

VZTAH MECHANICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VELIČIN V POHONECH MODERNÍCH KOLEJOVÝCH VOZIDEL

RELATION BETWEEN MECHANICAL AND ELECTRICAL QUANTITIES IN THE DRIVES OF MODERN RAILWAY VEHICLES

Tomáš FRIDRICHOVSKÝ¹

Abstrakt

Příspěvek se věnuje problematice torzního kmitání hnacích dvojkolí moderních kolejových vozidel. Příspěvek je zaměřen na elektro-mechanické dynamické děje a jejich vzájemnou vazbu v individuálním pohonu vozidla za situace, kdy dochází k rozkmitání dvojkolí. Na základě informací ze simulačních modelů byly pozorovány proudové veličiny, podle čehož byl vyhodnocen stav dvojkolí – nekmitá / kmitá. To je dále využito jako informace pro regulaci pohonu (řízení velikosti momentu trakčního motoru), která má za cíl eliminovat vlivy torzního kmitání, které mohou mít nepříznivý vliv na stav a životnost celého vozidla.

Klíčová slova

kolejová vozidla, torzní kmitání, individuální pohony, dvojkolí, dynamika, řízení pohonu

Abstract

This paper deals with phenomena called torsional oscillations of powered wheelsets which occur in modern railway vehicles, particularly locomotives. The paper is focused on relation between mechanical and electrical part of locomotives drives especially in situation when wheelset oscillates in torsional direction. Mathematical model of the drive was used for determining of the wheelsets state (does not oscillate or oscillates) which is followingly used as an additional input for torque control. This is done for the sake of reduction of oscillations that may have negative impact for durability of the vehicle.

Keywords

railway vehicles, torsional oscillations, individual drive, wheelset, dynamics, torque control

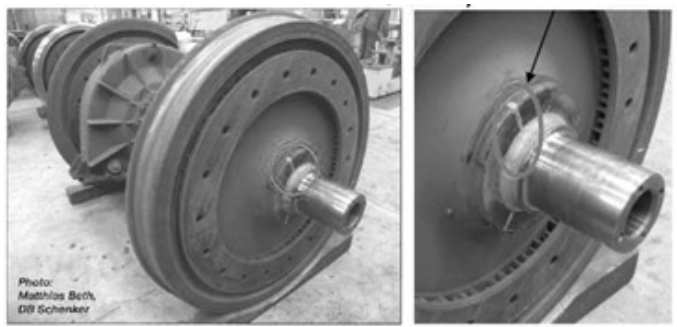
1 ÚVOD

Torzní kmitání hnacích dvojkolí v pohonech moderních kolejových vozidel je poměrně známým jevem. Ten byl v uplynulém desetiletí často diskutován a byl cílem mnoha výzkumů a publikací nejrůznějších autorů (včetně autora příspěvku). I tento příspěvek se věnuje problematice torzního kmitání a svým obsahem navazuje na starší příspěvky publikované autorem na konferencích SPKV a ProRail v letech 2015–2019 [1, 2, 3]. Cílem příspěvku je shrnout některé poznatky vyplývající z doktorského studia autora a zároveň nastínit možnou aplikovatelnost v praxi.

Pojem torzního kmitání dvojkolí je už dlouhou dobu poměrně dobře známý. Nicméně větší pozornosti se mu začalo dostávat v roce 2009 [4], kdy se začalo více diskutovat o jeho výskytu a možném negativním vlivu na jednotlivé části pohonu. Příčinou byla detekce mírného pootočení

¹ Ing. Tomáš Fridrichovský, ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Technická 4, 166 07, Praha 6. Tel.: +420 224 352 493, e-mail: tomas.fridrichovsky@fs.cvut.cz

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 nepříпустnému zmenšení rozkolí a v konečném důsledku i vykojení vozidla.

