



OPONENTNÍ POSUDEK

práce

Ing. Jana Bartoška

IDENTIFIKACE A LOKALIZACE RÁZOVÉ SÍLY NA KOMPOZITNÍ STRUKTUŘE

V Praze dne 6. 6. 2016

Vypracoval : **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

1. Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Jana Bartoška, vypracovaná na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Práce se zabývá lokalizací místa působení a rekonstrukcí velikosti rázové síly, která může být zachycena a monitorována senzory umístěnými na kompozitové struktuře. Práce obsahuje 108 stran textu. Je rozdělena do sedmi kapitol.

2. Aktuálnost tématu a zhodnocení přínosu disertační práce pro obor

Cíle předkládané disertační práce jsou zařazeny za podkapitulu „Motivace“ a vytyčují čtyři úkoly:

1. Identifikace a lokalizace rázové síly na kompozitové struktuře pro různé energie rázu
2. Vytvoření SHM systému pracujícího v reálném čase
3. Optimalizace rozložení senzorů na konstrukci
4. Vývoj exper. metod pro rázy kompozitů a měření odezvy konstrukce piezosnímači

Tyto cíle hodnotím jako velmi aktuální, vzhledem k rozvoji SHM metod a prostředků ve světě. Práce významně přispívá k know-how pracoviště a její výstupy jsou prakticky využitelné pro zkoušení nejen v laboratorních podmínkách. Poznatky a závěry publikovaného výzkumu rozšiřují dosavadní poznání v oboru a přispívají k jeho rozvoji.

3. Vyjádření k obsahu práce, postupu řešení, použitým metodám a splněním cílů práce

Po úvodní kapitole se druhá kapitola věnuje přehledu současných metod používaných pro identifikace rázových sil a jejich zhodnocení. Poté je v kap. 3 prezentován souhrn teoretických

poznatků získaných z literatury. Čtvrtá kapitola se věnuje numerickým modelům a aplikaci zvolené metody rekonstrukce a lokalizace rázové síly na nosníkové struktuře. Další kapitola rozšiřuje metodu na desky a skořepinové struktury. Šestá kapitola se potom pokouší aplikovat metodu na složitou geometrii křídla letounu a optimalizovat rozložení senzorů. Závěrečná kapitola komentuje a shrnuje získané poznatky a naznačuje další směr výzkumu.

K řazení kapitol mám jedinou připomínku a to vhodnosti zařazení formulace cílů práce až za řešeršní část, která popisuje současný stav ve světě a přednosti i nedostatky jednotlivých metod a postupů. Autor po analýze dostupných prací a výsledků mnoha publikovaných metod zvolil svoji kombinaci metod řešení problematiky: numerické modelování lokalizace rázu pomocí metody minimalizace rozdílu dynamických odezev s využitím metody dekonvoluce signálu v časové oblasti. Volbu tohoto postupu lze označit jako za vhodnou s omezením podmíněnosti úlohy dekonvoluce, kterou však autor zlepšuje aplikací regularizačních metod a podmínkou nezápornosti hledaných hodnot. Autor se tak vyhnul nutnosti provádění aproximace časového průběhu rázové síly nebo zpracování ve frekvenční oblasti, které vyžaduje Fourierovu transformaci, která vzhledem k neharmonickým průběhům signálů by komplikovala vyhodnocení. Navržené metody řešení naopak byly příslibem pro dotažení problematiky i do praktické stránky s možností realizace optimalizace umístění snímačů a nasazení na demonstrační složitější konstrukci. Jistě i zde však zůstává řada otevřených otázek a problémů, např. využití metody pro jiné typy snímačů (např. FBG optické snímače), identifikace soustavy na zatížené struktuře nebo na struktuře s poškozením atp. To ale již přesahuje rámec a vytyčené cíle, které byly provedenou prací zcela naplněny.

