

Doc. Ing. Josef **Kolář**, CSc.  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
U 12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel  
Technická 4  
166 07 Praha 6

Oponentní posudek habilitační práce Ing. Tomáše **Michálka**, Ph.D., na téma:

## **„SIMULAČNÍ OVĚŘOVÁNÍ PŘÍNOSU INOVATIVNÍCH TECHNOLOGIÍ V POJEZDU ŽELEZNIČNÍCH VOZIDEL“**

### **Úvod**

Předložená habilitační práce svým komentářem provazuje dílčí výzkumné a vývojové simulační práce, které byly v posledních letech autorem habilitační práce v oblasti simulací jízdních vlastností KV a přínosů inovativních technologií v pojezdu železničních vozidel vytvořeny. V habilitační práci Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. dokumentuje svůj významný podíl na vývoji simulačního programu *SJKV (simulace jízdy kolejového vozidla)* vytvářeného na Dopravní fakultě Jana Pernera, Univerzity Pardubice a na dílčích modelech kolejových vozidel pro simulační ověřování přínosu inovativních technologií v pojezdu hnacích železničních vozidel, především lokomotiv.

Hodnocení předložené habilitační práce:

#### **1. Aktuálnost tématu**

Simulačními výpočty jízdního chování kolejového vozidla či vlaku lze výrazně snížit náklady na vývoj kolejových vozidel. Proto je téma habilitační práce z pohledu vývoje a výzkumu moderních hnacích železničních vozidel a jejich vzájemné interakce s tratí a s ověřením inovativních prvků použitých v pojezdu výkonných lokomotiv velmi aktuální.

Vývoj vlastního simulačního programu SJKV a simulační experimenty prováděné habilitantem Ing. Tomášem Michálkem, Ph.D. přináší celou řadu vypočtených informačních dat a zkušeností, které přispívají k detailnějšímu studiu chování inovačních prvků v pojezdu kolejových vozidel s cílem zlepšení jejich jízdních vlastností a snížení silových účinků vozidla na trať.

Doktor Tomáš Michálek ve své habilitační práci přináší nové zkušenosti z problematiky integrace řídicích algoritmů jízdy vozidla přímo ve vlastním výpočetním MBS modelu kolejového vozidla. Tím se jeho vývojová práce liší od komerčních nástrojů, které zpravidla využívají k simulaci jízdy vozidla propojení dvou softwarových nástrojů, např. Matlab Simulink + Simpack. I z tohoto pohledu považuji téma habilitační práce: „Simulační ověřování přínosu inovativních technologií v pojezdu železničních vozidel“ za velmi podnětné a důležité.

#### **2. Postup řešení zvoleného tématu**

Předložená habilitační práce je uspořádána v souladu s požadavky § 72 odst. 3, písmena a) a b) zákona o vysokých školách, neboť je vytvořena soubornou písemnou prací o rozsahu 44 stran doplněnou 14 přílohami (P1 až P14), které dokumentují rozsáhlou vědecko-výzkumnou činnost provedenou v rámci tvorby simulačního programu *SJKV* a při řešení aplikace modelování inovativních technologií v pojezdu hnacích kolejových vozidel, tj. při řešení těchto otázek:

- aplikace principu dynamického tlumiče v konstrukci „kyvného pohonu“ při řešení individuálního pohonu dvojkolí lokomotivy
- využití flexi-coil pružin s pryžokovovými klouby v sekundárním vypružení bezkolébkových podvozků lokomotiv
- využití aktivních prvků pro aktivní natáčení podvozků a využití aktivních prvků pro aktivní radiální stavění dvojkolí
- využití semiaktivně řízených magnetoreologických tlumičů ve vazbě skříně vozidla a rámu podvozku

Hlavní náplň předložené habilitační práce tvoří vedle popisu programu *SJKV-V4N v. 1.0*, dále je *SJKV*, a problematiky validace výpočtových modelů, viz kapitola 2, především zhodnocení simulací výše uvedených inovativních technologií ke zlepšení jízdních vlastností hnacích kolejových vozidel a ke snížení vzájemných dynamických silových účinků v interakci vozidlo x kolej, viz kapitola 3.