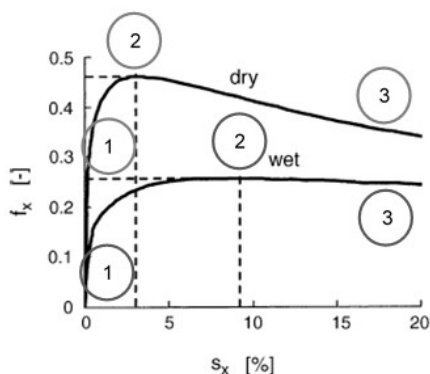


Obr. 1 Dvojkolí lokomotivy řady DB 145 včetně detailu pootočení kola na nápravě [4]

Vzhledem k okolnostem (nebylo zjištěno pochybení na straně výroby dvojkolí) bylo tehdy za nejpravděpodobnějšího viníka označeno torzní kmitání hnacích dvojkolí, které je silně navázáno na dynamické děje, které se mohou v pohonech vyskytovat. Z hlediska fyzikální podstaty se jedná o situaci, kdy kola kmitají vůči sobě při současném zkrucování nápravy. Jev, který do značné míry souvisí s předpětím zatížené mechanické soustavy (od rotoru trakčního motoru až ke kolům) je spojen s náhlou a rychlou změnou ustáleného stavu (ztráta předpětí), především pak ztrátou adheze a hledání nového ustálení pracovního bodu na skluzové charakteristice.

2 VÝZKUMY PROBLEMATIKY

Příspěvek svým obsahem odkazuje na starší publikace věnované této tematice. Jmenovitě se jedná o autory Benker a Weber [5], kteří se jako jedni z prvních blíže zabývali problematikou torzního kmitání a dvojkolí, jakožto torzního oscilátoru. Důležitým poznatkem bylo chování dvojkolí při překročení meze adheze a následném ustálení pracovního bodu v nestabilní části charakteristiky, viz obr. 2.



Obr. 2 Skluzová charakteristika v kontaktu kolo-kolejnice. Horní průběh (dry) udává tvar na suché kolejnici s dobrými adhezními podmínkami, spodní průběh (wet) na vlhké koleji se špatnými adhezními podmínkami. Oblast č. 1 – stabilní část charakteristiky, nárůst tření společně se skluzem. Oblast č. 2 – maximum součinitele tření. Oblast č. 3 – nestabilní část charakteristiky. [6]

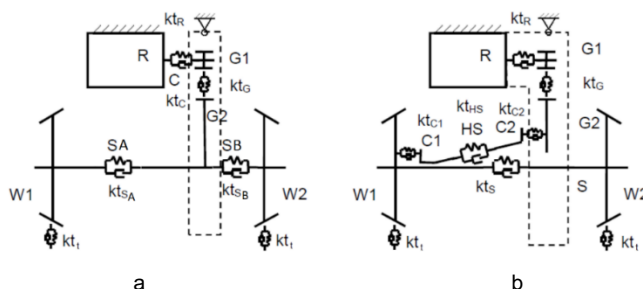
Současný pohyb pracovního bodu v nestabilní oblasti a účinek hnacího momentu trakčního motoru vedou k tomu, že se dvojkolí rozkmitá až na určitou maximální amplitudu a v tomto stavu setrvává – kmitání v oblasti tzv. Grenzzycclus. Velikost amplitudy, respektive maximálního dynamického momentu, je popsána např. pomocí tzv. energetické metody Vogel-Gerade [7], která určuje maximální dynamickou amplitudu v závislosti na parametrech:

- tuhost nápravy,
- vlastní frekvence kmitání dvojkolí,
- skluzová rychlost,
- moment setrvačnosti kola.

Poslední zmíněný zdroj je publikace od autorů Markovic, Kostic a Bojovic [8], kteří se zabývali metodou detekce torzních oscilací ve svém matematickém modelu dvojkolí poháněného stejnosměrným strojem. Ze simulací vyplynulo, že mechanické kmitání pohonu se přenáší do elektrických veličin stroje, konkrétně napětí, které v případě rozkmitání vykazovalo mírné zvlnění. Frekvence zvlnění odpovídala frekvenci kmitání dvojkolí.

