



OPONENTNÍ POSUDEK

práce

Ing. Petra Sadílka

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 10.05.2013

ZCU 015728/2013

listy: 7

přílohy:

druh:



zcupesc6a8e2

MONITOROVÁNÍ KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ ZA POUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH SENZORŮ A AKTUÁTORŮ

V Praze dne 2. 5. 2013

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

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Petra Sadílka, vypracovaná na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Hlavním tématem práce je výzkum metod pro SHM (Structural Health Monitoring) kompozitních struktur pomocí aktivních a pasivních piezo prvků. Práce obsahuje 111 stran textu a je rozdělena do sedmi kapitol. Disertant sepsal svoji práci v anglickém jazyce.

Hlavní cíl předkládané disertační práce je zmíněn v abstraktu práce a podrobnější rozvedení je potom v úvodní kapitole práce. Cílem je: „navrhnout metodiku, s jejíž pomocí je možné identifikovat poškození na kompozitní struktuře v závislosti na změně spektrální charakteristiky“.

1. Aktuálnost tématu a komentář cílů habilitační práce

O „modernosti“ a aktuálnosti tématu metod SHM pro kompozitní konstrukce asi není třeba dlouze diskutovat, neboť intenzita výzkumu i počet publikací a nových časopisů v této oblasti je vysoký. Autor zařadil rešerši existující literatury do úvodu práce a zaměřil se v ní nejprve na okruh literatury spojené s modelováním piezoprvků v MKP. I když prezentovaný výčet vyvinutých typů prvků a aplikace vyvinutých modelů není široký, komentář cituje stěžejní práce v oboru modelování PZT prvků. Škoda, že autor neměl ambice doplnit kvalitně zpracovanou rešerši v práci [3 - Benjeddou] o nové zdroje, které jsou zde uváděny pouze do r. 1999. Protože název disertační práce nese ve svém názvu pojem SHM, mohla být tomuto pojmu věnována větší pozornost v rešerši i ve vlastním textu. V kontextu práce tento pojem vyznívá velmi zúženě na identifikaci poškození, jehož jednou z metod je monitorování změn modálních vlastností konstrukce. Přitom princip a tím i aktuálnost metod SHM oproti klasickým metodám NDT (nedestruktivního zkoušení) je zcela v něčem jiném.

Bylo by proto vhodnější, kdyby autor exaktně uvedl a blíže rozvedl zamýšlené cíle práce až po této rešeršní kapitole, právě na základě analýzy ve světě dosud publikovaných prací s konkretizací jejich tvůrčího doplnění svým vlastním výzkumem.

2. Vyjádření k obsahu práce, postupu řešení, použitým metodám a výsledkům práce

Kapitola 2 disertační práce nese název „Piezoelectricity and SHM“ a spíše než o kapitolu (její délka je délka 3,5 strany) se jedná o odstavec s velmi stručným popisem principu a historie PZT a možností jejich využití jako pasivních i aktivních prvků. Uvádí dále rovnice s konstitutivními vztahy vazby mechanické a elektrické deformační odezvy piezoprveků. O metodách SHM potom kapitola nepojednává vůbec. Kapitola 3 nese název „Mathematical model of a beam element“ a autor se v ní věnuje návrhu konečněprvkového tyčového elementu založeného na Eulerově-Bernoulliově teorii ohybu. Odvozuje vztahy a aplikuje variační princip a řešení MKP pro ohybový jednorozměrný prvek s kubickou aproximací deformace pro materiálový prvek a lineární rozdělení elektrického potenciálu pro dvourozměrný piezoprvek (s uvážením rozdílu potenciálů po jeho tloušťce). Zabývá se jak modální a statickou analýzou, tak dynamickou (transientní) analýzou a řešení pomocí časové diferenční metody. Výpočty provádí v prostředí MATLABu.

Již byla zmíněna rešerše [3 - Benjeddou] o modelování PZT pomocí MKP, také z historie prací na ZČU jsou mi známy práce Zemčíka aj., kteří se podobnou problematikou zabývali nebo zabývají. Zemčík at al např. publikovali v r. 2007 čtyřuzlový shellový MKP prvek (Int. J. Numer. Meth. Engng. 2007; 70, 934–961). Protože autor disertace se v odvozeních neodkazuje na předchozí literární zdroje, rád bych požádal o odpověď na otázku: **„Která z uváděných analýz beamového prvku je autorova původní a která je z literatury převzata?“**.

