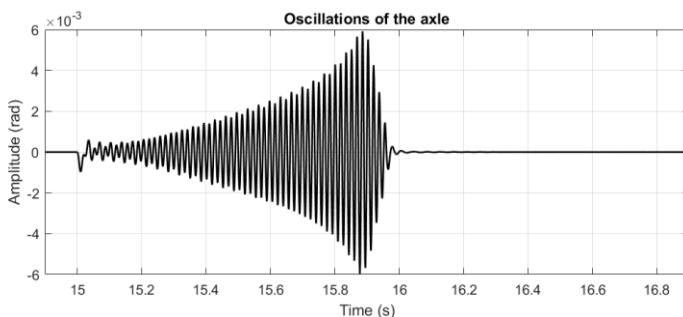
V rámci simulací byly sledovány a vyhodnocovány veličiny jako jsou moment trakčního motoru, zkroucení nápravy, ale také elektrické veličiny v pohonu a další. Cílem bylo v průběhu krátkých simulací vysledovat spojitosti mezi elektrickými a mechanickými vlastnostmi pohonu díky přítomnosti rychlosti v rovnicích (4) a (5). Na základě těchto výsledků pak byla hledána možná opatření proti výskytu oscilací a cesty jejich redukce. Podstatou bylo uvést vozidlo do požadovaného stavu (rychlost, velikost hnací síly) a provést zásah do okolních podmínek – např. změna adheze [6,7].



Obr. 8 Časový průběh zkroucení nápravy při zvýšení momentu

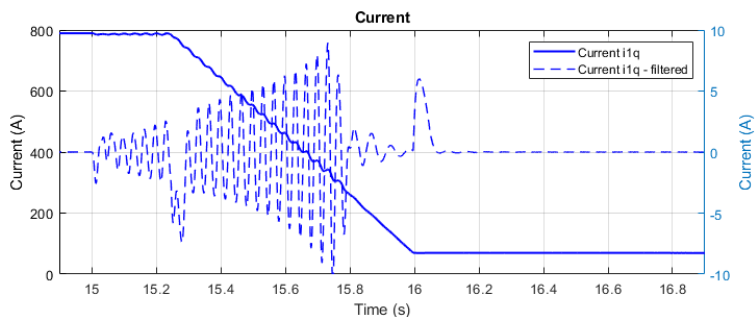


Obr. 9 Časový průběh zkroucení nápravy při ztrátě adheze a rozkmitání kol



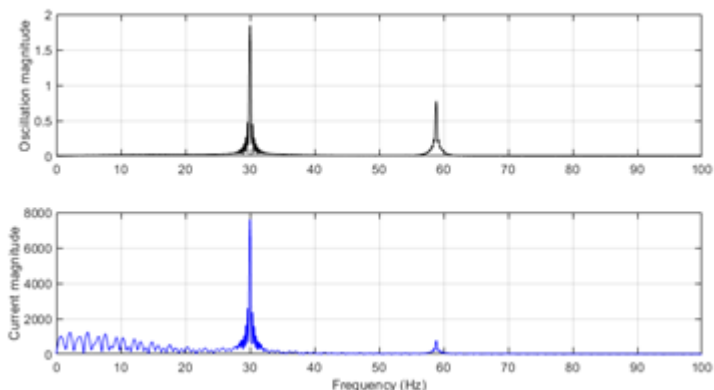
Obr. 10 Detail torzních oscilací dvojkolí po vyfiltrování

Kromě veličin mechanických byla zaměřena pozornost i na veličiny elektrické, zde konkrétně na řídicí proud i_{1q} , který řídí velikost hnacího momentu asynchronního stroje a který vykazuje oscilace [5,8].



Obr. 11 Detail řídicího proudu i_{1q} v okamžiku rozkmitání dvojkolí

Měřením a vyhodnocením bylo zjištěno, že frekvence oscilací dvojkolí a proudových veličin jsou totožné, viz obr. 12. To znamená, že sledováním průběhu proudu lze vyhodnotit aktuální stav dvojkolí.



Obr. 12 Spektrální výkonová hustota oscilací dvojkolí a proudu i_{1q} při jeho prokluzu vykazuje stejné dominantní frekvence

Otázkou tohoto přístupu je, zda lze sledováním proudů nejenom detekovat přítomnost oscilací, ale zároveň také určit amplitudu těchto oscilací a na základě toho rozhodnout o dalším chování regulace pohonu - tj. doplnit regulační strukturu o informaci, zde je nutno provést regulační zásah, anebo nikoliv, aby se zabránilo výrazným amplitudám dvojkolí, které mohou být nebezpečné [8,9,10].