3 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Příspěvek je zaměřen na elektro-mechanické dynamické děje v individuálním pohonu vozidla za situace, kdy dochází k rozkmitání dvojkolí. Pro tyto účely byly použity simulační modely vozidel s pohony částečně a zcela odpruženými. Ty byly inspirovány současnými hnacími vozidly. Schéma těchto pohonů je na obr. 3. Pro tvorbu byly použity software MATLAB Simulink (základní simulace samotného pohonu) a Simpack (pokročilé simulace celého vozidla rozšířené o vlivy nerovností a geometrie tratě).



Obr. 3 Schematické znázornění konstrukčního uspořádání uvažovaných pohonů – částečně odpružený pohon (část a) a zcela odpružený pohon (část b).

Základem jednotlivých modelů je mechanická soustava přenosu hnacího momentu z trakčního motoru na kola. Na jedné straně je umístěn model asynchronního trakčního motoru včetně regulace, na straně druhé model přenosu třecích sil v kontaktu kolo-kolejnice. Některé pro simulace podstatné/zajímavé vlastnosti jsou zmíněny v podkapitolách dále.

3.1 Model asynchronního motoru

Model motoru vychází z popisu pro asynchronní stroj a je dán napěťovými a tokovými rovnicemi. Model motoru předpokládá, že parametry motoru (odpory a indukčnosti) jsou konstantní.

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

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

$$u_{2\alpha}(t) = R_2 i_{2\alpha}(t) + \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} + p_p \omega_m(t) \Psi_{2\beta}(t) = 0 \quad (3)$$

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

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

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

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

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

Moment je popsán rovnicí:

$$M(t) = \frac{3}{2} p_p (i_{1\beta}(t) \Psi_{1\alpha}(t) - i_{1\alpha}(t) \Psi_{1\beta}(t)) \quad (9)$$

kde u_{jk} je napětí, i_{jk} je proud, R_j je odpor, Ψ_{jk} je magnetický tok, L_j je indukčnost, p_p je počet pólových dvojic a ω_m je úhlová rychlost stroje. Standardně třífázový stroj byl v rámci zjednodušení převeden na stroj dvoufázový. S použitím Parkovy transformace byly tyto veličiny převedeny z veličin harmonických na konstantní.

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

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

kde složky d a q prezentují momentotvorné a tokotvorné složky proudu, γ je transformační úhel. To umožňuje řídit střídavý stroj jako stroj stejnosměrný, kde velikost momentu takového stroje je pro určitý provozní rozsah dán rovnicí:

$$M_m \approx k \cdot i_q \quad (12)$$

To znamená, že moment střídavého trakčního motoru je díky této metodě lineárně závislý na velikosti proudu. Tento postup umožňuje poměrně snadné řízení momentu stroje a zároveň je vhodný pro sledování jeho dynamiky.

Poměrně zásadní je taktéž přítomnost otáček v napěťových rovnicích. Tím je dána vazba mezi mechanikou pohonu a elektrickými veličinami, včetně jejich dynamických změn.

3.2 Regulace pohonu

Řízení velikost momentu, jmenovitě protiskluzová ochrana, je založena na sledování otáček trakčního motoru a jejich vzájemného porovnání. Regulace jednak hlídá výrazně rychleji se točící dvojkolí, ale také náhlá zrychlení, která neodpovídají fyzikální realitě jedoucího vozidla. Řídící struktura momentu na základě vstupních dat upravuje žádanou hodnotu momentu asynchronního stroje.

3.3 Adhezní model přenosu tečných sil

Přenos tečných sil mezi kolem a kolejnicí řeší kombinace dvou funkcí:

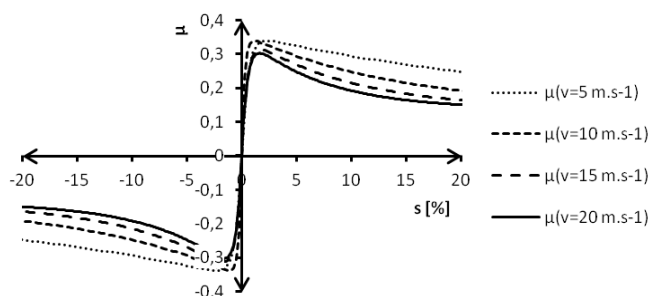
- exponenciální funkce pro stabilní část charakteristiky,
- Polachova teorie pro nestabilní část charakteristiky [7].

