

## Oponentní posudek disertační práce

Název práce	<b>Metody eliminace nežádoucích elektromechanických interakcí plně odpruženého pohonu dvojkolí</b>
Doktorand	<b>Ing. Vojtěch Dybala</b>
Školitel	<b>doc. Ing. Josef Kolář, CSc.</b>
Oponent	<b>doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.</b>

### Obecná charakteristika

Předmětem disertační práce Ing. Vojtěcha Dybaly je studium dynamického chování pohonu dvojkolí kolejových vozidel se zaměřením na vazbu elektrických a mechanických jevů. Toto téma a tento přístup je v souladu se současnými směry výzkumu a výuky a je relevantní pro praktické potřeby konstrukce moderních kolejových vozidel.

Obsah a rozsah disertační práce, kterou jsem obdržel k posouzení, je přiměřený pro tento druh kvalifikační práce v daném oboru. Struktura odpovídá metodám vědecké práce, zahrnuje rozbor současného stavu poznání, stanovení cílů i jejich závěrečné zhodnocení.

### Rozbor současného stavu poznání

Rozbor současného stavu poznání týkajícího se tématu disertační práce je podán v kapitole 2. Lze konstatovat, že autor si je vědom oblastí, do nichž toto téma zasahuje a z nichž je třeba čerpat poznatky: elektrotechnika, mechanika, teorie kontaktu kolo–kolejnice, matematické metody a algoritmy. Kromě všeobecného pozadí jsou začleněny výsledky konkrétních výzkumů se zaměřením příbuzným tématu disertační práce (odd. 2.3.1–2.3.2). U nich bych si dokázal představit jejich přehlednější zařazení na konec kapitoly, aby působily jako vyústění předchozích obecných statí a aby na ně logicky navazovaly cíle disertační práce.

Celkově vhodně pojatý přehled současných poznatků je poznamenán nešikovnými vyjádřeními na některých místech, např. „[tlapového] trakčního motoru uloženého z jedné strany ve valivých ložiskách na ose nápravy a z druhé strany zavěšeného přes závěsku na ose dvojkolí“ (s. 18) – tam by snad mělo být psáno, že závěska je uchycena na rám podvozku. Není jasné, co je popisek „vertikální dělicí spára“ na obr. 2.16 (ukazuje na část skříně motoru/převodovky). Někde se používá výraz „osa dvojkolí“ a myslí se tím „náprava“ („osa“ znamená buď geometrický útvar, nebo hřídel, který se neotáčí – to ale nápravu dvojkolí nevystihuje). Na obrázku 2.21 se vyskytuje popisek „Náprava = hnací dvojkolí“, přitom náprava není totéž co dvojkolí. Tyto nedostatky pochopitelně nevedou k chybám v zásadní obsahové náplni disertační práce, ale mohou u čtenáře snížit důvěru, že autor postupoval ve svém výzkumu pečlivě a důsledně.

### Metody řešení a jejich aplikace

Metody řešení jsou prezentovány společně se všemi výsledky v kapitolách 4 a 5, jejichž oddělení sleduje druhy použitých výzkumných metod – výpočtové a experimentální.

Výpočtové metody spočívají pochopitelně v numerických simulacích s využitím výpočetní techniky. Doktorand vhodně zvolil dva různé modely, které označuje jako „základní“ a „komplexní“: první z nich je linearizovaným modelem mechanické části pohonu pro frekvenční analýzu, druhý je nelineární, se zohledněním elektrické i mechanické části, určený pro řešení v časové oblasti.

Základní simulační model vhodně reprezentuje zvolený druh pohonné soustavy (pohon dutým kloubovým hřídelem objímajícím nápravu), je v práci popsán graficky i matematicky; jsou uvedeny pohybové rovnice v základním i maticovém tvaru, veškeré použité symboly jsou vysvětleny, avšak schází mi uvedení hodnot vstupních veličin, na kterých pak závisí vypsané výsledky. Alespoň by měl být uveden způsob, jakým byly vstupy určeny – jsou-li například poskytnuty výrobcem, který si však nepřeje jejich zveřejnění, mělo by se to v práci poznamenat.

