

Oponentský posudok dizertačnej práce

Ing. Radek Bulín: Pokročilé výpočtové metódy pro vyšetřování dynamiky vázaných mechanických systémů s lany a poddajnými nosníky

Úvod.

Doktorand sa v práci venuje modelovaniu a numerickej analýze viazaných mechanických systémov (VMS) s poddajnými prvkami – nosníkmi, lanami, káblami a vláknami. Je spracovaná precízne a veľmi dobre sa číta, pretože formulácie sú jasné a text logicky členený do kapitol a odstavcov. Práca je veľmi prínosná, je zrejme, že autor preštudoval veľmi veľké množstvo relevantnej, predovšetkým časopiseckej literatúry od najvýznamnejších svetových autorov pracujúcich v danej oblasti. Možno zmieniť hlavne A.A. Shabanu.

Autor veľmi dobre prenikol do podstaty súčasného stavu danej problematiky a prispel k nej niektorými cennými pôvodnými príspevkami. Oceniť možno i spoluprácu s vedeckou školou profesora M. Valáška zo strojní fakulty ČVUT v Prahe.

Nebudem sa venovať popisu jednotlivých kapitol a ich výsledkov, pretože sú dobre charakterizované v samotnej práci (Abstrakt, Záver, resp. v texte jednotlivých kapitol).

Dizertačná práca má 134 strán a je rozdelená do ôsmich kapitol, okrem Prehľadu literatúry a publikácií autora k téme dizertačnej práce. Všetky kapitoly sú vhodne usporiadané a dobre členené.

Zhodnotenie významu dizertačnej práce pre obor

Dizertačná práca je pre vedný odbor (česky obor) významná ako z hľadiska teoretického, tak i praktického.

Z praktického hľadiska významne rozširuje možnosti modelovania viazaných mechanických sústav s vláknami, lanami, tenkými poddajnými nosníkmi či káblami. Ide o rôzne typy mechanizmov s danými prvkami, napr. redundantné paralelné mechanizmy, poddajné absorpčné prútky jadrových reaktorov (vyšetrované v práci) a zrejme by sa vyvinutá metodika a programy dali využiť i pri modelovaní napr. lanových mechanizmov pre manipuláciu s rôznymi predmetmi, pri modelovaní trolejových vedení (trolejových drôtov) a vo viacerých iných aplikáciách.

Teoretický prínos práce vidím v komplexnej teoretickej, numerickej i experimentálnej analýze vplyvu poddajných prvkov vo viazaných mechanických sústavách. Bola vypracovaná pôvodná a efektívna metodika riešenia dynamiky takýchto sústav. Boli vyvinuté pôvodné úpravy nosníkových ANCF prvkov s možnosťou preprocessingu niektorých výrazov vedúcich k výraznému skráteniu numerickej výpočtov. Do vyvinutých programov boli implementované Newmarkove metódy využívajúce efektívnu iteračnú kvazi-Newtonovu metódu. A nakoniec boli vyvinuté vlastné MATLAB programy pre rešpektovanie kontaktov s rôznymi modelmi trenia. Významné sú i námety pre ďalší rozvoj riešenej problematiky.

Vyjadrenie k postupu riešenia problému, použitým metódam a splneniu určeného cieľa

Doktorand preštudoval rozsiahle množstvo časopiseckej i knižnej literatúry, detailne a dostatočne kriticky analyzoval metódy a postupy prezentované v prácach svetovo

najvýznamnejších autorov v riešenej oblasti. Pre modelovanie poddajných telies v úlohách dynamiky viazaných mechanických systémov sa na základe tohto rozboru rozhodol použiť metódu využívajúcu absolútne uzlové súradnice vytvorenú Ahmedom A. Shabanom. Výhodami tejto metódy sú konštantná matica hmotnosti prvku a presná reprezentácia „tuhého pohybu telesa“. Dostatočne analyzované boli i viaceré metódy modelovania kontaktu telies a trenia medzi nimi, vrátane stručných historických poznámok. Zmienené boli i dôležité javy ako ulpievanie telies (stick-slip), predsklzový posuv a oneskorenie trecej sily vzhľadom k rýchlosti šmykania. Autor veľmi dobre prenikol do podstaty súčasného stavu danej problematiky. Oceniť možno i spoluprácu s vedeckou školou profesora M. Valáška zo Strojní fakulty ČVUT v Prahe, zrejme hlavne s Ing. P. Svatošom, PhD., ktorý v roku 2017 obhájil na tomto pracovisku doktorskú prácu „Optimalizace a řízení pohybu vláknově ovládaných paralelních mechanismů“.