Z tohoto důvodu byly pozorovány amplitudy oscilací dvojkolí a chování proudových veličin. Pro různé průběhy byly odečítány hodnoty amplitud a vzájemně porovnávány. Cílem bylo najít koeficient – poměr mezi dvojití amplitud.

Zcela odpružený pohon – prokluz R									
Rychlost (m.s ⁻¹)	5			10			20		
Moment (%)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
φ (rad)	1,8E-04	1,3E-03	2,0E-03	2,4E-04	1,5E-03	1,8E-03	6,0E-03	1,3E-03	1,3E+00
Δi (A)	1	2,3	3	1	2,3	3	10	3	3
K (A/rad)	5,6E+03	1,8E+03	1,5E+03	4,2E+03	1,5E+03	1,7E+03	1,7E+03	2,3E+03	2,3E+00

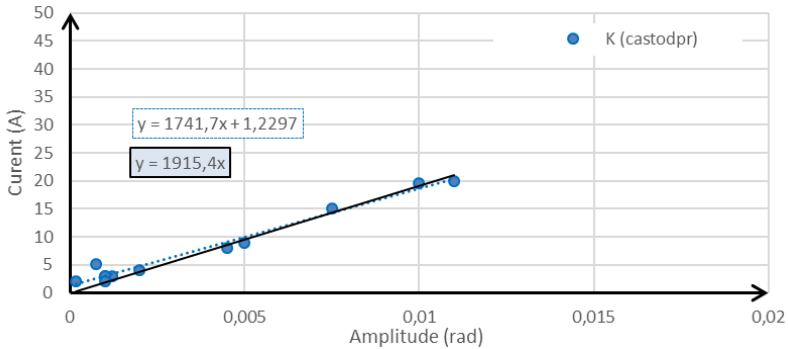
Tab. 1 Hodnoty průměrných amplitud oscilací a proudů při prokluzu pravého kola u lokomotivy se zcela odpruženým pohonem

Podobné tabulky byly vytvořeny pro všechny typy pohonů a zkušeny při různých pracovních podmínkách (rychlost, hodnota momentu...). Podstatné je, že zpravidla vždy bylo možné odečíst řádově podobná čísla.

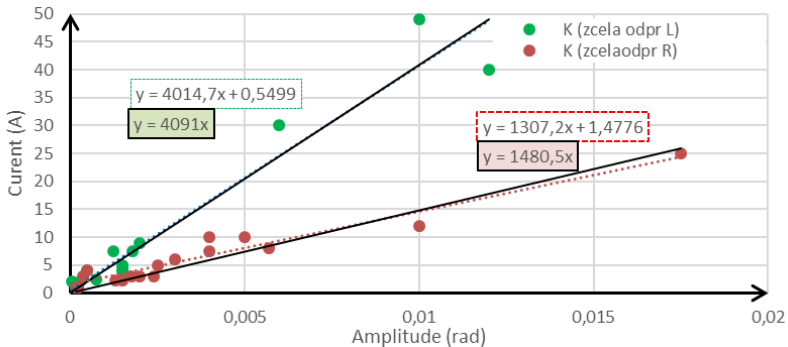
Výsledný poměr byl dán vztahem (13).

$$K \left[\frac{A}{rad} \right] = \frac{\Delta i}{\varphi} \quad (13)$$

Tyto hodnoty byly následně převedeny do grafické závislosti a proloženy lineární funkcí [13].



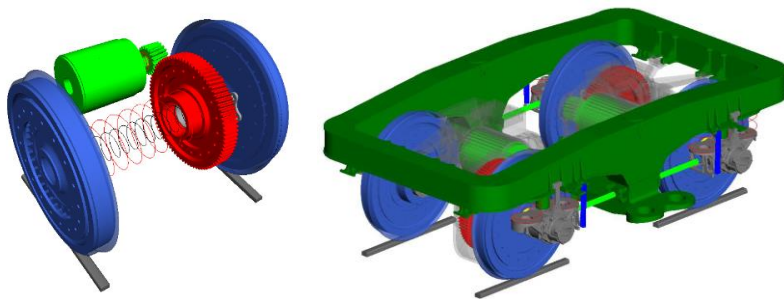
Obr. 13 Závislost oscilací nápravy a proudu částečně odpruženého pohonu