Druhá kapitola habilitační práce obsahuje hodnocení současného stavu v oblasti simulačních výpočtů jízdy vozidel pomocí MBS modelů a stručně představuje vytvořený simulační program *SJKV* a dokumentuje problematiku validace simulačních modelů. V této kapitole mám drobnou formální poznámku k Obr. 3 na str. 12, kde v legendě obrázku je uvedeno, cituji: „(zborcená oblast zkušební koleje vyznačená šedým podbarvením)“, ale na Obr. 3 není šedé podbarvení patrné. Z naměřených hodnot poměru Y/Q je patrné, že střední hodnoty poměru získaných simulačním výpočtem se vcelku shodují s výsledky měření. V průběhu deformace kluznic předního podvozku je mezi výsledky simulací a naměřenými hodnotami určitý dráhový posuv, ale dosažené maximální stlačení je shodné. To jen dokládá, že přesné namodelování chování třecích tlumičů a kluznic představuje náročnou disciplínu a velmi detailní rozvahu o výpočetním modelu těchto prvků.

Dále konstatuji, že detailní popis vytvořeného simulačního programu *SJKV*, který je určen výhradně pro nekomerční použití a pro potřeby výuky studentů, je uveden v příloze **P1** habilitační práce.

Otázky validace modelů a využití simulačních výpočtů při schvalování kolejových vozidel jsou podrobněji okomentovány v příloze **P2**, habilitační práce která představuje článek vydaný v časopise NŽT 2/2014. Na tomto lektorovaném odborném článku, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>ost</sub>*.“ vykazuje ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 50%.

Třetí kapitola „*Modelování inovativních technologií v pojezdu vozidel*“ představuje na 21 stranách zpracovaný komentář k výše uvedeným inovativním technologickým prvkům, které mají potenciál využití v pojezdu moderního kolejového vozidla.

V podkapitole 3.1 *Kyvný pohon – aplikace dynamického tlumiče pro zlepšení stability jízdy vozidla* jsou na Obr. 6 prezentovány vybrané výsledky dynamického chování 4. dvojkolí vytvořeného MBS modelu elektrické lokomotivy s přímým (bezpřevodovým) individuálním pohonem dvojkolí s plně odpruženým trakčním asynchronním motorem. Pohonná jednotka má možnost vykonávat kývavý pohyb v příčném směru. Výsledky simulací jsou porovnány s modelem přímého (bezpřevodového) individuálního pohonu 4. dvojkolí, jehož pohonná jednotka je pevně uchycena na rám podvozku. Výsledky výpočtů dokumentují výhodu optimalizovaného kyvného uložení pohonné jednotky do rámu podvozku. Optimalizace příčné tuhosti závěsu je dále dokumentována v příloze **P3** habilitační práce, která představuje příspěvek na 10th International Conference on Railway Bogies and Running Gears – 2016. Na tomto odborném článku ve sborníku konference, který dle metodiky hodnocení představuje

výstup „*J<sub>ost</sub>*“, vykazuje ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 70%. Zajímavé by bylo vyhodnotit i situaci na předním, tj. 1. dvojkolí předního podvozku.

Kladně hodnotím, že pro kvalitativní posouzení simulovaných jevů byl v předložené habilitační práci vytvořen i zjednodušený půdorysný model poloviny trakčního podvozku s příčně odpruženým pohonem, viz Obr. 7. Tento model je buzen harmonickou příčnou výchylkou dvojkolí. V práci jsou odvozené frekvenčně amplitudové charakteristiky, viz vztahy (3.5) a (3.6) a vypočítané průběhy těchto charakteristik. Ty dokládají příznivý přínos příčného odpružení pohonné jednotky na stabilitu vrtivého pohybu rámu podvozku.

V podkapitole 3.2 *Využití a vlastnosti flexi-coil pružin s naklápěcími podložkami v sekundárním vypružení* je stručně popsán a zdokumentován další soubor výzkumných prací z řešení vypružení podvozků hnacích kolejových vozidel (dvou a třínápravových podvozků s flexi-coil pružinami). Tyto dílčí vědecko-výzkumné práce detailněji zdokumentované v příloze **P4** habilitační práce, která představuje článek vydaný v impaktovaném časopise *Vehicle System Dynamics* (v r. 2015, Q2). Tento článek dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>imp</sub>*“ a Ing. T. Michálek, Ph.D. u něho vykazuje autorský podíl ve výši 75%.

Provedené výzkumné práce navazují na doktorskou práci Ing. Tomáše Michálka a dokumentují je odbornou schopnost vhodně aplikovat zkušenosti z výzkumu flexi-coil šroubovitých vinutých pružin do reálné konstrukce sekundárního vypružení lokomotiv, viz užitečný vzor třínápravového podvozku - příloha **P5** habilitační práce. Na tomto užitém vzoru, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*F<sub>užit</sub>*“, vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 50%.