Práca má stanovených 5 cieľov. Možno súhrnne konštatovať, že sú bezo zbytku splnené. Nemá zmysel charakterizovať splnenie jednotlivých cieľov, lebo to doktorand urobil veľmi prehľadne a detailne v ôsmej kapitole Záver na stranách 115 až 118.

Možno ešte ale doplniť, že ústrednou inšpiráciou pre návrh metodiky modelovania sú práce vyššie uvedeného A.A. Shabanu. V tejto súvislosti si spomínam na profesora J.J. Kalkera z Faculty of Applied Sciences, TU Delft (ten istý názov má i plzeňská fakulta), keď mi v roku 2008 povedal: „... ak multibody dynamika, tak Shabana“. Doktorand si na základe tohto prehľadu vybral pre modelovanie poddajných telies vhodnú formuláciu využívajúcu absolútne uzlové súradnice (ANCF – absolute nodal coordinate formulation). Piata kapitola sa detailne venuje modelovaniu kontaktných síl s bohatými odkazmi na literatúru. Škoda, že nebol zmieneny práve profesor J.J. Kalker, svetovo uznávaný vedec v oblasti valivého kontaktu (medzi kolesom a koľajnicou).

V súvislosti s Lagrangeovými rovnicami zmiešaného typu, ako vhodnou metódou riešenia VMS (druhý cieľ), je škoda, že nebol zmieneny V. Brát zo Strojní fakulty ČVUT Praha, ktorý túto metódu detailne opísal v jeho známej knihe „Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů“, ACADEMIA, Praha 1981.

Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a k pôvodnému konkrétnemu prínosu predkladateľa dizertačnej práce

Výsledkom dizertačnej práce je komplexná teoretická, numerická i experimentálna analýza vplyvu poddajných prvkov vo viazaných mechanických sústavách. Bola vypracovaná pôvodná a efektívna metodika riešenia dynamiky takýchto sústav. Boli podrobne opísané a porovnané nosníkové prvky definované pomocou ANCF prístupu, ďalej boli vyvinuté pôvodné úpravy vektora elastických síl nosníkových ANCF prvkov s možnosťou preprocessingu niektorých výrazov vedúcich k výraznému skráteniu numerických výpočtov. Do vyvinutých programov v prostredí MATLAB boli implementované zmienené ANCF nosníkové prvky a tiež Newmarkove metódy využívajúce efektívnu iteračnú kvazi-Newtonovu metódu, kde je tiež významný prínos dizertanta. Ďalej boli vyvinuté vlastné MATLAB programy pre rešpektovanie kontaktov s rôznymi modelmi trenia a nakoniec boli matematické modely overené pomocou experimentálnych dát. Významné sú i námety pre ďalší rozvoj riešenej problematiky.

Vyjadrenie k systematike, prehľadnosti, formálnej úprave a jazykovej úrovni dizertačnej práce

Práca má z hľadiska systematiky vysokú úroveň. Je spracovaná precízne a veľmi dobre sa číta, pretože formulácie sú jasné, čisté a text je logicky a prehľadne členený do kapitol a odstavcov. Aj z hľadiska formálneho má práca veľmi dobrú úroveň. Počet nepodstatných chýb je malý.

Vyjadrenie k publikáciám doktoranda

Doktorand publikoval ako prvý autor tri vedecké príspevky v renomovaných a dostatočne vysoko impaktovaných medzinárodných časopisoch, troch domácich časopisoch (dva v databáze SCOPUS), prezentoval príspevky na ôsmich významných zahraničných konferenciách, šiestich domácich a má i dva príspevky v zborníkoch abstraktov. Jeho publikačnú činnosť možno považovať za vysoko nadpriemernú.