Nejsem si jist, zda je správné tvrzení o rovnosti sil  $T_{W,L}$  a  $T_{W,R}$  (s. 49 nahoře). Tyto síly jsou stejné v případě, že skluz na obou kolech je stejný. Skluz na obou kolech je stejný, pokud (v tomto modelu) je jejich úhlová rychlost stejná, tedy pokud zkrut nápravy je blokován – což podle výsledků v odd. 4.4.1 zřejmě není. Samotné síly  $T_{W,L}$  a  $T_{W,R}$  beztak v rovnicích (4.11) nevystupují. Zřejmě by tedy bylo vhodné místo rovnosti skluzových sil konstatovat rovnost strmostí linearizovaných adhezních charakteristik (a tedy parametrů  $b_{W,R}$  a  $b_{W,L}$ ).

Komplexní model pro simulační výpočty v časové oblasti se jeví jako vhodně sestavený, pro interpretaci výsledků jsou použity správné nástroje (frekvenční analýza, Campbellův diagram). Jeví se mi, že autor využívá simulační nástroje přiměřeným způsobem a je schopen vykládat jejich výstupy s ohledem na skutečný fyzikální význam.

Experimentální metody jsou omezeny možnostmi vybavení pracoviště autora a lze pochopit, že v oblasti disertační práce je experimentování (ať už v laboratoři, nebo na vozidle) náročné. Autor alespoň popisuje přípravu modelového laboratorního zařízení na výzkum jevů souvisejících s adhezí a dynamikou pohonů; chvályhodná je návaznost na výuku.

Není mi zcela jasná metodika experimentů podle odd. 5.3.1. Pokud se nejprve pomažou kladky mýdlem a pak se stroj uvede do chodu (a tedy se kontaminace roznese po kolech a kladkách), jaký zásah je příčinou krátkodobé ztráty adheze, která je prezentována např. na obr. 5.11 a dále analyzována? Informaci, že publikace [42] „vyjde ve sborníku [...] v průběhu první poloviny roku 2023“, by člověk v dokumentu předloženém na konci roku 2023 nečekal.

Ze zkušeností z experimentů i simulací souhlasím se zjištěním, že ukončení prokluzu představuje výraznější dynamický jev než jeho zahájení (s. 103).

Odd. 5.3.2 prezentuje výsledky měření adheze, přičemž souhrnným výstupem je obr. 5.22 – ovšem i ten by šel vylepšit odstraněním výrazně vzdálených referenčních křivek „High“ a zmenšením rozsahu svislé osy, čímž by byly lépe zachyceny vlastní výsledky. Obrázky 5.17–5.21 dle mého názoru nemají žádnou informační hodnotu, forma vykreslení je zvolena zcela nevhodně. Pro zachycení časového průběhu by bylo třeba body spojit čarami a vybrat kratší časový úsek, aby v grafu bylo vůbec něco vidět.

Na s. 109 je uvedeno, že naměřené adhezní charakteristiky neodpovídají předpokládanému průběhu. Pokud se tím myslí absence sestupného trendu narozdíl od referenčních křivek z jednoho zvoleného zdroje [15], neviděl bych to jako zásadní problém. Při velmi špatných adhezních podmínkách je časté, že součinitel tření se skluzovou rychlostí (téměř) neklesá. Tento jev je ovlivněn faktory, jejichž podrobné studium je výrazně nad rámec předložené disertační práce (nárůst teploty stýkajících se povrchů, pokles viskozity mezivrstvy, pokles smykové pevnosti materiálů...).

Naprosto souhlasím se závěrem, že je nezbytné rozšířit zkušební stav o přesné měření otáček. Výpočet skluzu obnáší odčítání dvou blízkých čísel, takže zejména pro malý skluz je vyžadována velká přesnost měření rychlosti. Momentová regulace je dle mého názoru též vhodnější pro ovládání zkušebního stavu a rozhodně je potřebná pro záznam vzestupné větve adhezní charakteristiky, která prozatím ve výsledcích naprosto chybí. Jediným nedostatkem momentové regulace může být příliš rychlý průchod oblastí vysokého skluzu, ale i ten by se dal korigovat nadřazenou otáčkovou smyčkou či alespoň protiskluzovou ochranou.