Verifikace vlastností a „testování“ prvku je obsahem kap. 4 disertační práce. Autor se nejprve věnuje určování citlivosti na počet elementů a přesnost výpočtu vlastních frekvencí vetknutého štíhlého nosníku. Dále řeší bimorfnní nosník ze dvou piezoprveků v pasivním i aktivním módu deformací. Data pro porovnání nebo verifikace výsledků bohužel chybějí, takže výsledky jsou pouze teoretické. Třetí případ se zabývá již praktickou úlohou modelování vlastností vetknutého nosníku se dvěma piezoprvky v oblasti vetknutí nosníku, umístěnými na horním i dolním povrchu. Disertant testuje na této úloze modální, statickou (tuhostní) i dynamickou analýzu svého programu. Výsledky srovnává s daty z výzkumu svých kolegů (Plundrych 2008). Shoda měřených prvních dvou vlastních frekvencí i statické deformace byla velmi dobrá. Verifikace dynamických vlastností prvku byla provedena harmonickým buzením PZT v oblasti blízké první vlastní frekvenci nosníku. Výsledky byly porovnány s experimentálními měřeními a rozdíly lze spatřovat v řadě vlivů, které autor stručně komentuje.

Obsah kapitoly 5 s názvem „SHM of aluminium structure“ hodnotím jako velmi vhodnou testovací teoretickou úlohu i praktickou realizaci pro demonstrování SHM systému na bázi sledování změn modálních vlastností prutové struktury pomocí PZT senzorů. V této souvislosti pokládám dotaz: **„Lze považovat prezentovaný systém prutů a spojek za původní a disertantem navržený?“** Autor dále v kapitole popisuje a porovnává výsledky modální MKP analýzy a experimentu pro konstrukci „symetrickou“ s plným počtem prutů (17) a „nesymetrickou“ (16 prutů). Užívá jak buzení kladívkem, tak aktivním piezobudičem na jednom z prutů. Za pozitivní považují také mapování, který z typů excitačního pulsu lze považovat za nejvhodnější. Autor dospívá k závěru, že je to obdélníkový puls a testuje různou délku jeho trvání. V podkapitole 5.2 potom autor uvádí výsledky MKP a experimentů pro

simulované poruchy prutů v různých místech základní prutové soustavy. Nastalo, to co lze očekávat, že se simulovanou poruchou (odebráním) prutu došlo ke snížení vlastních frekvencí soustavy. Autor dospívá k jednoznačnému závěru, že tvar pulsu výsledek neovlivňuje, nejednoznačné je však vyznění, zda pro SHM monitoring je vhodné sledovat posun nižších nebo vysokých frekvencí soustavy. **Jaký je finální názor a odůvodnění autora?**

SHM založené na změnách dynamické odezvy je obsahem také kap. 6. V té se disertant věnuje sledování rozvoje trhliny v kompozitové desce s jednosměrným uspořádáním vláken. **Jaké byly skutečné rozměry desky?** Str. 66 uvádí 270x15x1,5 mm, obr. 6.6 i MKP model ukazují jiné proporce délky a šířky (270x150)? Rozvíjí metodu buzení chirp-signálem a porovnává frekvenční odezvy pro desky s různou velikostí impaktem vytvořené trhliny. Tato část práce je ryze experimentální bez simulační analýzy. Výsledky ukázané na vybrané části frekvenčního spektra vykazují hledaný a žádoucí posun k nižším hodnotám podle délky trhliny, čehož lze pro detekci vzniku trhlín jistě s výhodou využít. Je třeba se však také zmínit o „ještě dlouhé cestě“ k aplikovatelnosti této metody pro zobecněný laminát, různé možné módy porušení, které v něm mohou nastat (oproti jednosměrné skladbě), až po problematiku, kterou frekvenční oblast sledovat, jak je metoda citlivá v oblasti „krátkých trhlín“ (když reálné defekty při experimentu se pohybovaly v hodnotách 20-250 mm). Stejnou metodu autor zkouší aplikovat na impaktem poškozovaném sendvičovém nosníku. Problematika složitého prostředí, různých typů a rychlostí šíření vln, vliv rozhraní deska-jádro sendviče a další faktory způsobují, že změny dynamické odezvy při stejném typu buzení (chirp signál) nevedou k jednoduché identifikaci a interpretaci frekvenčních změn. Obtížné je taktéž posoudit vliv „opakovatelnosti“ tvaru odezvy pro sérii vzorků (a v nich zahrnutou „statistickou“ odchylku technologických a tím i mechanických vlastností vzorků) a jev „podobnosti“ poškození, když typ poruchy vypadá stejně, ale již z podstaty stejný není. Tyto otázky ale již práce podrobněji nerozvíjí ani nediskutuje.