Konkrétne pripomienky:

- Názov práce je: Pokročilé výpočtové metódy pro vyšetřování dynamiky vázaných mechanických systémů s lany a poddajnými nosníky. V práci sa však spomínajú ešte vlákna a káble. Niekde sa spomínajú nosníky poddajné. Bolo vhodné definovať rozdiely. Asi najlepšie by bolo uviesť na začiatku práce terminologický slovník dôležitých používaných termínov s ich definíciami.
- Pomerne časté používanie anglických názvov metód, často bez dôslednejšieho pokusu o výstižný český ekvivalent (napr. „absolute nodal coordinate formulation (ANCF)“, „bristle contact model“, „elastic line approach“, „creep deformation“ a iné).
- Nekorešpondujúce označenie osí globálneho súradnicového systému X_1, X_2, X_3 a lokálneho x, y, z .
- Možno zbytočné používanie čiarky (na úrovni indexu) pre označenie derivácie príslušnej veličiny (napr. v označení Jacobiho matice väzbových rovníc $\Phi_{,q}$)
- Str. 9: aký je rozdiel medzi c_f a c_s ?
- Str. 9, 26: Hlavným nedostatkom základní verze MKP je, že uvažuje nekonečně malé rotace jako uzlové souřadnice – proč nekonečně malé?
- Str. 20: zrejme znamienkové chyby v rov. (3.2), (3.3), (3.7) a (3.8) – na začiatku prvých riadkov príslušných rovníc plus namiesto mínus.
- Str. 23: vo 4. riadku od konca strany použiť medzery pri písaní označenia osí súradnicového systému.
- Str. 24: v rov. (3.9) chýba nula na konci prvého riadku matice.
- Str. 36: posledný odstavec (hlavne jeho druhá časť) je významovo dosť nejasný.
- Str. 78 (pod rov. (7.1)): nejasne zavedené vektory v rov. (7.1). Navyiac: ... globálním souřadnicovém systému.
- Str. 85: tu použitý termín gravitační síla, inde tíhová síla.
- Str. 88: „... a následně puštěno volným pádem“. Tu ale nejde o voľný pád.
- Str. 90: ... zkoumán vliv chování vlákna v tlaku. Nezdá sa mi tá formulácia vhodná. Pri poklese osovej sily vo vlákne sa proste uvažuje nulová osová síla vo vlákne.

Drobné chyby:

- Str. 15: absolute nodal coordinate formulation (namiesto absolute nodal coordination formulation)
- Str. 34: v rov. (4.36) má byť parciálna derivácia veličiny U_{Iae} (namiesto U_{Ie}).
- Str. 34: zrejme zbytočný posledný člen $r_{,y}$ v rov. (4.38).
- Str. 36: vykazuje namiesto vykazuje.
- Str. 44: ... jako v případě kapitoly 4.2.2.
- Str. 47: ... obecné vyjádření axiálního přetvoření ...
- Str. 58: v rov. (5.38) má byť skalárna nula v druhom riadku.
- Str. 59: nejasný odkaz na polohový vektor p_c .
- Str. 69: ... soustavy algebraických rovnic ...
- Str. 76: ... se zaměřením na ...
- Str. 96: ... což bylo využito ...

- Str. 97: názov Obr. 7.23 – Prubeh obvodove rychlosti kladky a zavazi (ako v titulku obrázku)

Otázky pre doktoranda:

- 1) V práci sa venujete i riešeniu pohybových rovníc viazaných mechanických systémov v tvare algebro-diferenciálnych rovníc (6.10), kde využívate Newmarkovu metódu. Máte skúsenosti s určovaním reakcií pomocou Lagrangeových multiplikátorov, ktoré sa v rov. (6.10) tiež vyskytujú?
- 2) V odstavci 5.3.2 sa venujete aj zložitejšiemu modelu trecej sily zahrňujúceho i modelovanie ulpievania telies pomocou štetinového modelu kontaktu. Ten však závisí od viacerých parametrov (vyhladzujúci parameter κ , tuhosť a tlmenie modelu ulpievania K_{st} a D_{st}). Ako by ste určovali numerické hodnoty týchto parametrov?
- 3) Vysvetlite obecné, zobecnené a fyzikálne súradnice a rozdiely medzi nimi. Možno v prípade použitia fyzikálnych súradníc hovoriť o zobecnených silových účinkoch?
- 4) Definujte nasledujúce termíny: mechanismus, struktura, soustava, systém.
- 5) Viete aspoň približne kvantitatívne posúdiť vplyv priečneho kmitania vlákien, prípadne i ich tuhosti, predpätia a zotrvačnosti naklápania kladiek, na silu vo vlákne a tým i presnosť vláknových paralelných mechanizmov hlavne pri ich vyšších rýchlostiach, prípadne ich väčšom silovom zaťažení? Vami vyvinuté modelovanie a numerické metódy riešenia zostavených matematických modelov by to mali dobre umožňovať.
- 6) Neznižuje použitie ľahkých a tenkých vlákien podstatnú prednosť paralelných mechanizmov – ich tuhosť? Sú už dnes takéto vlákna i dostatočne tuhé pre použitie v presných paralelných mechanizmoch a nemenia sa vlastnosti týchto vlákien v čase?