Dále možná vyvstane potřeba zabývat se zpracováním naměřených signálů, které jsou vždy zatíženy rušivými vlivy. Dokud se studují stacionární jevy, lze navodit požadované podmínky a výsledek určit průměrem z dlouhého časového okna (jak to zřejmě bylo řešeno u experimentů v odd. 5.3.2). Pokud ale budou nastávat v čase nějaké změny, anebo prostě bude snahou naměřit adhezní charakteristiku rychleji, zřejmě bude třeba věnovat větší pozornost zpracování signálů.

### **Dosažení stanovených cílů**

Cíle disertační práce jsou stanoveny v kapitole 3. Dle mého názoru jsou vhodně určeny a srozumitelně formulovány. Jen nerozumím významu věty „Tyto stavy by mělo být možno navozovat opakovaně pro různé podmínky“ v položce 1.

Cíle jsou znovu vypsány v odd. 6.1, kde se autor jednotlivě vyjadřuje k jejich splnění. V tomto ohledu autor hodnotí své výsledky pozitivně; souhlasím, že cíle disertační práce byly splněny. Interakce mezi elektrickou a mechanickou částí pohonu byly prozkoumány a v návaznosti na to byly nalezeny způsoby zmírnění nebo eliminace nežádoucích jevů, byť jejich přenositelnost do praxe ještě není úplně zřejmá (k tomu ještě doplňuji komentář pod následujícím nadpisem).

### **Teoretický a praktický přínos disertační práce**

Přínosy disertační práce jsou shrnuty v poměrně stručném oddílu 6.2. S autorovým zhodnocením přínosů pro vědu a pro praxi souhlasím.

Ocenil bych však, kdyby v odd. 4.5.4–4.5.5 (opatření pro zmírnění vibračních jevů) byla věnována větší pozornost konstrukčnímu řešení. Jaká by musela být změna průměru hřídele (anebo vrtání), aby se dosáhlo změny tuhosti podle tab. 4.4? Jaké by musely být průměry hřídelů v sestavě podle obr. 4.49, a mohly by vyhovět požadavkům na pevnost a prostor v pojezdu? Kompletní konstrukční řešení je pochopitelně nad rámec disertační práce (a není cílem – práce výzkumníka míří k obecnějším závěrům), avšak jeden krok navíc pro překlenutí mezery mezi teorií a praktickým řešením by se ještě udělat mohl.

S přínosem disertační práce souvisí publikace doktoranda během studia; přehled publikací je uveden na s. 121–123. Výsledky práce doktoranda byly průběžně publikovány v odborných časopisech (např. Acta Polytechnica CTU Proceedings – indexováno v databázi SCOPUS) a na konferencích. Škoda je, že chybí zahraniční publikace – mimo jednu konferenci na Slovensku.

### **Formální úroveň práce**

Celkově je disertační práce na přijatelné úrovni, styl odpovídá náležitostem tohoto druhu práce, základní prostředky formátování dokumentu jsou vhodně využity.

Technická kvalita obrázků je vesměs dobrá, popisky jsou čitelné, schémata jsou srozumitelná. U některých obrázků (např. obr. 5.8, 5.9) rušivě působí nízké rozlišení a JPG komprese.

Členění textu je místy nešikovné, např. kapitola 1 s jedním pododdílem 1.1, který však začíná až na druhé stránce kapitoly – zde by bylo vhodnější buď kapitolu nedělit, anebo text na s. 1 rovněž opatřit nadpisem druhé úrovně.

V práci se vyskytují typografické nedostatky, například nejednotné (ne)používání kurzívy pro symboly v matematických výrazech, nerozlišování pomlčky a spojovníku, odkazy na obrázky s velkým písmenem i mimo začátek věty („Obr.“). Místy se vyskytují překlepy (např. „Dopravní sroje“ na titulní straně) a gramatické nedostatky („Aplikace implicitní Rosenbrockovi numerické metody“, nadpis odd. 4.2.1). Popisky některých obrázků jsou v angličtině, třebaže se jedná o autorovy vlastní výtvořky a neměl by být problém pro účely českého textu upravit popisky do češtiny.