Výsledný tvar rovnice pro výpočet součinitele tření má následující tvar:

$$\mu = \left(1 - e^{-\frac{s}{c}}\right) \cdot \mu_0 \cdot [(1 - A) \cdot e^{-B \cdot v_{sk}} + A] \quad (13)$$

kde μ je okamžitý součinitel adheze, μ_0 statický součinitel tření, s je skluz, A , B a C jsou experimentálně zjištěné konstanty pro exponenciální funkce a v_{sk} je okamžitá skluzová rychlost, přičemž platí, že vztah mezi skluzem s , skluzovou rychlostí v_{sk} a rychlostí vozidla V je následující:

$$s = \frac{v_{sk}}{V} \quad (14)$$

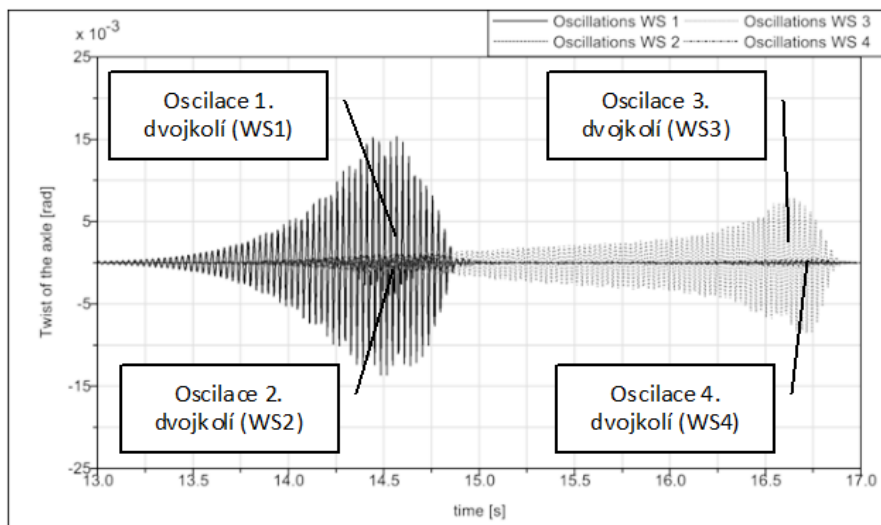


Obr. 4 Průběhy skluzové charakteristiky pro různé rychlosti vozidla

Z obrázku je patrné, že pro různé rychlosti platí různé průběhy součinitele tření, především pak v nestabilní oblasti, kde za vyšších rychlostí dochází k prudšímu poklesu tření, tzn. rychlejší uvolnění naakumulovaného předpětí. Zároveň je zde výraznější maximum součinitele tření, což sebou nese riziko toho, že při prokluzu dvojkolí a následném nedostatečném snížení hnacího momentu zůstane pracovní bod v nestabilní oblasti (oblast vyšších skluzů) a vzniklé oscilace se tak mohou nerušeně rozvíjet.

