# Stanovisko školitele k disertační práci

Doktorand: **Ing. Vojtěch Dybala**

Téma disertační práce: **Metody eliminace nežádoucích elektromechanických interakcí zcela odpruženého pohonu dvojkolí**

Školící pracoviště: **U 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta strojní, ČVUT v Praze**

Doktorský studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní stroje a zařízení**

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

Doktorand Ing. Vojtěch Dybala byl po absolvování magisterského studia na FS ČVUT v Praze (v roce 2011) a zaměstnání ve Škodě Electric a.s. přijat od října 2017 do prezenční formy doktorského studia na Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS ČVUT v Praze. Od října 2017 byl spoluřešitelem grantu SGS17/077/OHK2/1T/12 – Analýza elektrických a mechanických dějů v pohonech moderních kolejových vozidel a navazujícího dvouletého grantu SGS18/130/OHK2/2T/12 – Analýza elektrických a mechanických dějů v pohonech moderních kolejových vozidel. Dále byl řešitelem dvouletého grantu SGS20/120/OHK2/2T/12 – Modifikace a modernizace kladkového stavu a modelového rámu podvozku. V rámci svého doktorského studia získával i odbornou praxi ve Škoda Electric a.s. a v současnosti pracuje ve Škodě Transportation a.s. V období od května 2016 do listopadu 2016 absolvoval šestiměsíční pracovní stáž v tehdejší společnosti Bombardier, dnes Alstom, v Derby v Anglii. Dále byl v průběhu svého doktorského studia zapojen do dílčích výzkumných aktivit v CKDV – WP 10 a ve výzkumném grantu TN 01000026 - NCK1, dílčí projekt DP2 – WP01. Splnil i požadavky pedagogické, kladené v průběhu studia na doktoranda. Státní doktorskou zkoušku složil v září 2021.

Doktorand v rámci zpracování kritické rešerše studované problematiky dynamických vlastností moderních pohonů kolejových vozidel dospěl těmto základním poznatkům:

- problematikou adheze a vznikem torzního kmitání dvojkolí v pohonech kolejových vozidel se zabývalo velké množství autorů, např. Max Winterling (1997), Polách (2004), Szolce a kol. (2014), Markovic (2015), Schneider a kol. (2018). Všichni tito autoři využívali simulační modely s určitou mírou idealizace a zjednodušení (elektrické nebo mechanické části),
- chybí komplexnější elektromechanický model výkonných pohonů (až 1,5 MW/dvojkolí), který by dostatečně kvalitativně popisoval dynamiku plně nebo částečně odpruženého individuálního pohonu dvojkolí a zároveň propojoval dynamický model mechanické části pohonu dvojkolí s modelem elektrické části střídavého trakčního motoru, způsobu jeho řízení a problematiku vlivu přechodových jevů v jeho napájení (např. asynchronní modulace-pulzně šířková regulace PWR, synchronní modulace) a vliv elektromagnetického tlumení v torzní elektromechanické soustavě pohonu dvojkolí.

Cílem předložené doktorské práce Ing. Vojtěcha Dybaly bylo:

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 stendech FS ČVUT za účelem podpory této práce i následného rozšíření možností experimentálních měření začlenitelných do výuky.

Základními nástroji výzkumu této disertační jsou dva 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.

Z uvedených cílů je patrné, že doktorand Ing. Vojtěch Dybala ve své doktorské práci rozšířil „Komplexní simulační model" plně odpruženého pohonu, jehož základ vznikl v rámci výzkumné činnosti Ing. Tomáše Fridrichovského, Ph.D., která měla za cíl výzkum vlivu přechodových jevů v kontaktu kolo-kolejnice vznikajících při náhlé změně adhezních podmínek a jejich odezvu na elektrické veličiny asynchronního trakčního motoru a jejich využití pro vylepšení protiprokluzové ochrany dvojkolí. Pro účely této disertační práce byl doktorandem Ing. Dybalou tento model rozšířen o implementace modelu 3-fázového 2-úrovňového střídače řízeného algoritmem pulsně-šířkové modulace s DC zdrojem napětí pro napájení modelu asynchronního motoru tak, aby respektoval uspořádání regulační struktury uvedené v disertační práci na Obr. 2.10.

Ing. Dybala ve své disertační práci zabývá komplexnějším simulačním modelem pro analýzu dynamických dějů v plně odpružených individuálních pohonech dvojkolí výkonných hnacích kolejových vozidel, které by dostatečně podrobně popisovaly, jak způsoby řízení střídavých ASM ovlivňují průběh elektromagnetických a mechanických dějů vznikajících u výkonných individuálních pohonů dvojkolí. I za předpokladu řady zjednodušení použitých v „Základním simulačním modelu" při výpočtu silové vazby kola s kolejnicí doktorand dospěl k závěru, že vazba v kontaktu kolo-kolejnice má velmi silný tlumící účinek především v oblasti nízkých rychlostí jízdy, kdy při přenosu tažných na úrovni meze adheze dokáže zcela utlumit vlastní torzní kmitání dvojkolí. S rostoucí rychlostí jízdy se tento efekt

snižuje a lze konstatovat, že v pásmu výkonového omezení trakčního motoru při jízdě v oblasti maximálních provozních rychlostí je tlumící účinek podélné silové vazby kolo-kolejnice malý či nulový a umožňuje torzní protiběžné kmitání hnacích kol dvojkolí.