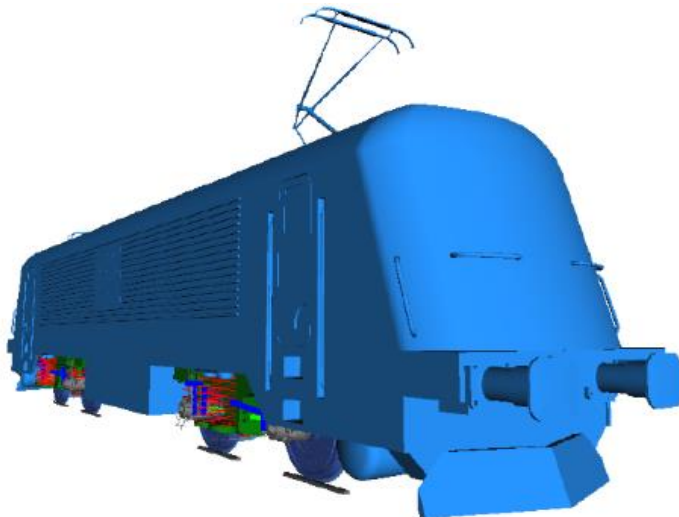
Obr. 14 Závislost oscilací nápravy a proudu zcela odpruženého pohonu

Poznanky ze zjednodušeného modelu byly následně aplikovány do porokočilé varianty modelu. Ta uvažuje celé vozidlo jedoucí po reálné trati (oblouk, přímá) s uvažovanou zátěží atd. Při sestavování byly opět uvažovány dva typy pohonů – částečně a zcela odpružený pohon [11].

Pro tvorbu tohoto modelu byl použit SW Simpack.



Obr. 15 Submodely modelu lokomotivy (pohon a podvozek)



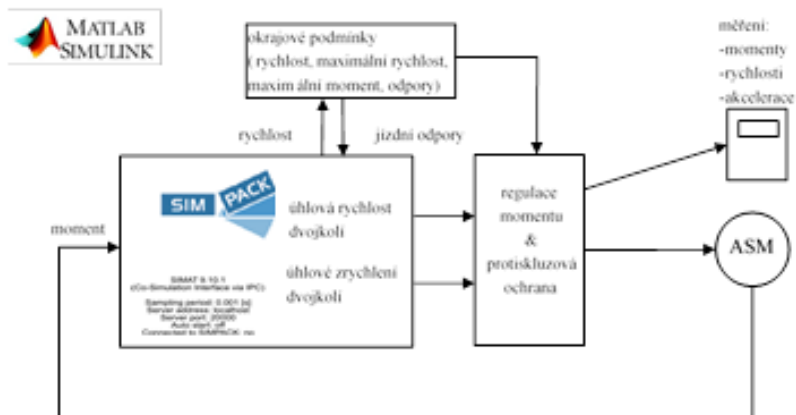
Obr. 16 Kompletní model lokomotivy

Část řídicí struktury včetně modelu asynchronního motoru byly převzaty ze zjednodušené varianty modelu. Propojení mezi SW Matlab Simulink a Simpack bylo realizováno prostřednictvím modulu programu Maltab-Simat. Schéma řídicí struktury včetně vnějších podmínek jsou na obr. 17. Základem struktury je blok modulu Simat (s logem Simpack), na který je navázáno okolní rozhraní (vstupy, měření, vyhodnocení...).

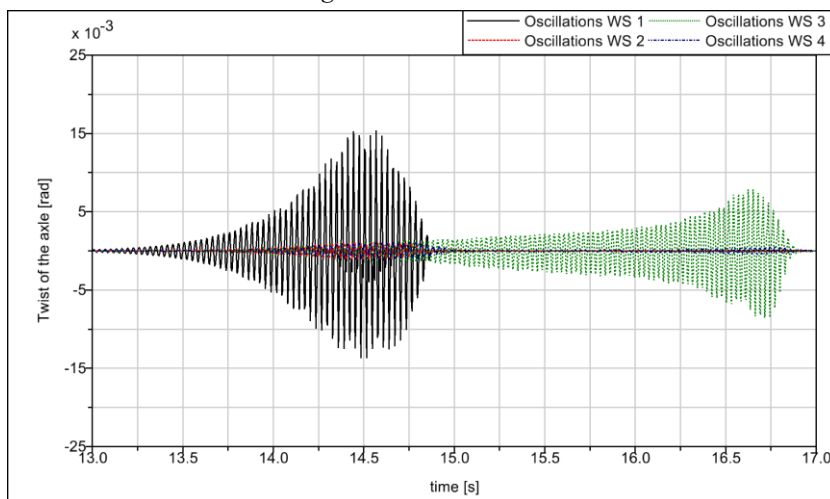
Výhodou SW Simpack je snadná tvorba modelu a aplikace vnějších vlivů, např. jízda obloukem, která je v prostředí jednoduchého modelu poměrně složitě postižitelná.

