



Posudek disertační práce

9. 9. 2010

Název tématu: **Torzní kmity pohonného ústrojí autobusu Arway**
Autor: Miroslav Čihák, Ing.
Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Úvod

Zajištění spolehlivosti a bezpečnosti, ale i zvýšení úrovně tzv. jízdní pohody patří k důležitým úkolům konstruktérů vozidel. Respektování požadavků, které souvisí s případnou eliminací negativních důsledků provozu a interakce jednotlivých částí vozidla, nutí konstruktéry inovovat tradiční představy o stavbě vozidla a uspořádání jednotlivých ústrojí.

Tento úvod jsem připojil zejména proto, abych poukázal na aktuálnost problematiky, již se doktorand zaobíral, což ostatně i sám v úvodních kapitolách své disertační práce zmiňuje.

Obsah disertační práce

Doktorand svou práci nazval „Torzní kmity pohonného ústrojí autobusu Arway“ a její obsah rozdělil do sedmi částí, v nichž po krátkém úvodu popsal analytický model soustavy hnacího ústrojí a experimentální práce na skutečném vozidle, ale také analýzu provedenou s využitím programového prostředí ADAMS/view. Textová část je doplněna řadou obrázků a grafů s výsledky simulací i měření.

Součástí publikace je rovněž seznam použitých symbolů, seznam použitých zkratk, seznam obrázků, tabulek a seznam použité literatury. Rozsáhlá příloha doplňuje hlavní část disertace (devět souborných příloh s tabulkami i grafy a schémata). Grafické provedení je příkladné.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Stav zkoumané problematiky popsal doktorand již v úvodní části své disertační práce, kde poukázal zejména na metody, jež byly dříve užity a publikovány. V odstavci, který nazval „Rešerše literatury pojednávající o torzní dynamice“, předkládá přehled metod různých autorů. Věnuje pozornost také souvisejícím pracím (výzkumné zprávy, doktorské práce či odborné články). O odpovědném přístupu autora k analýze současného stavu svědčí i poměrně rozsáhlý seznam literatury, který je součástí šesté kapitoly práce (seznam je členěn i s ohledem na témata a podle jednotlivých částí – uzlů hnacího ústrojí), a odkazy uvedené přímo v textu.

Dosažení v disertaci stanoveného cíle

Doktorand si pro svou práci stanovil jako hlavní cíl provést analýzu vlastností hnacího ústrojí v oblasti provozních režimů jízdy autobusu. V práci se orientoval na dynamické vlastnosti soustavy a sestavení analytického torzního modelu, který potom rozpracoval v programovém prostředí MATHCAD 14.0, a na provedení simulačních výpočtů. Výsledky simulací porovnával s hodnotami naměřenými (nebo stanovenými na základě měření na fyzickém modelu – funkčním autobusu). Doplnil potom také výsledky simulací

na modelu (náhradní model – viz obr. 4-1), který zpracoval v prostředí ADAMS/view.

Autor věnoval analýze vlastností tzv. torzního modelu značnou pozornost. K dosažení cílů zvolil metody modelování a simulace. Sestavil matematický model hnacího ústrojí vozidla, s nímž potom pracoval, a pro simulaci zvolil hlavní provozní parametry (zatížení a rychlost). K ověření modelu byla provedena měření na skutečném vozidle.

Na základě výsledků simulačních experimentů (užitím matematického modelu) a měření na skutečném vozidle autor poukazuje na skutečnost, že jím navržený matematický model poskytuje výsledky, které jsou velmi blízké těm, jichž bylo dosaženo při experimentech a provozních měřeních.

Teoretický přínos disertační práce

Doktorand zpracoval původní matematický model hnacího ústrojí autobusu a provedl s ním řadu simulací. Pro verifikaci výsledků navrhl metody měření a provedl experimenty na skutečném vozidle, rovněž navrhl model v prostředí ADAMS/view a provedl simulace k porovnání výsledků. Přínosem jeho práce je zejména:

- model soustavy – sestavení modelu (globální model a soubor subsystémů a jejich popis¹), analýza soustavy hnacího ústrojí autobusu,
- model ADAMS – popis a analýza soustavy v prostředí ADAMS/view a náhradní (zjednodušený) model.