4. Stanovisko k výsledkům disertační práce a původnímu konkrétnímu přínosu

Těžiště vlastní tvůrčí práce disertanta leží v kapitolách 4 až 6. Kap. 4 demonstruje velmi úspěšnou realizaci procesu identifikace (tj. rekonstrukce a lokalizace) rázové síly na jednodimenzionální (nosníkové) struktuře. Autor přehledně popsal realizované experimenty na kovovém i kompozitovém nosníku při identifikaci bez šumu i s uvažováním šumu v signálu. Zabýval se vyhodnocením optimálního parametru λ pro Tichonovovu regularizaci přenosu, porovnával výsledky pro různá buzení (kladívko s gumovým, plastovým a kovovým hrotem). Navrhl algoritmus pro rychlé vyhledávání globálního minima pro optimalizační úlohu. Přehledně demonstruje výsledky porovnáním místa lokalizace, časového průběhu experimentální i rekonstruované budící síly a hodnocení chyby polohy lokalizace. Jednorozměrnou úlohu ověřil na identifikaci parametrů při rázu kuličky na kompozitovém nosníku s cílem určit rychlost rázu a hmotnost impaktoru pomocí odezev senzorů. Úlohu verifikoval pomocí MKP. Dále jsou zkoumány případy buzení nosníku představujícího např. mechanické zatížení soustavy. Všechny uváděné výsledky jsou diskutovány a na závěr podkapitol je uvedeno stručné zhodnocení dosažených výsledků. Lze jen souhlasit, že se podařilo odladit navržené metody a realizované algoritmy a bylo dosaženo velmi dobrých výsledků pro všechny demonstrovány případy. Je třeba uvést, že v literatuře a na konferencích prezentované příspěvky se velmi často zabývají podobně konfigurovanými experimenty a realizacemi, včetně autorem použitých metod. To však nesnižuje význam prezentovaných výsledků, neboť na nich disertant získal cenné zkušenosti, které poté přenáší dále na složitější případy.

Výsledky v kap. 5. jsou již rozšířeny do 2D na kompozitovou desku a sendvič, resp. skořepinu (3D). Zajímavé jsou zejména identifikace rázové síly mimo místa umístění senzorů získané z interpolací nebo rekonstrukce rázové síly při použití hmotného impaktoru (2,34 kg) s různou energií a demonstrace vlivu při vzniku zjevného poškození kompozitové desky.

K praktickému ověření má nejbližší popis uvedený v kapitole 6. Zkoušky a analýzy prováděné na segmentu profilu leteckého křídla vyrobeného z vrstveného kompozitního materiálu s různou vazbou tkanin. Vznikl MKP model segmentu a jeho materiálové vlastnosti byly určeny z experimentálních vzorků i s pomocí MKP optimalizace dat realizované modální analýzy kompozitových desek. Poté byl MKP model frekvenčně naladěn na demonstrátor (segment křídla). Ladění SHM systému představovalo nejprve měření i numerické modelování odezvy umístěných piezosnímačů (umístěných nejprve na nosníku a na potahu) na buzení rázovým kladívkem. Takto sestavený model byl poté použit pro řešení problému optimálního rozložení senzorů s cílem maximalizace signálu senzorů. Zde je na místě ocenit vysoký objem realizované experimentální práce i numerických simulací. Oproti „relativně jednoduchým“ zkušebními vzorkům předchozích experimentů byla tato úloha pozoruhodná svým rozsahem, neboť bylo provedeno buzení více než v 90-ti bodech v pěti opakováních. Bylo také potřebné odladit a ověřit přesnost modelování „vetknutí“ segmentu křídla a vypořádat se konvergencí úlohy při výpočtu odezvy. Doktorand také použil dvou typů snímačů (piezo- a opto-snímače) a ukázal „nekorektnost“ piezosnímačů lepených pouze lepicí páskou. Pokud ne již dříve, tak právě v kap. 5 a 6 disertant přesvědčivě dokázal, že významně překročil „práh“ současným poznatků aplikace SHM systémů s implementací algoritmů lokalizace a rekonstrukce impaktního poškození reálných kompozitních struktur.

Dotazy k práci:

1. V grafech na obr. 4.31 a 4.32 jsou porovnávány hodnoty realizovaných a identifikovaných pádových výšek při měření Kulička1 a kulička2. Oba typy měření měly probíhat pro pádové výšky 50 a 80 mm. Jaké výsledky uvádí obr. 4.32, kde kružnice označené jako „měření“ neodpovídají těmto hodnotám a který případ reprezentují kružnice označené jako „identifikace“?
2. Metoda identifikace byla zkoušena i na sendvičové struktuře. Tloušťka jádra sendviče však byla poměrně tenká – stejná jako tl. potahu. Jaký vliv může mít zvyšování zatlučení kompozitové struktury (např. zvýšením tloušťky jádra sendviče) na použitelnost metody?
3. Bylo by možné využít aplikované metody i pro lokalizaci již vzniklého poškození v konstrukci, pokud by byly známy přenosové matice v předchozím nepoškozeném stavu?

5. Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni práce

Práce je psána logicky, se systematickým řazením kapitol i podkapitol, má výbornou grafickou úpravu a byla psána velmi pečlivě. Několik nalezených překlepů nebo nejasností nesnižuje její hodnotu. Zejména bych doporučil korigovat Tyto připomínky však nejsou zásadní z hlediska odborné úrovně práce.

6. Vyjádření k publikacím studenta

Disertant ve své práci publikuje řadu původních výsledků experimentálních zkoušek i numerických analýz. Uvádí celkem 22 publikací souvisejících s tématem disertace a to jak příspěvků na tuzemských i zahraničních konferencích i časopiseckých publikací. V textu práce však cituje pouze některé své práce. Znamená to snad, že výsledky uveřejněné v pracích A[10] až A[22] (s výjimkou prací A[15] a A[19], které jsou citovány) nebyly v práci použity?

7. Závěrečné hodnocení

Domnívám se, že předložená disertační práce ing. Jana Bartoška splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, že disertační práce musí obsahovat původní výsledky a že výsledky práce musí být uveřejněné nebo přijaté k uveřejnění. Autor v ní prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického i kritického přístupu k hodnocení výsledků. Doporučuji, aby v případě uspokojivých odpovědí na dotazy oponentů a úspěšné obhajoby mu byl přiznán titul Ph.D.



Milan Růžička

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Ing. Jana Bartoška

IDENTIFIKACE A LOKALIZACE RÁZOVÉ SÍLY NA KOMPOZITOVÉ STRUKTUŘE

Cílem práce je stanovení časového průběhu a místa působení rázové síly na kompozitové struktuře. Disertace obsahuje celkem 119 stran, je rozdělena do 7 kapitol, po nichž následuje soupis literatury a seznam prací autora související s tématem práce. Téma disertační práce spadá do oblasti moderních metod monitorování konstrukcí (SHM), které jsou uplatňovány v různých oborech strojírenství či stavebnictví. Při těchto metodách je konstrukce trvale osazena senzory a její stav je určován na základě naměřených signálů. S rozvojem kompozitních materiálů a jejich použití v nosných částech strojů vzrůstá nutnost rozšíření metod monitorování o detekci poruch typických pro tyto materiály, jako je např. delaminace vlivem nízko-rychlostního rázu. Práce se věnuje zjištění průběhu a místa působení rázové síly na různých kompozitových strukturách za použití kombinace experimentálního měření a numerického modelování.

V úvodní kapitole je uvedena motivace práce, kterou je použití identifikace rázové síly v systému SHM pro monitorování kompozitových konstrukcí. Dále jsou v úvodu představeny cíle práce, kdy hlavním cílem je identifikace a lokalizace rázové síly na kompozitové struktuře pro různé energie rázu. Dalšími cíly je vytvoření SHM systému pracujícího v reálném čase, optimalizace rozložení senzorů na konstrukci, vývoj experimentálních metod pro vyhodnocení rázové události a měření odezvy konstrukce piezoelektrickými snímači.

Ve druhé kapitole je provedena rešerše současného stavu metod rekonstrukce a lokalizace rázového zatížení, kdy jsou metody rozděleny podle několika kritérií. Na závěr kapitoly jsou shrnuty získané poznatky a je vybrána metoda dekonvoluce v časové oblasti pro určení časového průběhu rázového zatížení a metoda minimalizace rozdílu naměřených a identifikovaných odezvy pro určení místa rázu.

Ve třetí kapitole jsou stručně shrnuty teoretické poznatky využívané dále v práci. K hlavním tématům kapitoly patří odezva konstrukce na nízko-rychlostní ráz a řešení přeúrcené soustavy rovnic s přihlédnutím k metodám regularizace.