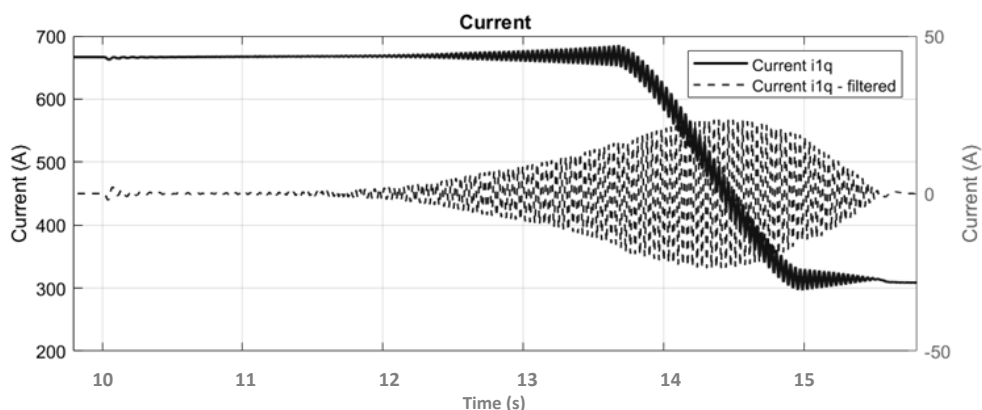
4 SIMULACE MODELU

Simulace modelů uvažují jízdu vozidla po přímé trati, případně jízdu obloukem. Jízda po přímé trati je obecně vhodná pro pozorování dějů souvisejících s náhlou změnou podmínek – zde změna adheze. Jízda obloukem je pak vhodná pro sledování odezvy na nucený prokluz jednotlivých kol (vyčerpání rozdílu valivých poloměrů kol – dvojkolí se přestává chovat jako diferenciál). Obr. 5 znázorňuje časové průběhy oscilací dvojkolí se zcela odpruženým pohonem při jízdě obloukem R250m. Z průběhů lze vypočítat poměrně vysoké amplitudy, které jsou do značné míry závislé na rychlosti reakce protiskluzové ochrany. Jízda obloukem je obecně problém, protože celé dvojkolí neztratí naráz adhezi, ale dochází k postupnému rozkmitávání především na nejvíce odlehčeném kole. Dvojkolí se díky tomu nerušeně rozkmitává do okamžiku, kdy jsou oscilace natolik velké, že začnou cloumat samotným rotorem – dynamický moment v dvojkolí je v tu chvíli i několika násobkem momentu nominálního [7].



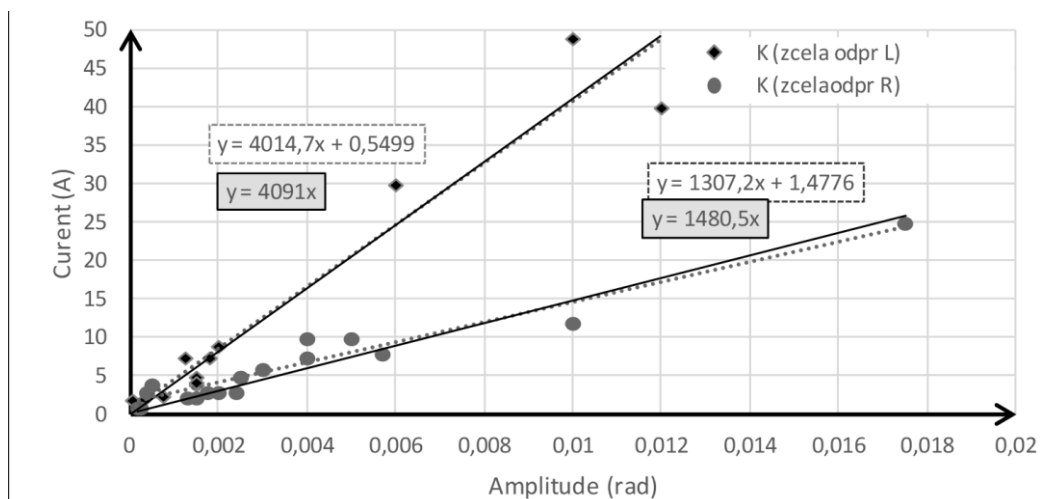
Obr. 5 Průběhy torzních oscilací na jednotlivých dvojkolích při jízdě obloukem R250m – levotočivý

Jak bylo zmíněno v [2], kmitání dvojkolí se přenáší skrz pohon až do trakčního motoru a projevuje se na dynamice jeho elektrických veličin. To je vidět na obr. 6, kde je znázorněn průběh proudu včetně vyfiltrovaných oscilací.