Časový průběh takového scénáře je znázorněn na obr. 18, kde byly vybudeny poměrně vysoké amplitudy oscilací. Problémem bylo, že protiskluzová ochrana nebyla schopna tyto oscilace zaznamenat dostatečně rychle a umožnila

jim rozvinout se do poměrně vysokých hodnot. Zásah protiskluzové ochrany byl vyvolán až poměrně značným rozkmitáním rotoru trakčního motoru, který vyvolal regulační zásah.



Obr. 17 Regulační struktura MBS modelu

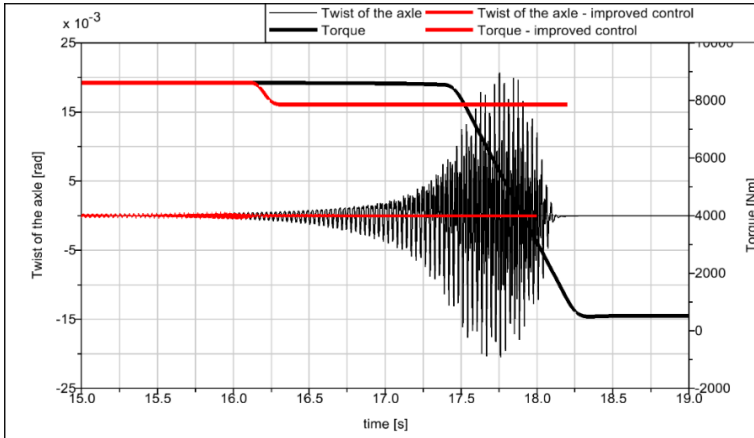


Obr. 18 Regulační struktura MBS modelu

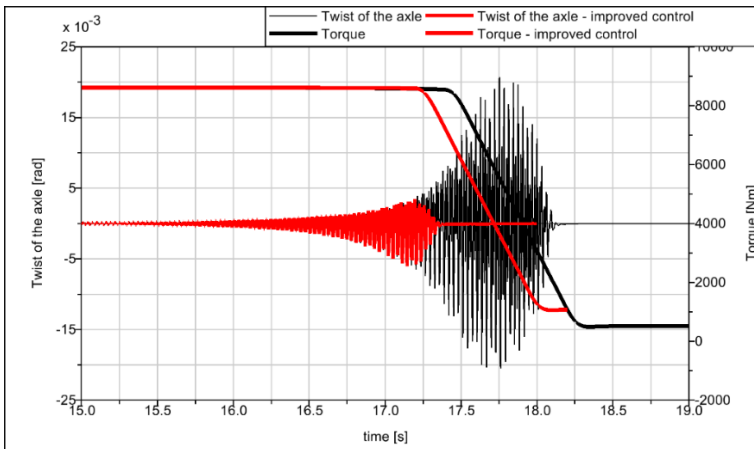
Z toho důvodu byl do modelu aplikován poznatek ze sledování produkčních veličin a protiskluzová ochrana byla doplněna o nastavbový člen pro vyhodnocení přítomnosti oscilací jejich amplitud. Výstupy této implementace jsou součástí další kapitoly.

4. VÝSLEDKY

Aplikací nadřazené regulační struktury bylo možné dostatečně včas zaznamenat vznik oscilací. Protiskluzová ochrana tak mohla podstatně rychleji snížit velikost hnacího momentu a tím snížit maximální amplitudu oscilací, případně jim nedovolit se nijak rozvinout. Srovnávací průběhy mezi původní a pokročilou řídicí strukturou jsou na obr. 19 a 20.



Obr. 19 Vliv aplikace sledování proudů v oblouku R250 – standardní stav (černá) vs. upravené řízení (červená); záznam mírného prokluzu dvojkolí. Sledování hodnot momentu (torque) a zkrutu nápravy (twist).