Čtvrtá, pátá a šestá kapitola jsou nosné kapitoly celé práce a je v nich uvedena práce autora, přičemž každá kapitola je zaměřena na identifikaci rázové síly na jiném typu geometrie. Ve čtvrté kapitole je uvažována nosníková struktura pro kterou je popsána vybraná metoda identifikace. Nejprve jsou uvedeny výsledky virtuální identifikace, kdy byl experiment simulován pomocí analytického modelu. Jsou zhodnoceny metody regularizace při existenci šumu v naměřeném signálu, kdy nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití metody Tichonovovy regularizace s nezápornou podmínkou. Dále jsou uvedeny výsledky identifikace provedené na základě experimentálně naměřených dat na kompozitovém, oboustranně vetknutém nosníku při buzení rázovým kladívkem. Vzhledem k složitosti optimalizačního problému lokalizace rázu je navržen algoritmus pro nalezení globálního minima cílové funkce. Pro kompozitový nosník byl pak sestaven numerický model řešený MKP v programovém balíku MSC.Marc a pomocí optimalizace byly hledány vybrané parametry

rázu ocelových kuliček. V dalším odstavci kapitoly jsou uvedeny výsledky identifikace rázové síly na sendvičovém nosníku tvořeném z pěnového jádra potaženém skelným laminátem. Proces identifikace byl proveden pouze na základě naměřených dat. Dále je uvedeno zhodnocení identifikace rázů na vibrujícím nosníku.

V páté kapitole je rozšířena metoda identifikace na skořepinovou strukturu. Dále jsou uvedeny výsledky identifikace na dvou různých kompozitových deskách z uhlíkové resp. skelné tkaniny při použití piezoelektrických resp. laserových bezkontaktních snímačů. Pro desku ze skelné tkaniny pak byla identifikace provedena až do významného porušení desky.

Šestá kapitola se věnuje identifikaci na složitější geometrii segmentu kompozitového křídla. Pro segment byl vytvořen numerický MKP model v programu Abaqus. Věrohodnost modelu byla experimentálně ověřena pomocí modální analýzy a odezvy piezoelektrických senzorů. Numerický model byl využit k vybrání nejlepší polohy senzorů, kdy hlavním kritériem byla velikost získaného signálu. Porovnání výsledků identifikace pro zvolené a optimalizované rozložení senzorů je znázorněno pomocí histogramů chyb.

V poslední kapitole jsou shrnuty dosažené výsledky a je naznačen další směr výzkumu.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že byl naplněn hlavní cíl práce identifikace a lokalizace rázové síly na kompozitové struktuře. Poloha senzorů byla optimalizována na segmentu křídla a bylo provedeno srovnání výsledků identifikace oproti zvolenému rozložení. Pro opakovatelné provádění experimentů byl navržen a sestaven přípravek z hliníkových profilů. Přestože nebyl vytvořen SHM systém pracující v reálném čase, byly sestaveny programy pro záznam experimentu, vyhodnocení naměřených dat a identifikaci neznámých veličin, který SHM systém funkčně nahrazují. Tím byly splněny i ostatní cíle práce. Nedořešeným problémem je zvolení vhodné sítě referenčních bodů měření a interpolace impulsních odezev mimo referenční místa, kterému se chce autor dále věnovat.

Pro úspěšné řešení problematiky práce bylo nutné zvládnutí celé řady oborů od sestavování experimentů, zpracování signálů až po numerické modelování. Hlavním přínosem práce je aplikace vybrané metody identifikace rázového zatížení na celé řadě geometrií a její ověření pomocí velkého počtu experimentálních měření. Takové množství experimentů bylo proveditelné jen s použitím automatizace pomocí vytvořených programů pro obsluhu experimentů a vyhodnocení získaných dat. Dalším přínosem je zhodnocení dalších vlivů jako je zašumění signálu nebo vznik porušení na výsledky identifikace. V neposlední řadě je přínosné použití numerických modelů pro řešení složitějších problémů, jako je identifikace dalších parametrů rázu na nosníkové struktuře a vybrání vhodné polohy senzorů na segmentu křídla.