Praktický přínos disertační práce

Doktorand v práci prokázal a na základě výsledků simulací doložil, že pro identifikaci dynamických vlastností (a souvisejících jevů – odchylky, vibrace či hluk) lze užít i zjednodušený matematický model, který poměrně dobře popisuje chování torzní soustavy. Podobnost charakteristik, které byly stanoveny na základě simulací (vs. měření), je obdivuhodná (kupř. odchylky úhlu natočení v závislosti na čase – viz obr. 3-12), ale velmi dobrá je také podobnost charakteristik spekter (viz obr. 3-13).

Autor uvádí, že v praxi je možné využít modelu jako nástroje pro identifikaci vibroakustických jevů. K tomu je vhodné připojit poznámku, že pro optimalizaci poměrně složité soustavy, již hnací ústrojí autobusu beze sporu je, a pro variaci konstrukčních parametrů (příp. parametrů provozních režimů ad.) bude tento nástroj přínosný.

Přínosem pro praktické aplikace může být i náhradní model (ADAMS), který je možné využít pro zjednodušený přístup k analýze.

Vhodnost použitých metod řešení

Autor využil pro modelování a simulaci zjednodušený popis soustavy a tzv. „diskretizovaný“ model, přesto je seznam veličin, jež popisují soustavu a charakterizují model, rozsáhlý. Pro popis řetězce použil soustavu hmotných kotoučů, jež propojil nehmotnými zkrutnými pružinami, a disipativní účinky vyjádřil tlumením. Přestože některé budící účinky (ale i jiné) mají nelineární charakter, autor model zjednodušil – linearizoval - a označil za reolineární.

Jistě by bylo přínosné, kdyby pro verifikaci výsledků byla v rámci experimentů na vozidle provedena měření většího rozsahu a veličiny identifikovány na vícero místech zkoumaného řetězce, ale s ohledem na zkoumaný objekt (reálný autobus) lze výsledek verifikace (velmi dobrou shodu vypočtených a hodnot zjištěných měřením) a provedené experimenty považovat za velmi dobrý příspěvek k řešení problematiky. Toto propojení teoretického přístupu při modelování a simulaci s přípravou a realizací experimentu s řadou měření velmi oceňuji.

¹ Data pro tvorbu modelu byla získána jednak od výrobců komponent (od firem jako je kupř. Fiat, Meritor, ZF ad.), jednak výpočtem či odhadem některých veličin.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány

V kapitole druhé, třetí a čtvrté je soustředěna podstatná část práce, z níž vyplývá, že tvorbě a verifikaci matematického modelu věnoval autor dostatečnou pozornost. Prokázal, že je schopen řešit složité úlohy a že dokáže užívat jak numerických metod (a programování) pro tvorbu simulačních modelů, tak i volit a použít vhodné metody pro experimenty na díle, jež mají pro verifikaci modelu velký význam.

Přesto bych chtěl připojit poznámku a požádat kandidáta o stanovisko. Přestože úkolem hnacího ústrojí (vozidla) je přenos a případně transformace rychlosti, nelze opomenout další jevy, jež tento přenos provázejí (a přenosu brání). Je tedy nutné zaobírat se jak poruchovými veličinami, tak i vlastnostmi vlastního přenosového prostředí. Autor toto při tvorbě modelu respektoval. Pro přenos rychlosti a zatížení však užívá převodového poměru (ozn. i – viz přehled použitých označení, str. 8 – 10), ale domnívám se, že hodnotu potom využívá jak pro transformaci rychlosti, tak pro přenos zatížení. Takové zjednodušení je typické pro ideální soustavu, kdy transformaci ovlivňují pouze geometrické poměry, z nichž je potom hodnota převodového poměru i určena, ale patrně již nezahrnuje případnou ztrátu rychlosti (skluz) při reálném přenosu rychlosti. Je v modelu zahrnut vliv případné ztráty rychlosti (vliv prokluzu kupř. u řemenových převodů)?

Také bych chtěl kandidáta požádat o odpověď na otázku, zda uvažuje o případném pokračování prací vedoucích k identifikaci parametrů a vlastností hnacích ústrojí (na jiných či obdobných hnacích ústrojích vozidel) a zda existují podmínky pro další měření a porovnání výsledků simulací s výsledky experimentů?

Zda doktorand prokázal odpovídající znalosti v oboru

Doktorand vykonal státní doktorskou zkoušku ve studijním oboru aplikovaná mechanika a řešením vědecko-výzkumného úkolu v rámci doktorské disertační práce prokázal, že ovládá vědecké metody, má teoretické znalosti a přináší nové poznatky.