Formátování seznamu literatury je velmi nedbalé, nejednotné – jména autorů jsou někde psána velkými písmeny, někde normálně; názvy publikací jsou někde psány kurzívou, jinde stojatým písmem). Vlastní publikace

autora (s. 121–123) by mohly být lépe uspořádány či komentovány – podivně působí, že se číslování překrývá s hlavním seznamem literatury, avšak jsou tam navíc položky, které v hlavním seznamu nejsou uvedeny.

## Závěr

Z předložené disertační práce jsem nabyl názoru, že autor prokázal odpovídající znalosti v oboru své práce, prokázal schopnost vědecké práce od stanovení výzkumných cílů po jejich dosažení a zhodnocení. Disertační práce je založena na současném stavu poznání, metody výzkumu jsou vhodně zvoleny a použity. Výsledky jsou relevantní pro vědu a praxi. V práci spatřuji drobné nedostatky v řešení některých dílčích úkolů a ve způsobu a úrovni jejich prezentace.

**Na základě výše uvedeného posouzení doporučuji disertační práci ing. Vojtěcha Dybaly k obhajobě vedoucí k udělení titulu Ph.D.**

Prosím autora, aby v obhajobě zodpověděl následující dotazy:

1. Z modelu popsaného v odd. 4.1 je pro určení vlastních frekvencí a tvarů kmitů (pochopitelně) vyloučen moment  $M$  jakožto budící účinek. Někdy se však v rovnicích ponechává člen, jenž reprezentuje sklon momentové charakteristiky motoru a – stejně jako účinek linearizované skluzové síly – je zastoupen v matici tlumení (viz např. Zeman et al.<sup>1</sup>, výrazy  $B_M$ ,  $b_M$  v odd. 3.2–3.3, Freibauer et al.<sup>2</sup>, výrazy  $k_e$ ,  $k_e'$  v odd. 7.1.1). Proč v představeném modelu není tento člen zastoupen a jak by se projevil?
2. Oddíl 4.3.2 se zabývá vlastními frekvencemi torzních kmitů hřídele s volnými konci. Ve skutečnosti však například pro nápravu jsou okrajové podmínky dosti odlišné: na nápravě jsou blízko koncům upevněna kola – kotouče o značném momentu setrvačnosti. Myslíte, že i za těchto podmínek se mohou projevit kmity nápravy na frekvencích vypočtených podle vztahů na s. 61?
3. Došel jste k tomu, že dynamické jevy dané vyššími harmonickými složkami v napájení motoru jsou omezeny na sestavu motoru a nápravové převodovky (pastorku) a od dvojkolí jsou poměrně dobře odizolovány. Potom:
  - a. Myslíte, že tato skutečnost platí i pro tlapový pohon dvojkolí?
  - b. Myslíte, že na základě toho by tyto jevy v plně vypruženém pohonu bylo možno experimentálně studovat na zařízení neobsahujícím dvojkolí a kontakt kolo–kolejnice, tedy podstatně jednodušším než kompletní kladkový stav?
4. Jak probíhal experiment, jehož výsledek je vykreslen na obr. 5.11 – je způsob vyvození prokluzu správně popsán v seznamu na s. 100?

V Pardubicích dne 26. ledna 2024

doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.

---

<sup>1</sup> ZEMAN, V., HLAVÁČ, Z., BYRTUS, M. Modelling and modal properties of the railway vehicle bogie with two individual wheelset drives. In *Applied and Computational Mechanics*, 2007, 1, s. 371–380. URL: <http://hdl.handle.net/11025/1788>.

<sup>2</sup> FREIBAUER, L., RUS, L., ZAHŘÁDKA, J. *Dynamika kolejových vozidel*. 1. vydání. Praha: NADAS, 1991. ISBN 80-7030-104-X.