Formální připomínky:

V práci jsem našel celou řadu překlepů a prepisů jako např.

str. viii - v pátém řádku je uvedeno „koeficient Tichonovovi regularizace“ a má být „koeficient Tichonovovy regularizace“

str. 5 – ve třetím řádku odspodu je uvedeno „pro který jsou učeny impulsní odezvy“ a má být „pro který jsou určeny impulsní odezvy“

str. 7 - vztah (2.1), v konvolučním integrálu má být místo symbolu „*“, který se užívá pro konvoluci, symbol násobení „krát“

str. 13 – v odst. 2.2.3 je uvedeno „metoda neuronových sítí“ a má být „metoda neuronových sítí“

str. 13 – v odst. 2.3 je uvedeno „podmínka nezápornosti“ a má být „podmínka nezápornosti“

str. 15, ve druhém řádku je uvedeno „provádí dělení“ a má být „provádí dělení“

str. 28 – ve vztahu (4.22) vypadlo znaménko „minus“

str. 32 – v obr. 4.7 je uvedeno „místo buzení“ a má být „místo buzení“

str. 36 – odst. 4.3.1, na obr. 4.14 je nakresleno buzení padající kuličkou. Přitom v celém uvedeném odstavci se provádí buzení pouze rázovým kladívkem. Buzení padající kuličkou se provádí až v odst. 4.4 (str. 47)

str.47, tato strana se 2x opakuje

str. 60 – v prvním odst. a v obr. 5.1 je uvedeno „bi-lineární“ a má být „bilineární“ jako v ostatním textu

str. 70 – ve druhém odst. je uvedeno „na kompozitové desce“ a má být „na kompozitové desce“

str. 97 – „věrnost (?) modelu myla experimentálně ověřena“ a mělo by být „věrnost (?) modelu byla experimentálně ověřena“

str. 98 – „pomocí piezoelektrického měniče“ a mělo by být „pomocí piezoelektrického měniče“

str. 102 – neúplná citace ref. [15]

str. 103 – v ref. [29] je uvedeno „Prometheu“ a má být „Prometheus“

str. 104 - v ref. [35] je uvedeno „Wile, 2005“ a má být „Wiley, 2005“

str. 105 - v ref. [40] je uvedeno „*force identifiicati*“ a má být „*force identification*“

K práci mám následující dotazy:

- Metodu dekonvoluce v časové oblasti lze použít jen při předpokladu lineární závislosti mezi buzením a odezvou konstrukce a při nulových počátečních podmínkách. Dále disertant v práci předpokládal působení jediné osamělé rázové síly. Lze určit rázovou sílu i při nesplnění těchto předpokladů?
- V práci byly pro měření odezvy konstrukce použity laserové bezkontaktní snímače průhybu a piezoelektrické senzory. Které z těchto senzorů jsou vhodnější k určení rázové síly?
- Jak lze začlenit použitou metodu do SHM systému a lze ji využít i k určení jiného typu zatížení?

Vyjádření oponenta:

Práce Ing. J. Bartoška představuje přínos v oblasti monitorování kompozitových konstrukcí. Na práci si nejvíce cením komplexnosti při řešení daného problému, kdy disertant provedl celou řadu experimentů a naměřená data dokázal vyhodnotit a použít pro stanovení rázové síly a místa rázu. Experimentální měření pak doplnil tvorbou analytických a numerických modelů a jejich analýzou pro stanovení dalších závěrů. Doktorand prokázal znalosti v oblasti mechaniky kompozitních materiálů, numerických simulací, experimentálních metod a v neposlední řadě z teorie lineárních systémů.

Disertant je spoluautorem 21 publikací a jednoho funkčního vzorku, které souvisí s tématem disertační práce, přičemž pět publikací je v časopisech, ostatní ve sbornících. Jedna publikace

je v časopise *Materiali in Tehnologije* (Slovinsko) s impakt faktorem 0,548. V této publikaci je disertant vedoucím autorem.

Cíle disertační práce byly v celém rozsahu splněny. Vzhledem k výše uvedenému **doporučuji** předloženou **práci k obhajobě** a rovněž doporučuji, aby po jejím úspěšném vykonání byl Ing. J. Bartoškovi udělen titul

doktor (Ph.D.).

V Praze, dne 6.6. 2016

doc. Ing. Jan Červ, CSc.
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 08.06.2016

ZCU 015767/2016

listy:5 přílohy:

druh:



zcupes f 47016