

Oponentský posudek diplomové práce

Bc. Pavla Halamy

(ZČU v Plzni, FAV, *studijní program*: N3955 Počítačové modelování v inženýrství,
studijní obor: Dynamika konstrukcí a mechatronika)

zpracované na téma

Modelování a analýza vázaných rotujících soustav s nelinearitami (Modelling and dynamic analysis of rotating systems with nonlinearities)

Diplomová práce studenta Bc. Pavla Halamy je věnována modelování a analýze rotujících soustav s uvažováním nelineárních zubových vazeb a nelineárních kluzných ložisek. Text práce je psán v anglickém jazyce, má 61 stran včetně přílohy a je rozdělen do pěti kapitol. V úvodní kapitole je stručně popsán stav řešené problematiky. Následně jsou formulovány cíle diplomové práce. Druhá kapitola je věnována matematickému modelování rotujících systémů, kluzných ložisek a zubových vazeb. Konkrétně je zde stručně popsán konečný hřídelový prvek, model tuhého disku, nelineární matematický model pro hydrodynamické síly v krátkém a dlouhém ložisku a model zubové vazby zohledňující kinematickou úchylku převodového poměru, časově proměnnou tuhost a zubovou vůli. V rámci třetí kapitoly autor práce popisuje metodu modální analýzy pro rotující systémy, sestavení Campbellova diagramu a určení stability systému. Dále je zde popsána metoda modální syntézy vhodná pro redukci počtu stupňů volnosti systému složeného ze subsystémů. V závěru kapitoly je stručně zmíněna problematika vyšetřování nelineárních jevů dynamických systémů. Stěžejní část diplomové práce, tedy čtvrtá kapitola, je věnována aplikaci popsané metodiky na konkrétních třech příkladech. Nejdříve je provedena analýza tuhého Lavalova rotoru s kluznými ložisky, následuje analýza poddajného hřídele s diskem. Poslední a nejzajímavější aplikací je analýza poddajné jednostupňové převodovky s uvažováním kluzných ložisek a zubové vazby. V tomto příkladě je ukázán a analyzován vzájemný vliv dynamického chování zubové vazby a kluzných ložisek. Získané závěry jsou hlavním přínosem této diplomové práce.

Z hlediska struktury je diplomová práce rozvržena vhodným způsobem, po teoretické části následuje aplikační část, kde jsou popsány matematické modely využity. Oceňuji pak především vlastní implementaci matematických modelů v programu Matlab, který byl taktéž využit pro zpracování výsledků například ve formě bifurkačních a kaskádových (waterfall) diagramů. Mírný nedostatek pak spatřuji ve velmi malých a hůře čitelných popisících os grafů v tištěné verzi práce. Práce obsahuje několik terminologických nepřesností, například *coordinate space x configuration space* (str. 10) nebo *analytical x numerical approach* (str. 18). Dále práce obsahuje větší množství gramatických chyb, například *oscillations are not destructible*, některé se v práci opakují, například *than (než) x then (pak)*. Volba anglického jazyku tak kvalitě práce drobně uškodila. V textu se taktéž nachází několik překlepů. V analytické části pak chybí vysvětlení některých proměnných, například rovnice (2.4.8) a (2.4.10), některé matematické zápisy jsou nesrozumitelné, například (3.3.7) a (3.3.9). Výsledky v aplikační části jsou okomentovány příliš stručně, grafy na některých obrázcích (např. 56, 57, 58, 62, 63) nejsou v textu vůbec analyzovány. Dále uvádím několik konkrétních poznámek k textu diplomové práce

- na str. 13 je uvedeno, že disk je excentricky nasazen na hřídel, zatímco na obr. 3 je nasazen centricky a v navazujících matematických vztazích taktéž není excentricita zohledněna,
- na obr. 5 je použit jinak orientovaný souřadnicový systém než na obr. 1, vyjádření hydrodynamických sil v globálním modelu pak vyžaduje přeznačení proměnných, což v textu není zmíněno,

- ve výrazu (2.3.15) jsou chybně uvedeny mínusy u mimodiagonálních prvků,
- na obr. 6, který slouží k odvození vztahů platných pro zubovou vazbu, jsou ozubená kola excentricky uložena, nicméně toto excentrické uložení není ve vztahu (2.4.1) ani dále zohledněno,
- rovnice (2.4.9) je chybně sestavena, průběh takto definované zubové síly neodpovídá zamýšlenému průběhu z obr. 7,
- na str. 36 jsou chybně uvedeny jednotky hustoty materiálu,
- statická analýza v podkapitole 4.3 odpovídá té v podkapitole 4.2, neboť jsou použity stejné parametry ložisek,
- u statické analýzy v podkapitole 4.3 není uveden rozsah úhlových rychlostí,
- v podkapitole 4.3 není uvedena velikost zubové vůle,
- u obr. 52 není uvedeno, k jakému ložisku se vztahuje,
- u obr. 57 a 58 je chybný popis – jedná se o kaskádový (waterfall) diagram,
- na str. 53 ve třetím odstavci není uvedeno, v jakém obrázku můžeme zmíněný jev pozorovat,
- chybí informace, pro jaký zátěžný moment byly získány výsledky z obr. 64,
- literatura není zpracována v jednotném formátu,
- v příloze je uvedena špatná jednotka pro zubové tlumení.

Dále bych chtěl autora práce požádat, aby v rámci obhajoby diplomové práce reagoval na následující dotazy:

- V rámci aplikační části používáte konkrétní parametry pro kluzná ložiska. Z jakého důvodu je vůle v ložisku zvolena jako 0,9 mm? Je tato relativně vysoká hodnota pro hřídel o poloměru 30 mm reálná?
- V podkapitole 4.2 srovnáváte výpočtové časy dynamické simulace neredukovaného (90 stupňů volnosti) a redukováného (25 stupňů volnosti) modelu. Čím byste vysvětlil tak výrazný pokles výpočtového času, který je v případě redukováného modelu přibližně 26krát menší?
- Je ve výpočtu, z jehož výsledků byl vytvořen obrázek 49, uvažována vůle v ozubení? Jakým způsobem se zubová vůle v tomto obrázku projevuje?
- Program Matlab obsahuje různé funkce pro numerickou integraci diferenciálních rovnic, některé z nich mohou být časově efektivnější při simulaci nelineárních systémů. Zkoušel jste i jiné funkce než *ode45*? Pokud ano, s jakými výsledky (rychlost a přesnost výsledků)?

Závěr

Bc. Pavel Halama splnil cíle diplomové práce vytyčené v zadání a prokázal schopnost aplikovat teoretické znalosti z oblasti dynamiky rotorů. Přínos práce spatřuji především ve vytvoření vlastní implementace dané problematiky v prostředí Matlab, která umožňuje analyzovat nelineární dynamické jevy rotorů s kluznými ložisky a zubovými vazbami. S přihlédnutím k výše uvedeným poznámkám hodnotím diplomovou práci známkou **velmi dobře** a doporučuji ji k obhajobě.

V Plzni, dne 20. července 2020

Ing. Radek Bulín, Ph.D.
Oponent diplomové práce