Formální úroveň práce

Disertační práce je zpracována pečlivě. Její struktura je přehledná, textová část je srozumitelná s příkladnou úpravou, nechybí obrázky či grafy, které velmi dobře doplňují informace o postupu řešení a dosažených výsledcích, ale také četné odkazy na přílohy a použitou literaturu.

V textu se překlepy či drobné chyby vyskytují spíše výjimečně. Některé jsem v textu označil (kupř. viz bez tečky, *měřicí* a měřící). Rovněž nepřesná tvrzení a chyby v užití správné terminologie jsou ojedinělé.

Závěr

Doktorský studijní program je zaměřen na vědecké bádání a samostatnou tvůrčí činnost v oblasti výzkumu nebo vývoje, student - doktorand musí prokázat schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu nebo vývoje.

Disertační práce inženýra Miroslava Čiháka obsahuje původní a i uveřejněné výsledky. Dosaženými výsledky doktorand osvědčil, že je schopen samostatně pracovat v oblasti výzkumu a dosahovat velmi dobrých výsledků, proto tuto práci doporučuji k obhajobě.



Miroslav Malý
recenzent



Recenzní posudek disertační práce

Ing. Miroslava Čiháka

Torzní kmity pohonného ústrojí autobusu ARWAY

K posuzování byla předložena disertační práce o problematice torzních kmitů úplného pohonného ústrojí konkrétního autobusu s dieselovým 6-ti válcovým motorem. Zatímco problematika torzních kmitů klasických torzních řetězců je dobře propracována, torzní kmity rozsáhlých soustav s řemenovými pohony a zejména s vřazenými nehomokinematickými kloubovými mechanismy a s rozvodovým diferenciálem je stále aktuální a disertabilní. Aktuálnost tématu vzhledem k praxi zvýrazňuje zaměření disertace na pohonné ústrojí vyvíjeného autobusu ve stadiu prototypu a její komplexní pojetí, zahrnující analytické, simulační i experimentální vyšetřování dynamických vlastností.

Stanovené cíle zahrnují komplexní analýzu torzních kmitů v režimu sepnuté spojky a neprokluzujících hnacích kol při uvažování všech významných zdrojů buzení a pasivních odporů při jízdě po přímé dráze konstantní rychlostí autobusu. Stanovené cíle disertant splnil na výborné úrovni. S velkým nasazením a pečlivostí připravil potřebné návrhové a provozní parametry, které se vyskytují v matematickém modelu systému, sestaveném analytickými metodami.

Použité metody řešení, založené na přirozené dekompozici systému na řadu subsystémů, samostatném modelování kmitání subsystémů včetně buzení, modelování vazeb mezi nimi a vytvoření globálního modelu v maticovém tvaru a v parametrické formě jsou vhodným nástrojem pro splnění deklarovaných cílů. Konzervativní a časově invariantní část globálního modelu byla využita pro výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání a nekonzervativní časově invariantní část modelu byla využita pro analýzu ustálených kmitů, vybuzených klikovými mechanismy motoru příp. i kinematickou úchylkou ve stálém převodu na hnací nápravě. Úplný nekonzervativní a časově variantní model byl kondenzován pomocí modální submatice přidružené konzervativní soustavy jako matice transformační a řešen numericky. Rozsah výpočtových prací je velmi značný a to i v důsledku redukce parametrů a modifikace modelu při různých zařazených převodových stupních. Výsledky jsou přehledně graficky zpracovány a vhodně komentovány.

Výsledky experimentálního vyšetření kmitání volného konce klikového hřídele potvrdily oprávněnost zjednodušujících předpokladů při sestavování matematického modelu, správnost algoritmů výpočtu a vyvinutého vlastní software. Komplexnost disertační práce doplňuje vytvoření modelu pohonného ústrojí v prostředí ADAMS a provedená simulační řešení.