S vývojem třínápravového podvozku úzce souvisí i podkapitola 3.3 *Hodnocení přínosu systému aktivního natáčení podvozků*. V tomto případě je akuator ukotven na čelník rámu třínápravového podvozku a čelník hlavního rámu lokomotivy. Vybrané závěry provedených simulací jízdy lokomotivy s novými třínápravovými podvozky jsou prezentovány v **P6** habilitační práce. Na tomto lektorovaném odborném článku, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>sc</sub>*“, vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 35%.

V obloucích malých poloměrů akuator svou silou vytváří na rameni „*K*“ aktivní moment k otočnému čepu podvozku a tím snižuje velikost řídicí síly a třecího výkonu na nabíhající kole prvního dvojkolí předního podvozku, viz Obr. 11. Přepokládám, že při průjezdu obloukem malých poloměrů pracuje i akuator zadního podvozku. Tím tyto dva akuatory umístěné na čelních hlavního rámu, viz příloha **P7** habilitační práce - Fig. 7, vytváří reakční moment na hlavní rám lokomotivy. Ten musí vykompenzovat svým účinkem reakce příčných sil v sekundárním vypružení.

Dovoluji si upozornit, že akuatory zapojené na takto velké podélné vzdálenosti mohou přes reakční silové účinky (příčné síly) ve finále přispět k nižšímu snížení celkového třecího výkonu realizovaného v kontaktu kolo-kolejnice, které jak uvádí autor, dosahuje maximálně 10 %. V této souvislosti mám na Ing. Tomáše Michálka, Ph.D. dotaz: „Zkoušel simulovat situaci, že by aktivní prvek byl připojen na zadní čelník podvozku?“ Tím by sice musel akuator vyvinout větší osovou sílu, neboť je blíže otočnému čepu podvozku, ale akuatory by působily na hlavní rám lokomotivy na kratším rameni a to by mohlo přinést menší reakční silový účinek v sekundárním vypružení.

S uvedeným hodnocením přínosu aktivních prvků systému aktivního vrcení podvozků z hlediska minimalizace vodících sil souhlasím. Podrobněji je tento výzkum popsán v příloze **P7** – habilitační práce. Na tomto odborném článku, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>ost</sub>*“, vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 75%.

V habilitační práci jsou v podkapitole 3.4 *Návrh systému aktivního radiálního stavění dvojkolí a posouzení jeho přínosů* vyhodnoceny provedené simulace na modelu aktivního vedení dvojkolí s aktivním prvkem v podélném směru, viz Obr. 12. Jsou představeny výsledky tří různých modů řízení aktivních prvků. K analýze provedených simulací nemám zásadní připomínky. Výsledky těchto simulací dokumentují Obr. 16 a Obr. 17 a jsou prezentovány v příloze **P8** habilitační práce. Na tomto odborném příspěvku ve sborníku konference vykazuje ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 75%.

V souvislosti s hodnocením vodících sil je habilitační práci v podkapitole 3.5 autorem navržen vztah (3.7) pro stanovení velikosti ekvivalentní vodící síly  $Y_{ekv}$  pro průjezd vozidla výhybkou, respektive S-obloukem o směrovém poloměru  $R_o=190$  m. Detailnější odvození obecného vztahu je zdokumentováno v příloze **P9** habilitační práce, rovnice (14). Na tomto lektorovaném odborném článku, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>imp.</sub>*“, vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 80%.

Jak autor správně ukazuje, použití aktivních prvků k rejdování dvojkolí při průjezdu protisměrným obloukem klade vysoké požadavky na přesnou detekci okamžité polohy jednotlivých dvojkolí v koleji. Její nezvládnutí může průjezd protisměrným obloukem zhoršovat (anti-radiální stavění), podobně jako tomu docházelo při nevhodně nastavené vůli v pružícím prvku u starších hnacích vozidel (lokomotiv) s příčnou mezipodvozkovou vazbou.

V podkapitole 3.6 *Modelování systémů semiaktivně řízených tlumičů v pojezdu kolejových vozidel* je zdokumentován autorův podíl na výzkumných aktivitách prováděných v rámci projektu NCK1 v letech 2019 až 2022. Tato problematika byla řešena společně ve spolupráci s FSI VUT v Brně a společností Strojírna Oslavany. Vybrané výsledky jsou podrobněji prezentovány v příloze **P10** a **P11** habilitační práce, které představují odborné lektorované články ve sborníku konferencí ProRail. Na článku **P10** vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 33%. Na článku **P11** vykazuje Ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 50%.

Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. se především podílel na tvorbě MBS modelu vozidla se semiaktivně řízenými tlumiči vrtivých pohybů podvozků elektrické lokomotivy a v rámci simulací prověřoval přínos těchto tlumičů ke zlepšení jízdních vlastností elektrické lokomotivy. Dále dokumentuje výsledky z vytvořeného simulačního modelu elektrické jednotky 10Ev. Pro ni vytvořil vedle modelu semiaktivního tlumiče sekundárního i upravený model vzduchového sekundárního vypružení. Výsledky numerického MBS modelu validoval s výsledky experimentů na reálných vzduchových pružinách, které provedli pracovníci VÚKV a. s. Praha. Výsledky modelování chování sekundárního vypružení elektrické jednotky jsou podpořeny přílohou **P12** habilitační práce, která představuje odborný článek na konferenci. Na článku **P12** vykazuje ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 50%.

Ve čtvrté kapitole habilitační práce se Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. věnuje problematice zpoplatnění dopravní cesty v závislosti na silových účincích vozidla na trať. Ve třetí kapitole habilitační práce bylo simulačními výpočty prokázáno, že zavedení výše uvedených prvků inovativních technologií do pojezdu moderního kolejového vozidla má výrazný přínos na snížení silových účinků a opotřebení trati.

Úvodní rešeršní studie na téma: „*Zpoplatnění dopravní cesty*“ je zdokumentována v příloze **P13** habilitační práce, která představuje článek vydaný v časopise NŽT 5/2016. Na tomto lektorovaném odborném článku, který dle metodiky hodnocení představuje výstup „*J<sub>ost.</sub>*“, vykazuje ing. T. Michálek, Ph.D. autorský podíl ve výši 75%.

V textu 4. kapitoly habilitační práce je zdokumentován „švýcarský model zpoplatnění dopravní cesty“, který je podrobně popsán v příloze P14. Ta představuje odborný lektorovaný

článek ve sborníku konference ProRail 2019 a ing. T. Michálek, Ph.D. vykazuje autorský podíl ve výši 35%.

Dále je v této kapitole stručně popsán návrh *Metodiky zpoplatnění poškozujících účinků jízdy vozidel*. Na jejím vývoji se v rámci řešení úkolů technického rozvoje SŽDC habilitant podílel v letech 2018 -19 jako spoluřešitel. Návrh této metodiky obecně reflektuje čtyři základní druhy poškozujících účinků (dynamickou kolovou sílu, účinek skluzových sil, referenční hodnotu vodící síly  $Y_{ekv}$  pro průjezd výhybkou, respektive protisměrným obloukem a maximální trakční výkon přenášený v kontaktní ploše kola s kolejnicí).

Závěrečná 5. kapitola představuje stručné zhodnocení přínosu inovativních technologií a simulačních výpočtů k optimalizaci vzájemných silových účinků kolejových vozidel na trať.

K myšlenkám autora, kam se má ubírat další vývoj v pojezdech kolejových vozidel si dovoluji dodat tyto poznámky:

- vývoj lokomotivního podvozku – použití aktivního radiálního stavění, optimalizované tuhosti sekundárního vypružení doplněného adaptivními tlumiči je jistě správný výzkumný směr. K aplikaci plně odpruženého přímého pohonu dvojkolí by bylo vhodné provést důslednou hmotnostní a dynamickou analýzu pohonu. Přímý pohon u lokomotivy znamená použití hmotnějšího vícepólového trakčního motoru (ASM nebo PMSM). Nejsm si jist, zda použití zcela odpruženého integrovaného pohonu tvořeného vysokootáčkovým trakčním motorem s převodovkou nebude hmotnostně příznivější. Přímý odpružený pohon byl testován již při vývoji střídavé asynchronní lokomotivy Škoda 85 E a byl později nahrazen pohonem s převodovkou.
- s dalším vývojem aplikace použití semiaktivně řízených tlumičů u elektrických jednotek a osobních vozů se vzduchovým vypružení souhlasím.
- vedle hnacích vozidel je třeba věnovat pozornost vývoji moderních k železniční trati „přívětivějších“ dvounápravových podvozků pro nákladní vozy, které tvoří nemalou část vozového parku dopravců.