Záver.

Doktorand použil moderné metódy, prezentoval niektoré cenné vlastné prínosy a preukázal vysokú schopnosť ich aplikácie pri riešení testovacích úloh a tiež problému vláknovo ovládaného redundatného paralelného mechanizmu QuadroSphere či modelovania poddajných absorpčných prútikov jadrových reaktorov s vysokými nárokmi na teoretické vedomosti v oblasti multibody systémov a numerické spracovanie úloh.

Doktorand prezentoval v dizertačnej práci i v ďalších viacerých prácach publikovaných v renomovaných domácich i zahraničných časopisoch, resp. prezentovaných na významných domácich i zahraničných konferenciách, nové poznatky v riešenej oblasti s cennými teoretickými i praktickými prínosmi. Preto

**odporúčam jeho prácu k obhajobe
vo vednom odbore Aplikovaná mechanika**



prof. Ing. Štefan Segľa, CSc.
Strojnícka fakulta, TU Košice

V Košiciach, 9. 4. 2019

Oponentní posudek disertační práce

Pokročilé výpočtové metody pro vyšetřování dynamiky vázaných mechanických systémů s lany a poddajnými nosníky

Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Autor: Ing. Radek Bulín

Kolega Ing. Radek Bulín se ve své disertační práci věnuje problematice modelování specifických soustav mnoha těles, jejichž prvky jsou tenká poddajná tělesa, mezi které autor řadí nosníky, lana, kabely a vlákna. Z pokročilých konceptů simulací těchto poddajných soustav mnoha těles autor rozvíjí zejména formulaci metody konečných prvků v absolutních uzlových souřadnicích (absolute nodal coordinate formulation = ANCF). Práce je ucelená a pokrývá stanovené téma od teoretického rozboru přes problematiku numerického řešení až po počítačovou implementaci při modelování a simulacích. Co se rozsahu týká, má disertační práce 135 stran a je členěna do 8 kapitol. Disertační práce navazuje na práci autora v řešitelských týmech vědeckých projektů.

V úvodní kapitole je formulováno základní téma a popsána struktura práce. Ve druhé kapitole je představen stav problematiky modelování poddajných těles různého typu při vyšetřování dynamiky soustav mnoha těles. Jsou vyzdvíženy výhody metody ANCF. Jako důležitou součást autor diskutuje také problematiku modelování interakcí těles včetně třecích sil. Třetí kapitola je zaměřena na základní metody modelování vláken, kabelů a lan. Nejjednodušší variantou je silová reprezentace lana, která ovšem nezohledňuje ohybové a hmotové charakteristiky lana. Jako další metodu autor představuje reprezentaci lana pomocí hmotných bodů propojených jednostrannými (přenos pouze tahových sil) pružinami. Tento přístup také nepodchycuje ohybovou tuhost lana, ale umožňuje aproximovat diskretizaci dynamiku lana včetně příčných kmitů. Ve čtvrté kapitole doktorand přechází k hlavnímu tématu práce, a to řešení na základě formulace v absolutních uzlových souřadnicích (ANCF). Nejprve v části 4.1 popisuje odvození plně parametrizovaného nosníkového ANCF elementu, poté kabelového ANCF elementu nižšího řádu v části 4.2.. Tento element je navržen tak, aby postihl ohybové chování lana, ale nepostihuje jeho torzní deformaci. Důležitým přínosem pro efektivitu simulací je možnost předpočítávání některých výrazů před samotným výpočtem v rámci preprocessingu. Podkapitolu 4.3. autor věnuje zjednodušení odvození elastických sil při modelování rovinných úloh. Konkrétně zde jde o tenký rovinný ANCF nosníkový element. Pátá kapitola disertační práce je věnována modelování kontaktů u soustav mnoha těles s důrazem na kontakty lan a kladek a podobné situace. S tím pak úzce souvisí problematika modelování tření, která je zde taktéž pojednána. Dále navazuje šestá kapitola pojednávající o numerických metodách pro řešení dynamiky nelineárních mechanických systémů. Pozornost je věnována Newmarkově metodě a v části 6.2 pak je formulována výpočetně efektivní kvazi-Newtonova metoda. Ta je důležitá zejména proto, že u mnoha nelineárních problémů je obtížné získat analyticky iterační Jacobiho matici. Přínosem kapitoly a i disertační práce celé je proto propojení klasické Newmarkovy metody s možnostmi kvazi-Newtonovy metody. V sedmé kapitole kolega Bulín představuje použití pojednaných metod při modelování a simulacích konkrétních poddajných mechanismů obsahujících tenké prvky jako jsou lana a další. Šlo o pohyb velmi poddajného kyvadla, závaží kmitající na tenkém vlákně, kde je simulace doplněna i verifikačním experimentem, detailní model interakce lana a kladky, dynamickou analýzu vlákny ovládaného mechanismu Quadrosphere a modelování poddajných absorpčních proutků