Úlohou oponenta je být kritický a navozovat otázky k diskusi. Z druhé strany potřebné také konstatovat, že autor kráčí „v našich krajích“ po dosud nevyšlapaných pěšinách. Proto je třeba vysoce ocenit, že měl ucelenou a logickou koncepci, provedl celou řadu variant měření i výpočtů na různých tělesech a s různou konfigurací. Dovedl si poradit s „proradnostmi experimentů“ (potrápilo ho odstínění vlivu kabelů, parazitní budící frekvence signálu, kvalita kontaktu senzor-součást, podmínky uložení dílu, tvar budícího signálu aj). Všechny tyto problémy diskutuje a aktivně je řešil. V pozadí textu oponent vidí vysoké úsilí věnované zkoumanému problému.

3. Vyjádření k formální úpravě práce a k její jazykové úrovni

Práce má spíše průměrnou formální úroveň. Zejména některé obrázky, fotografie jsou mnohdy neproporční, často i nadbytečné, nebo bez podrobnějšího popisu a legendy nedostatečně ilustrují autorův záměr (např. 5.4, 5.15, 5.16, 6.15, 6.16). Použití angličtiny sice autorovi umožní po korektuře jednotlivé části práce dále publikovat, mnohdy je však zřejmé, že ho jazyk omezoval v podrobnějším popisu, který je často velmi strohý a vyvolává další doplňující otázky. **Např. str. 43 uvádí, že PZT senzor byl instalován na centrální prut soustavy. V případě č. 5 je tento centrální prut při měření odebrán. Jak byla vybudena odezva v tomto případě a kde byl umístěn snímač?**

Je také užita řada nevhodných anglických termínů, např. „strength of output signal“ ve smyslu elektrického napětí (voltage) a další.

Rovnice nebo obrázky, případně text obsahují několik nepřehlédnutelných nepřesností:

- str. 19, rov. (3.19), - chybí kulatá závorka neboť matice **K** se v posledním členu násobí, nikoli odečítají.

- str. 21, rov. 3.38, levá strana má být násobena delta t,
- str. 29 a obr. 4.11 (str. 30) uvádějí různou délku snímače (50 resp. 60 mm),
- proč graf v obr. 6.9 obsahuje jen dvě křivky oproti třem konfiguracím dalších měřených uložení?
- str. 88 poslední dvě věty dole – je totéž řečeno dvakrát jiným způsobem?

Tyto připomínky však nejsou zásadní z hlediska odborné úrovně práce.

4. Stanovisko k původnímu přínosu doktoranda a významu práce pro praxi a rozvoj vědního oboru

Na původnost odvozeného MKP prvků i návrh experimentu již směřovaly moje výše uvedené dotazy a otázka bude uzavřena při obhajobě. Disertantův nepopíratelný přínos, který v disertaci spatřuji, shrnuje sám autor v závěrečné kapitole svojí práce. Komentuje zde koncept výpočtů i experimentů a dosažené výsledky, které jsou pro aplikace SHM kovových i kompozitních struktur pro něho i pracoviště nové, přínosné i poučné pro další směřování výzkumu. Škoda, že zamýšlenou metodiku SHM nerozvádí více než do tří nepřiliš komentovaných bodů. I když disertant na posledním vloženém listě uvádí svých 9 publikací, které mají nepochybně přímou souvislost s disertací a publikují její části (jak požaduje zákon č. 111), postrádám právě odkazy na tyto práce ve vlastním textu práce nebo v jejím závěru. Publikace autora obsahují kromě konferenčních příspěvků na domácí i zahraniční půdě i tři časopisové publikace a splňují požadovaná kritéria. Vhodné by bylo publikovat výsledky práce v zahraničním impaktovaném časopise.

5. Závěrečné hodnocení

Domnívám se, že předložená disertační práce ing. P. Sadílka 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 pokročilých inženýrských přístupů v teorii i experimentu a samostatné vědecké práce. Proto doporučuji, aby v případě uspokojivých odpovědí na dotazy oponentů a úspěšné obhajoby mu byl přiznán titul Ph.D.



Milan Růžička



Posudek disertační práce

Doktorand: Ing. Petr Sadílek

Školitel: Ing. Petr Zemčík, Ph.D.

Oponent: doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

Téma: Monitorování kompozitních konstrukcí za použití piezoelektrických senzorů a aktuátorů

Oponentní posudek je zpracován pro obhajobu disertační práce na základě předložené práce. Disertační práce představuje titulní list, úvodní abstrakty, obsah, 101 stran textu, bibliografické odkazy a přehled publikací autora. Celá práce je v anglickém jazyce vyjma českého abstraktu.

Rozsah práce a její členění odpovídá tématu práce a širší sledované problematice.