Za hlavní **teoretický přínos** disertační práce ve vědním oboru mechaniky považují zpracování komplexní metodiky dynamické analýzy pohonného ústrojí vozidla zahrnující specifické komponenty jako jsou, řemenové pohony přidavných zařízení, sériově řazené klikové mechanismy, Cardanův mechanismus a rozvodový diferenciál. Klikové mechanismy a linearizovaný Cardanův mechanismus generují parametrické, vnitřní kinematické a vnější silové buzení systému. Metodika přesahuje rámec uvedené aplikace. **Praktický přínos** disertace pro identifikaci zdrojů buzení, hodnocení dynamických vlastností a pro ověřování vhodnosti návrhu konstrukčních modifikací v pohonném ústrojí autobusu ARWAY je nesporný.

katedra
MECHANIKY

ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta
aplikovaných
věd

Univerzitní 22
306 14
Plzeň

377 632 301 telefon
377 632 302 fax

www.kme.zcu.cz

49777513 IČ
CZ 49777516 DIČ



Připomínky recenzenta:

- terminologicky nepřesné je označovat translační tuhosti vazeb (např. větvi řemenových převodů) redukované na hřídel jako radiální a „neproměnný“ redukováný moment setrvačnosti klikového mechanismu definovat výrazem na str. 38,
- výrazy (2-68), (2-110a, b) vyžadují opravu
- prosím o vysvětlení průběhu „celkové úrovně kmitání“ (str. 91), zobrazovaného v amplitudo-otáčkových charakteristikách, neboť v řadě obrázků v přílohách se jeví celková dynamická odezva nižší než odezva na některé z harmonických složek
- dekompozici a samostatné modelování subsystémů $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, považuji za zbytečné
- odvození pohybové rovnice (2-81) s řadou naznačených úprav je „překombinované“, neboť kinetická energie klikového mechanismu (indexy vypouštím) je

$$E_k = \frac{1}{2} \mathcal{J} (\omega + \dot{\varphi})^2 + \frac{1}{2} \eta p^2(\psi) (\omega + \dot{\varphi})^2,$$

kde zjednodušená převodová funkce podle (2.63) je

$$p(\psi) = r \left(\sin \psi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\psi \right)$$

a z Lagrangeovy rovnice vyplývá ihned (bez torzních vazeb na přilehlé komponenty)

$$[\mathcal{J} + \eta p^2(\psi)] \ddot{\varphi} + \eta p(\psi) p'(\psi) (\omega + \dot{\varphi})^2 = F p(\psi)$$

a při dalším zjednodušení $p(\psi) \doteq r \sin \psi$ na levé straně dostaneme pohybovou rovnici

$$\left[\mathcal{J} + \eta r^2 \frac{1}{2} (1 - \cos 2\psi) \right] \ddot{\varphi} = -\eta \frac{r^2}{2} \omega^2 \sin 2\psi + F p(\psi),$$

která plně koresponduje s (2-81),

- v disertaci nejsou uvedeny publikace autora související s tématem práce.

Závěr:

Disertační práce, zpracovaná na aktuální téma, splnila deklarované cíle a vyniká komplexností řešení, rozsahem i úrovní grafické dokumentace a přináší nové poznatky v oboru mechaniky. Student v ní prokázal schopnost tvořivě vědecky pracovat a proto jednoznačně doporučuji disertační práci Ing. Miroslava Čiháka k obhajobě.

V Plzni, dne 28. června 2010

Prof. Ing. Vladimír Zeman, DrSc.

Oponentský posudek doktorské disertační práce
Ing. Miroslava Čiháka
s názvem
Torzní kmity pohonného ústrojí autobusu ARWAY
Torsional vibration on the ARWAY coach drivetrain

Předložená práce má 122 stránek a je rozdělena do sedmi kapitol (včetně seznamu literatury a obsahu) a je doplněna devíti přílohami (70 stránek) a dvěma schématy.

V úvodu jsou stanoveny cíle práce. Jsou doplněny stručnou rešerší literatury pojednávající o torzní dynamice.

V druhé kapitole, nazvané *Analytický model soustavy*, jsou uvedeny předpoklady, na nichž je řešení postaveno, identifikovány zdroje buzení a zátěže a sestaveny mechanické modely sedmi lokálních subsystémů, tvořících model globální. Pro každý subsystém jsou odvozeny pohybové rovnice.

V pododstavci 2.10 jsou úvahy o subsystémech spojeny a jsou sestaveny pohybové rovnice globálního systému popisující pohonné ústrojí autobusu. Pro systém bez tlumení je řešen zobecněný problém vlastních čísel.

Dále je řešena úloha vynuceného kmitání.

A nakonec je řešena úplná pohybová rovnice, a to metodou modální dynamické syntézy. Je vytvořen též model kondenzovaný.