Obr. 20 Vliv aplikace sledování proudů v oblouku R250 – standardní stav (černá) vs. upravené řízení (červená); záznam velkého prokluzu dvojkolí. Sledování hodnot momentu (torque) a zkrutu nápravy (twist).

5. ZÁVĚR

Na základě zvýšeného výskytu vad dvojkolí v uplynulých letech byl zaměřen výzkum na torzní kmitání v pohonech kolejových vozidel. Tato práce popisovala jeden z mnoha přístupů k řešení otázky, co je to torzní kmitání, jak se projevuje a jaké jsou možnosti jeho detekce, případně potlačení.

Pro tento účel byla vytvořena dvojice simulačních modelů – zjednodušený model dvojkolí a komplexní model celého vozidla. Tyto modely popisovaly dnes běžně používané koncepce pohonů kolejových vozidel, které lze běžně potkat na železničních tratích celého světa.

Modely byly použity k navození situací, kdy se dvojkolí nebezpečně rozkmitává a následnému pozorování těchto dějů.

Z provedených simulací a jejich vyhodnocení vyplynulo, že existuje přímá vazba mezi mechanickou a elektrickou částí pohonů a že je možné této vazby využít pro účely regulace a ochrany dvojkolí. S ohledem na zjištěné vazby mezi mechanickou a elektrickou částí byl vytvořen systém řízení určený k detekci a následné redukci oscilací a následně ozkoušen.

Publikace související s tématem disertace

- [1] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, Analýza výskytu torzních kmitů v pohonech moderních kolejových vozidel. Železničná doprava a logistika. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2015(11), 34-37. ISSN 1336-7943.
- [2] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2015. Analýza výskytu torzních kmitů v pohonech moderních kolejových vozidel: Z15 - 25. Praha. Výzkumná zpráva. ČVUT.
- [3] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2015. Optimization of Construction of Wheelset Drives Used in Modern Railway Vehicles. In: Studentská tvůrčí činnost 2015. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015, s. 1-12. ISBN 978-80-01-05727-8. Dostupné také z: Available from: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5550.pdf>
- [4] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2015. Analýza výskytu torzních kmitů v pohonech moderních kolejových vozidel. In: XXII. Medzinárodná konferencia Súčasné problémy v koľajových vozidlách – Zborník prednášok Diel I.. Žilina: Žilinská universita, Strojnícka fakulta, 2015, s. 135-141. ISBN 978-80-89276-48-6. **(INDEXOVÁNO NA WEB OF SCIENCE)**
- [5] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2016. Analysis of occurrence of torsion oscillations in wheelset drives used in modern railway vehicles. In: Studentská tvůrčí činnost 2016 - sborník konference. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. ISBN 978-80-01-05929-6.
- [6] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš a Bohumil ŠULC, 2016. Investigation of Torsional Oscillations in Railway Vehicles. In: 20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016). Athens: MATEC Web Conf., s. 5. DOI: 10.1051/mateconf/20167602052. ISSN 2261-236X. **(INDEXOVÁNO VE SCOPUS A WEB OF SCIENCE)**
- [7] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš a Bohumil ŠULC, Occurrence of Torsional Oscillations in Railway Wheelsets. WSEAS Transactions on Systems. 2016(15), 252-261. ISSN 1109-2777.

- [8] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2017. Ovlivnění mechanických a elektrických veličin v pohonech moderních kolejových vozidel: Z16 - 17. Praha. Výzkumná zpráva. ČVUT.
- [9] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2017. Analysis of Occurrence of Torsion Oscillations in Wheel-set Drives Used in Modern Railway Vehicles. In: Proceedings of the 10th international conference on railway bogies and running gears (Bogie'16). Budapest: Scientific Society of Mechanical Engineers, 2017, s. 101-108. ISBN 978-963-9058-38-5.
- [10] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš, 2017. Dynamické jevy v pohonech moderních kolejových vozidel. In: Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: XXIII. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků (SPKV 2017). Pardubice: DF JP Univerzita Pardubice, 2017, s. 85-94. ISBN 978-963-9058-38-5. **(INDEXOVÁNO NA WEB OF SCIENCE)**
- [11] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš. 2019. Dynamické vlastnosti částečně a zcela odpružených pohonů moderních lokomotiv. In: *Zborník prednášok I. - XXIV. Medzinárodná konferencia - Súčasný problémy v koľajových vozidlách*. Žilina: VTS pri ŽU, s. 139-146. ISBN 978-80-89276-58-5. **(INDEXOVÁNO NA WEB OF SCIENCE)**
- [12] DYBALA, Vojtěch, Tomáš FRIDRICHOVSKÝ a Petr BAUER. 2021. Využití tenzometrie pro měření součinitele adheze na kladkovém stavu ČVUT. *Nová železniční technika*. **2021**(1): 26-29. ISSN 1210-3942.
- [13] FRIDRICHOVSKÝ, Tomáš. 2021. Vztah mechanických a elektrických veličin v pohonech moderních kolejových vozidel. In: **SOUČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH 2021: XXV. KONFERENCE S MEZINÁRODNÍ ÚČASTÍ: SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ**. Dopravní fakulta Jana Pernera: Univerzita Pardubice, s. 55-62. ISBN 978-80-7560-377-7.