jaderných reaktorů. Práci uzavírá sumarizační osmá kapitola, v níž autor přehledně rekapituluje své hlavní přínosy pro obor disertace.

Předložená disertační práce je na velmi dobré úrovni, působí uceleným a zralým dojmem. Výklad je veden detailně a věcně se zjevným didaktickým nadhledem. Postup autora lze dobře sledovat. Z analýzy stavu problematiky je zjevné, že autor je v oboru práce dobře zorientovaný. Práce je kvalitní i z pohledu formálního a malým počtem chyb a překlepů. O něco přehlednější a početnější by mohlo být navázání jednotlivých ilustračních příkladů na jednotlivé metody modelování lan, zejména u zdůrazňovaného ANCF modelu vlákna, i tak je však práce jasným přínosem oboru aplikované mechaniky. Autor podstatnou část svých výsledků již veřejně publikoval, rozsah publikací vztahujících se k práci je více než dostatečný.

Práci kolegy Bulína považuji za ucelenou a velmi zdařilou a nemám k ní žádné podstatné kritické připomínky. Disertanta chci požádat, aby se během obhajoby vyjádřil k následujícím otázkám vztahujícím se k otázce efektivity simulací a zjednodušování modelů.

- U simulačních modelů soustav mnoha těles je klíčovou okolností spolehlivost a rychlost simulací. Důležité je to jak pro optimalizaci vlastností mechanismů, tak pro návrh a verifikaci jejich řízení. Jaký je potenciál ANCF modelů vláken v rámci mechanismů při redukci modelu? Jaké jsou možnosti a cesty redukce ANCF modelu vlákna? Je možné provádět cílenou redukci modelu omezující frekvenční rozsah odezev modelu vlákna?
- Pro lana v rámci mechanismu Quadrosphere nebyly použity ANCF modely lan ani Newmarkova metoda s kvazi-Newtonovou metodou pro jejich simulaci. Byla použita pro nějaký jiný mechanismus, například rovinný? Míněn je nějaký model kombinující klasické členy, případně poddajné s malými deformacemi a ANCF modely lan.
- Při syntéze řízení je často potřeba linearizovat nelineární mechanický model pro dané polohy. Jak je to s linearizací u ANCF modelů vláken?

Závěr

Domnívám se, že předložená doktorská disertační práce pana Ing. Radka Bulína je zdařilým a významným vkladem k pokročilému modelování a simulaci dynamických mechanických soustav s přímou aplikací na systémy s lany, vlákny a poddajnými nosníky. Je tak přínosem jak po stránce základního, tak i aplikovaného výzkumu a nepochybně splňuje obecné nároky kladené na odbornou a vědeckou úroveň disertačních prací. Vytčené cíle byly beze zbytku splněny a její závěry budou využitelné pro další výzkum na školícím pracovišti i jinde. Práce je zpracovaná pečlivě a má dobrou úroveň také po stránce výkladové a stylistické.

Předloženou disertační práci jednoznačně doporučuji k obhajobě a za předpokladu její úspěšné obhajoby doporučuji, aby panu Ing. Radku Bulínovi byl udělen akademický titul „doktor“ v oboru Aplikovaná mechanika.

V Praze dne 27. května 2019

prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.