V odstavci 2.11 je provedena analýza výsledků, odkazuje se na přílohy 2, 3, 4 a 5.

Důležitý je odstavec 2.12, kde autor analyzuje meze akceptovatelnosti hodnot pro torzní kmity volného konce klikového hřídele.

V odstavci 2.13, nazvaném *Dílčí závěry*, autor neuvádí závěry, spíše shrnuje rozsah provedeného řešení.

Kapitola 3 je věnována experimentálnímu řešení problému. Uvádí důvody kvůli nimž se torzní kmity měří, kde se měření na převodovém řetězci dá provádět a v neposlední řadě popisuje metody měření. Jednak obecně, jednak ty, které byly v práci použity.

Porovnání výsledků dosažených měření a výpočtem bylo omezeno na srovnání časových průběhů volného konce klikového hřídele. Autor to sám považuje za jistý nedostatek. Vysvětluje to, však praktickou nemožností dostat se s měřicími sondami na místa uvnitř převodového řetězce.

Shoda naměřených a vypočtených hodnot je více než uspokojivá a svědčí o tom, že předpoklady s nimiž byl model vytvořen byly správné.

V kapitole čtvrté, autor doplňuje analýzu torzního kmitání modelováním prostřednictvím programového produktu ADAMS. Výsledkem jsou hodnoty vlastních frekvencí a tvary vlastních kmitů torzního soustrojí a časová odezva na zadanou budící funkci.

Takto získané výsledky jsou srovnány s výsledky modelování popsaného v druhé kapitole. Jsou vysvětleny rozdíly.

V kapitole páté jsou uvedeny celkové závěry. Zase, spíše než o závěry, jde o popis vykonané práce. Pouze poslední odstavec naznačuje, jak by výsledků práce mohlo být použito. Autor by měl odpovědět na otázku, zdali jeho závěrů bude použito při modifikaci konstrukce převodového ústrojí tohoto, případně i jiného typu autobusu.

Poznámky k předložené práci

Odvození je prezentováno telegrafickou formou s minimem vysvětlení a je obtížné je kontrolovat. Na druhé straně autor věnuje velkou pozornost grafické korelaci mezi reálnými konstrukčními celky a jejich mechanickými schématy.

Autor na str. 85 tvrdí, že v příloze č. 3 jsou zobrazeny (i) vlastní frekvence v závislosti na otáčkách, (ii) vlastní tvary kmitu, příslušející jednotlivým otáčkám a (iii) slovní popis vlastních tvarů kmitu. Příloha č. 3 je na stranách 25 a 26 – popis hodnot vynesných v diagramech, význam jednotlivých čar a údajů v barevných "boxech" a komentář k nim však chybí.

*Touhu' fair
něč olovat*

Na straně 95, na konci třetího odstavce, je věta nedávající smysl ... nebo ne hřidelích bezprostředně s ním spojenými.

Autor uvádí, že chyba přibližného vyjádření kinematických závislostí pro pohyb rychlost pístu (vztahy (2-62) a (2-63)) je 0.4% vůči přesným vztahům ((2-62) a (2-63)). Ta chyba je dozajista jiná pro vyjádření posuvu a jiná pro vyjádření rychlosti. Navíc bude záviset na klikovém poměru λ . Oponent by se spokojil se sdělením, že chyba je malá autor by neměl dráždit oponenta neověřenou hodnotou přesnosti.

Nevhodné novotvary, které by šlo nahradit vhodnějšími termíny.

Jsou detekovány optočlenem ... str. 101.

Mont-páka ... str. 101.

Stroboskopické značky (incrementy) ... str. 101.

Obdélníkový průběh TLL ... str. 101.

Značení proměnných veličin stojatými písmeny je nevhodné – není v soulase s pravidly matematické sazby.

Množství odvedené práce při formulaci úlohy a při analytickém a numerickém řešení je obdivuhodné. Kromě pile autor prokázal nemalou invenci při řešení analytických, numerických i programátorských kroků, které úloha vyžadovala.

Obsah předložené doktorské práce prokazuje, že její cíle, byly splněny. Práce je mimořádná nejen svým rozsahem, ale i unikátností dosažených výsledků.

Závěrem doporučuji, aby doktorand byl připuštěn k závěrečné zkoušce a aby po jejím obhájení mu byl udělen titul doktor.



M. Okrouhlík

Praha, 14. července 2010