Kladně hodnotím, že analýza vlastních frekvencí a vlastních kmitových tvarů individuálního pohonu dvojkolí odvozená z lineárního diskretizovaného modelu plně odpruženého pohonu je doplněna i o stručnou analýzu využití nelineárních modelů s nelineárními prvky a modelů založených na kmitání hmotného kontinua. Využití přístupu řešení hmotného kontinua ve své práci zaměřil na zhodnocení vlastních frekvencí, které by potenciálně mohly vystupovat v rámci buzení rezonančních stavů od harmonických složek elektromagnetického momentu. Z provedených výpočtů je patrné, že první a druhá vlastní frekvence duté kloubové hřídele a dvojkolí, stanovené metodou hmotného kontinua, se již pohybují v oblasti frekvencí blízkých rozsahu, který byl stanovený z lineárního modelu diskretizované torzní soustavy pohonu.

Cílem simulací v komplexním simulačním modelu bylo odhalit nebezpečné stavy torzních oscilací (rezonanční stavy) a jejich projev z hlediska přetěžování komponent torzní soustavy pohonu dvojkolí. Simulace představovaly rozjezd vozidla z nulové rychlosti na rychlost, při které je ještě přenášena maximální hnací síla na mezi dosažení maximálního hnacího výkonu. Předpokládané rezonanční stavy pro sedmihmotovou soustavu pohonu dvojkolí byly určeny pomocí Campbellova diagramu.

Podrobnější rozbor dílčích rezonančních stavů na jednotlivých hmotách torzní soustavy plně odpruženého pohonu vybuzených harmonickými složkami elektromagnetického momentu prováděl doktorand pomocí modifikovaných Campbellových diagramů, které v detailu ukázaly vzájemnou souvislost mezi potenciálními rezonančními stavy a amplitudou budící harmonické složky elektromagnetického momentu. Lze konstatovat, že rezonanční stavy se nejvíce projevily v namáhání pastorku čelního soukolí. Proto se doktorand ve své práci zabýval i analýzou možnosti aplikace torzních tlumičů k eliminaci torzního kmitání a rezonančních stavů buzených elektromagnetickým momentem.

S přihlédnutím na konstrukční možnosti realizace torzního tlumiče v dutině rotoru ASM tlumiče se ukázalo, že jeho fungování bude mít pouze omezený dopad na torzní kmity pastorku. Doktorandem navržená konstrukce torzního tlumiče vede na zcela nekonvenční konstrukční řešení kotvy trakčního motoru, které nemusí výrobci pohonů akceptovat. Přijatelnějším řešením, které se prokázalo jako funkční z hlediska eliminace zkoumaných vlivů mezi elektrickou a mechanickou částí, je optimalizování torzní tuhosti hřídele kotvy motoru v oblasti mezi hmotou rotoru a hmotou pastorku.

Z experimentální části doktorské práce je patrná snaha doktoranda, podpořit výsledky dosažené simulacemi měřeními na modernizovaném kladkovém stavu. Realizovaná měření prokázala, že na kladkovém stavu lze navodit přechodové jevy, jako je ztráta a obnovení adheze v kontaktu kol a kladek a tento dynamický jev změřit pomocí navržených tenzometrických prvků. Doktorandem provedený experimentální výzkum poukázal, že na měření součinitele adheze je potřeba změnit způsob regulace hnacího motoru dvojkolí

z otáčkové na momentovou, aby bylo umožněno nastavovat zatížení s ohledem na proudové limity asynchronního motoru, který pohání hnací kladky.

Při své vědecko-výzkumné práci na dílčích cílech doktorské práce doktorand prokázal velmi dobrou orientaci v problematice řešení konstrukce pohonů moderních kolejových vozidel, v tvorbě simulačních a regulačních modelů napájení těchto střídavých pohonů v prostředí Simpack a Matlab Simulink. Průběžné dílčí výsledky svého výzkumu představil odborné veřejnosti v deseti příspěvcích.

Konstatuji, že Ing. Vojtěch Dybala prokázal předloženou doktorskou prací velmi dobré znalosti ve studovaném oboru a schopnost samostatné vědecké práce a tvorby komplexních simulačních 3D modelů pohonů kolejových vozidel.

Domnívám, že předložená disertační práce splňuje podmínky tvůrčí vědecké práce a **doporučuji** ji přijmout k obhajobě.

V Praze dne 7. 12. 2023

.....

doc. Ing. Josef **Kolář**, CSc.
školitel doktoranda