Obr. 6 Průběhy statorového proudu i_{iq} (current) v případě výrazného rozkmitání dvojkolí

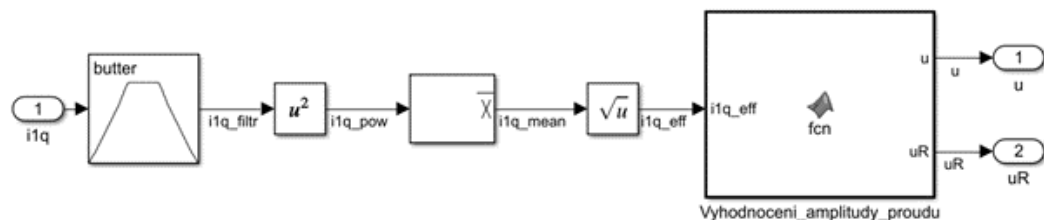
Z naměřených průběhů je možné vyčíst závislost mezi velikostí oscilací dvojkolí a oscilacemi proudu. Tyto závislosti jsou vidět na obr. 7 a jsou vůči sobě v přibližně lineární relaci.



Obr. 7 Závislost amplitudy oscilací dvojkolí (amplitude) a oscilací proudu i_{iq} (current) při ztrátě adheze na levém kole (index L), anebo na pravém + na obou kolech (index R). Čísla v tmavém rámečku udávají směrnici tečny uvažované závislosti (značeno K).

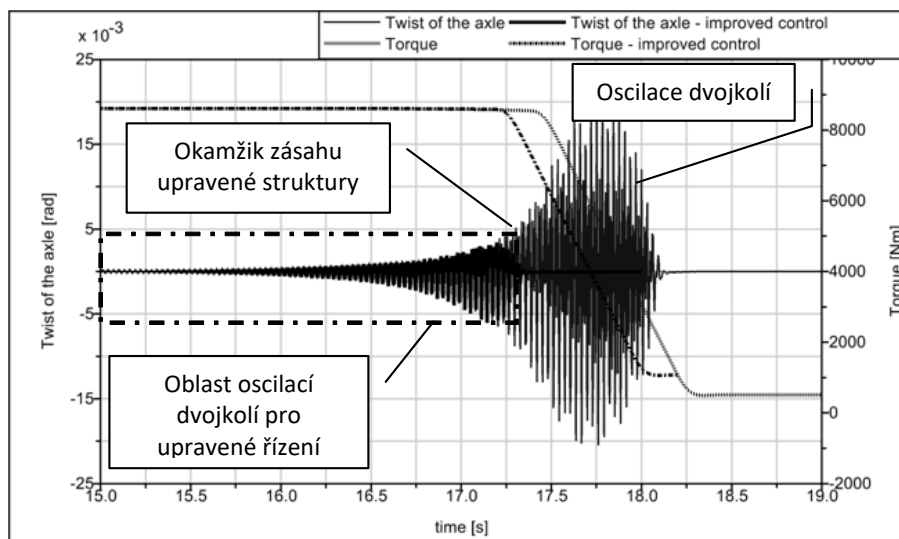
Z toho vyplývá, že prostým měřením proudových veličin trakčního motoru a jejich přepočtem do „stejnoseměrných veličin“ lze určit, kdy dvojkolí kmitá, a to případně i jakou amplitudou. Na základě této znalosti je možné doplnit regulační strukturu pohonu o nadřazený prvek – pozorování dynamiky elektrických veličin a dodatečný impuls pro protiskluzovou charakteristiku.

Zjednodušené schéma této nadřazené struktury je na obr. 8. Principem je filtrace proudových veličin již přepočtených do stejnosměrných hodnot a jejich porovnání s mezní hodnotou – ta může být nastavena na základě požadavku na maximální aditivní tečné napětí v důtku nápravy, zatížení lisovaného spoje apod.