Seznam použité literatury v tezích

- [14] KADEŘÁVEK, Petr a Jaromír PERNIČKA, 2013. Torsion oscillations of powered wheelsets. *Railvolution*. 2013(2), 34-37. ISSN 9000-0063.
- [15] BENKER, T. a T. WEBER, 2015. Torsionsschwingungen von Radsätzen - eine Herausforderung. *Eisenbahn-ingenieur*. (April), 47-52.
- [16] BIKER, G., J. DEDE, D. DÖRNER, H. KLEIN a A. PUSNIK, 2014. Bremsscheibe als Tilger für Radsatz-torsionsschwingungen. *ZEV Rail*. (138), 381-387.
- [17] MARKOVIC, P., D. KOSTIC a N. BOJOVIC, 2015. One Method for Detection of Torsional Oscillations of Driving Axles of Electrical Locomotives. In: *PRORAIL 2015 - XXII. Medzinárodná konferencia Súčasné problémy v koľajových vozidlách*. 2. Žilina: Žilinská universita, Strojnícka fakulta, s. 27-37. ISBN 978-80-89276-48-6.
- [18] POLACH, O., 2005. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. In: *Wear*. 258(7-8), s. 992-1000. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.046. ISSN 00431648. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164804003072>

Anotace

Pohony moderních kolejových vozidel, zejména asynchronních lokomotiv, pracují se značnými výkony. Stále lepší regulace těchto pohonů umožňuje řídit velikost jejich hnacího momentu s ohledem na okolní podmínky a o to lépe využít adhezních možností hnacího vozidla. Díky tomu může jet kolejové vozidlo téměř po mezi adheze s využitím maximálních hnacích sil. Případná ztráta adheze pak způsobuje o to znatelnější „silové“ dopady na samotný pohon. Ty mohou způsobovat vyšší únavové namáhání vedoucímu ke zkrácení životnosti, případně jeho fatálnímu poškození.

V současnosti se často zmiňují tzv. torzní oscilace hnacích dvojkolí, které dodatečně zatěžují samotné komponenty pohonu včetně lisovaných spojů, které mohou ztratit svou zaručenou funkčnost.

Případy z uplynulých let a s tím spojená pozornost naznačují, že doposud spíše přehlížená oblast torzní dynamiky pohonu vozidla může mít významný vliv na spolehlivost vozidla a bezpečnost jeho provozu.

V této práci je popsána problematika torzního kmitání, jeho analýza na simulačních modelech a snaha nalézt způsob, jak potlačit/omezit s tím spojené negativní vlivy. Závěr práce se věnuje možnosti ověření tohoto přístupu v praxi na zkušebním stavu v laboratořích Fakulty strojní.

Summary

Drives of modern railway vehicles, particularly asynchronous locomotives, operate with considerable power output. Permanently improving properties of drive control allow us precise motor torque setting. Thanks to this, the modern vehicles are allowed to drive close to its adhesion limits and to use their maximum tractive effort. But considering this, occasional loss of adhesion may cause significant impact for drive itself. This may lead to fatigue damage and decrease durability of the vehicle or lead to serious damage.

Nowadays torsional oscillations of powered wheelsets are often mentioned. These oscillations cause additional stress to components of the drive including press-fitted joints that may lose its required properties.

Recent causes from last years were source of huge attention from side of professional public and operators. This suggest that not so well known torsion oscillations may have serious influence to reliability of vehicles and their safety.

This work describes issues related to torsional oscillations of powered wheelsets and analysis via simulation methods. Its aim is to find a way how to protect drive train of the vehicle. Last part of the work considers preparation of experiment on test rig in CTU laboratory on Faculty of mechanical engineering.