Souhlasím s názorem, že o tom, zda nové technologie uvedené v habilitační práci budou v praxi zavedené, bude výrazně ovlivněno i způsobem hodnocení a stanovení výše poplatků za použití dopravní cesty. Domnívám se, že návrh metodiky uvedené ve 4. kapitole habilitační práce je krok správným směrem, který by uplatnění nových technologií mohl podpořit.

### **3. Výsledky habilitační práce**

Výsledky předložené habilitační práce Ing. Tomáše Michálka, Ph.D. lze shrnout do následujících bodů:

- výrazně přispěl k vývoji nekomerčního simulačního programu *SJKV*, který je k dispozici na DFJP
- na základě simulačních výpočtů, přináší celou řadu dílčích informací a poznatků, které přispívají k detailnějšímu pochopení vlivu inovačních prvků v pojezdu kolejových vozidel na zlepšení jejich jízdních vlastností a na snížení dynamických silových účinků vozidla na trať. Tyto výsledky průběžně publikoval v odborných časopisech a prezentoval na odborných konferencích.
- prezentované vědecké poznatky zavedl do odborné výuky simulace jízdy KV na DFJP
- jako spoluřešitel se podílel na návrhu *Metodiky zpoplatnění poškozujících účinků jízdy vozidel*

#### **4. Význam pro praxi a vědní obor**

Předložená habilitační práce dokumentuje snahu Ing. Tomáše Michálka, Ph.D. přispět svým dílem ke zhodnocení a rozšíření stávajících teoretických a především simulačních či experimentálních poznatků k problematice praktického uplatnění nových technologických prvků v pojezdu moderních kolejových vozidel. Na základě provedených analýz se autor snaží přispět k návrhům využití nových prvků (semiaktivně řízené tlumiče, aktivní prvky, optimalizované flexi-coil šroubovitě vinuté pružiny s pryžokovovými klouby) v pojezdu kolejových vozidel, které by snížily dynamické účinky vozidla na trať.

Autor předkládá i nové náměty na pokračující experimentální výzkum a vývoj nových podvozků hnacích kolejových vozidel a na hodnocení silových účinků vozidla na železniční infrastrukturu. Ze zpracování habilitační práce je patrný velký zájem autora o studovanou problematiku a o získávání nových poznatků.

Zpracováním a obsahem habilitační práce Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. prokázal, že má v problematice simulačních výpočtů jízdy kolejových vozidel pomocí MBS modelů patřičný přehled a velké zkušenosti umožňující mu dobře analyzovat dosažené výsledky, které může v rámci odborné výuky a přednášek předat mladší generaci projektantů a provozovatelů železničních kolejových vozidel. Ovládá moderní metody vědecko-výzkumné práce propojené jak s pedagogickou, tak i s odbornou praxí.

#### **5. Vyjádření k formální stránce předložené habilitační práce**

Předložená habilitační práce tvořená průvodním zhodnocujícím komentářem a doplněná 14 přílohami má velmi kvalitní textové i grafické zpracování. Průvodní komentář habilitační práce vztažený k vývoji simulačního programu *SJKV* a dále k prováděným simulacím na dílčích modelech kolejových vozidel pro simulační ověřování přínosu inovativních technologií v pojezdu hnacích železničních vozidel je přehledný a srozumitelný.

Oceňuji i srozumitelný komentář návrhu *Metodiky zpoplatnění poškozujících účinků jízdy vozidel*. Habilitační práce se odkazuje na 22 literárních zdrojů a na 14 příloh habilitační práce, které obsahují odkazy na další literární zdroje.

Pro větší přehlednost mohl být Seznam odkazované literatury rozdělen na monografie, normy, články v odborném časopisu, články ve sborníků konferenci, výzkumné zprávy, firemní podklady a internetové zdroje. V textu habilitační práce jsem našel minimální počet překlepů.

I přes výše uvedené drobné připomínky se domnívám, že předložená habilitační práce splňuje podmínky tvůrčí pedagogické a vědecké práce a **doporučuji** ji k obhajobě.

***Habilitační práce splňuje dle mého názoru po obsahové i formální stránce požadavky Zákona o vysokých školách, proto doporučuji, aby po komplexním zvážení pedagogické způsobilosti a***

***praxe byl pan Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. jmenován docentem pro obor Dopravní prostředky a infrastruktura.***

V Praze dne 11. 9. 2024

doc. Ing. Josef Kolář, CSc.