Obr. 8 Schéma bloku nadřazené regulační struktury. Popis zleva: Vstupem je proud statoru i_{1q} (momento-tvorná složka); průběh je upraven filtrem s pásmovou propustí; přibližně harmonický průběh proudu je přepočítán na efektivní hodnotu $i_{1q\text{ eff}}$; efektivní hodnota vstupuje do bloku vyhodnocení a dále do regulace – veličiny u_i .

Výsledný průběh (porovnání) při průjezdu vozidla obloukem je vidět na obr. 9. Obrázek porovnává totožné podmínky průjezdu bez a s uvažováním nadřazeného regulačního bloku. Jak je vidět, včasným zásahem je reálné poměrně výrazně snížit amplitudy oscilací a jejich délku trvání.



Obr. 9 Porovnání časových průběhů oscilací (twist) a momentu trakčního motoru (torque). Tenká – standardní řízení pohonu. Tučná – upravené řízení pohonu. Z důvodu přehlednosti je časový úsek korigovaných oscilací označen čerchovaným rámečkem).

Poznámka – v příspěvku jsou přednostně zobrazovány průběhy pro pohon zcela odpružený, který má hnací moment přiváděný zpravidla na jedno z kol dvojkolí a přes nápravu (její volný konec) je přenášen na kolo druhé. Právě toto uspořádání je při jízdě obloukem více náchylné na výskyt oscilací.

5 ZÁVĚR

Příspěvek byl věnován torznímu kmitání dvojkolí a simulacím spojenými s danou problematikou. Hlavním cílem příspěvku bylo nastínit možnost detekce, a především vyhodnocení amplitud torzních oscilací dvojkolí pozorováním proudových veličin v trakčním motoru.

Výstupem příspěvku je, že torzní oscilace dvojkolí a oscilace proudů jsou spolu svázány přibližně lineární závislostí a pomocí vhodného rozhodovacího kritéria lze kvalitně rozlišit, které oscilace jsou běžné provozní a které mohou znamenat riziko pro jednotlivé součásti pohonu.

The paper was created with the financial support of the Technology Agency of the Czech Republic, project No TE01000026 "Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky".



Literatura

- [1] FRIDRICHOVSKÝ, T. Analýza výskytu torzních kmitů v pohonech moderních kolejových vozidel. In: *Súčasný problémy v koľajových vozidlách: XXII. medzinárodná konferencia, zborník prednášok*, diel I. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2015, 135–141. ISBN 978-80-89276-48-6.
- [2] FRIDRICHOVSKÝ, T. Dynamické jevy v pohonech moderních kolejových vozidel. In: *Súčasný problémy v kolejových vozidlech: XXIII. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017, 85–94. ISBN 978-80-7560-085-1.
- [3] FRIDRICHOVSKÝ, T. Dynamické vlastnosti částečně a zcela odpružených pohonů moderních lokomotiv. In: *Súčasný problémy v koľajových vozidlách: XXIV. medzinárodná konferencia, zborník prednášok*, diel I. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2019, 139–146. ISBN 978-80-89276-58-5.
- [4] KADERÁVEK, P., PERNIČKA, J. Torsion oscillations of powered wheelsets. *Railvolution*. 2013 (2), 34–37. ISSN 9000-0063.
- [5] BENKER, T., WEBER, T. Torsionsschwingungen von Radsätzen – eine Herausforderung? *Der Eisenbahningenieur*. 2015 (4), 47–52. ISSN 0013-2810.
- [6] POLACH, O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear*. 2005, **258**(7–8), 992–1000. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.046.
- [7] SIEMENS AG. *Verfahren zur bestimmung eines torsionsmomentes*. Původci: BREUER, W., YU, M. Patent EP 3 224 590 A0. 05. 12. 2018.
- [8] MARKOVIC, P., KOSTIC, D., BOJOVIC, N. One Method for Detection of Torsional Oscillations of Driving Axles of Electrical Locomotives. In: *Súčasný problémy v koľajových vozidlách: XXII. medzinárodná konferencia, zborník prednášok*, diel II. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2015, 27–37. ISBN 978-80-89276-48-6.