1. Aktuálnost tématu disertační práce

Téma disertační práce je směřováno do oblasti kompozitních materiálů, které patří mezi moderní konstrukční materiály a jsou uplatňovány v různých oborech strojírenství či stavebnictví. Zaměření práce je orientováno na hodnocení změn charakteristiky konstrukce po poškození za účelem identifikace poškození a lokalizace. Autorem vybranou charakteristikou jsou vlastní frekvence vzorové konstrukce, které se na základě velikosti poškození mění.

2. Postup řešení problému, použité metody a splnění určeného cíle

Za hlavní cíle, a zároveň nosné kapitoly práce byly po úvodním představení problematiky zvoleny výpočetní metody, představující vytvoření matematického popisu modelu nosníkového elementu (Mathematical model of beam element – 7 stran) a jeho numerický model (Numerical tests of beam element - 14 stran), a experimentální měření na kovových vzorcích (Structural health monitoring of aluminium structure – 29 stran) a kompozitních vzorcích (SHM of composite materials – 39 stran).

V rámci práce doktorand nejprve popsal principy piezo-elektrického jevu a následně konstitutivní vztahy piezo-elektrického elementu. Kapitola Matematický model nosníkového elementu popisuje chování elementu s vrstvou senzoru a budiče, a plynule přechází do navazující kapitoly řešící vlastní tvary následně zkoušených vzorků. Rozsah a obsah kapitol je relativně stručný, postrádám jednoznačnou definici problematiky na základě širšího rozboru stavu poznání ve světě, plynoucí v definování jednoznačných cílů a metod, jak uvedené cíle dosáhnout.

Navazující dvě kapitoly popisují SHM hliníkového nosníku, kompozitního nosníku a sendvičového nosníku. Tyto kapitoly tvoří hlavní oblast bádání doktoranda, který provedl řadu experimentů, vyhodnotil je a porovnal je s numerickým řešením. V rámci experimentu na kovových materiálech získal shodné výsledky experimentu a numerické analýzy. Následně doktorand opakoval měření na kompozitech a sendvičovém nosníku, které podroboval poškození.

3. Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele

Hodnotíme-li dosažené výsledky, docházíme k závěru, že bylo provedeno základní seznámení s problematikou kmitání jednoduchého vzorku, experimentální ověření shody MKP analýzy a následná aplikace nové metody na kompozitní prvky.

Za vlastní přínos doktoranda lze považovat aplikaci nové metody hodnocení stavu konstrukce. Její jednoznačné využití však ještě vyžaduje výraznější zkoumání, protože vyžaduje znát charakteristiky modální konstrukce před porušením. Také samotná identifikace

poškození z výsledků experimentu je velmi náročná a nejeví se jako jednoznačná. Pokud lze již poruchu jednoznačně identifikovat měřením, lze ji také identifikovat i vizuálně. Z toho pohledu je otázkou praktické nasazení metody na reálné konstrukce v provozu.

4. Formální úprava a jazyková úroveň

V rámci formální úpravy nemám výrazných připomínek. Z jazykového hlediska práce dobrou angličtinou popisuje technickou problematiku. Vlastní rozhodnutí zpracovat disertační práci v anglickém jazyce oceňuji. Z možných připomínek upozorňuji na absenci data v odkazech na webovské stránky.

5. Publikace autora

Doktorand je spoluautorem devíti publikací, z čehož tři jsou v časopisech, ostatní ve sbornících. Uvedené publikace se vztahují k danému tématu disertační práce.

Doplňující dotaz:

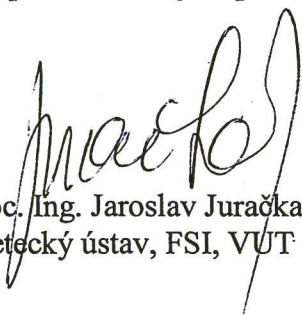
Objasněte důvody volby typu kovových vzorku ve formě rámu a kompozitních vzorků ve formě nosníků, desek a sendviče.

Závěrečné hodnocení disertační práce

Disertační práce pana Ing. Petra Sadílka řeší aktuální problematiku monitorování kompozitní konstrukce a identifikace poškození. Práce má přijatelnou odbornou i formální úroveň. Splnila stanovené cíle a je dílčím příspěvkem k řešení velmi složité problematiky hodnocení kompozitních konstrukcí. Navrhuje možné praktické řešení popsáním postupem.

Vzhledem k výše uvedenému hodnocení doporučuji, aby komise pro obhajobu hodnocené práce přijala práci k obhajobě a aby Ing. Petru Sadílkovi byla po úspěšném obhájení práce přiznána vědecká hodnost „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“.

V Brně dne 13.5.2013


doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Letecký ústav, FSI, VUT v Brně