

Oponentní posudek disertační práce Ing. Michala Mračka s názvem „Finite element method based computational time reversal in elastodynamics“.

M. Španiel

7. 2. 2024

Disertační práce pana Ing. Mračka se zabývá aplikací metody reverzace času při početním stanovení časového průběhu a místa působení budícího signálu pomocí časových průběhů veličin naměřených v jiné části elastického tělesa.

Dosažení stanovených cílů práce.

Autor disertační práce v kapitole 3 deklaruje cíl vylepšit metodu reverzace času a najít efektivní postup jejího nasazení v explicitních řešičích komerčních MKP programů. Jako dílčí cíle si autor stanovuje

1. Vývoj vlastního řešiče pro úlohu lineární elastodynamiky na bázi MKP a explicitní integrace pohybových rovnic kontinua.
2. Vývoj metodiky reverzace času založené na MKP pro korektní rekonstrukci zdrojového buzení.
3. Analýzu citlivosti reverzace času v MKP na parametry výpočtu (hustota sítě, časový krok,...) i vnější parametry (teplota, šum,...)
4. Rekonstrukci reálného zdroje z naměřených dat.

Cíl práce je zvolen tak, aby výsledky výzkumu rozšířily poznání a umožnily další pokrok v oblasti nedestruktivního testování (NDT), monitorování provozního poškození (SHM) nebo vývoje a aplikace digitálních dvojčat. Je formulován s ohledem na aktuální stav problematiky přístupů založených na reverzaci času v rámci MKP, který je stručně, ale dostatečně, popsán v kapitole 2. Na základě předložené disertační práce a publikační aktivity autora v oblasti její tematiky konstatuji, že **autor cíle práce splnil**.

Disertant vyvinul a verifikoval metodiku aplikace reverzace času pro rekonstrukci originálního budícího signálu ze signálu naměřeného v místech vzdálených od lokality buzení. Originalita navrženého postupu spočívá v zatěžování měřené domény v reverzní úloze silami ekvivalentními

časovému průběhu rychlostí v měřené doméně zaznamenanému v průběhu měřeného děje. Verifikačními úlohami založenými na simulaci odezvy tělesa na zvolený zatěžovací signál metodou konečných prvků, rekonstrukci zatěžovacího signálu pomocí reverzace času a to jak s aplikací reverzních rychlostí, tak s aplikací jim ekvivalentních sil v měřené doméně (kapitoly 4.3.1–4.3.6) autor ověřil, že zatížení ekvivalentními silami vede k menší závislosti odchylky signálu rekonstruovaného od signálu originálního na velikosti měřené domény i na době měření. Tento výsledek je ve shodě s úvahou, že (kinematické) zatěžování reverzními naměřenými posuvy se podobá dokonale tuhé hranici, která generuje fyzikálně nereálné odrazy vln.

K dosažení deklarovaného cíle autor vyvinul a naprogramoval a odladil *vlastní* MKP řešič pro úlohy lineární elastodynamiky s explicitní integrací pohybových rovnic na bázi systému MATLAB (kapitoly 4.1 a 4.2). Tento řešič používá stejné postupy (např. diagonalizaci matic hmotnosti, odhad stabilního časového inkrementu a další procedury), které jsou implementovány v odpovídajících řešičích rozšířených komerčních MKP programů, jako jsou např. LS Dyna (Ansys) nebo Abaqus/Explicit (Dassault). Souhlasím s autorem v tom, že tento *vlastní* řešič nesnížil možnost aplikovat vyvinutý postup v komerčních programech a současně posílil schopnost nacházet příčiny a souvislosti jevů při zkoumání postupů reverzace času na základě numerických simulací: při verifikaci (kapitola 4.3.6) a při studiích citlivosti na parametry prostorové i časové diskretizace, na počet snímačů, na drobné diskontinuity a šum v měřeném tělese (kapitola 4.3.7).

Při vývoji procedury reverzace času ve výše zmíněných analýzách autor vesměs aplikoval postup, ve kterém je i měřený jev – napěťové vlny v elastickém tělese vyvolané budícím signálem – simulován v MKP modelu, který je posléze použit i k rekonstrukci metodou reverzace času. V kapitole 4.4 je prezentován případ, kdy je fyzický laboratorní model buzen piezoaktuátorem, jeho odezva je snímána v odlehle lokalitě a využita pro rekonstrukci buzení pomocí reverzace času. Dále je zde (již opět plně numericky) studována citlivost na přesné umístění snímaných veličin v modelu, možnost zpřesnění detekce oblasti budícího signálu křížovou korelací rekonstrukcí provedených nezávisle z více měřených lokalit a naznačen postup detekce trhlin na základě budících signálů vysílaných při zvětšení délky trhliny nebo při uvolnění smykových napětí mezi lícemi trhliny při statickém zatížení.

Rozbor aktuálního stavu řešené problematiky.

Autor v práci předložil stručný, ale odpovídající rozbor aktuálního stavu. Zmínil základy teorie elastodynamiky včetně klasifikace vln a jejich rychlostí, což vytváří kontext pro řešení MKP, tedy v modelu s diskretizací v prostoru i čase. Disertant dále vysvětlil podstatu metody časové reverzace. Nemalou část rozboru věnoval dílčím metodám použitým ve vlastním MKP řešiči, což z hlediska vědeckých výstupů není až tak podstatné, nicméně tím prokázal možnost použít pro aplikaci navrženého postupu i komerční MKP řešiče.

Teoretický přínos disertační práce.

Za teoretický přínos práce považuji návrh transformace naměřených rychlostí v měřené oblasti na ekvivalentní silové zatížení pro reverzní úlohu. Pokud není cílem rekonstrukce absolutních hodnot budícího signálu, ale lokalizace a charakter časového průběhu, naměřené (a upravené pro reverzní úlohu) rychlosti se integrují v čase a aplikují jako síly. Tento postup vede k menší

citlivosti na velikost měřené oblasti i na délku měřeného časového intervalu.

Přínosy práce pro praxi.

Možnost spolehlivé rekonstrukce budícího signálu má velký význam pro detekci a lokalizaci dějů v elastických tělesech. Představuje nové možnosti pro klasické NDT metody a může se dobře uplatnit v moderních koncepcích, jako např. při monitoringu provozních poškození nebo při vytváření digitálních dvojčat.

Autor volil odpovídající metody a správně je aplikoval.

Formální úroveň práce.

Strukturování a grafická úprava práce jsou na vysoké úrovni. Práce je logicky členěná do kapitol a podkapitol obsahuje řadu obrázků, grafů a tabulek, které vhodně doplňují text. Pokud mohu posoudit úroveň jazyka (práce je psána v angličtině), hodnotím ji jako vysokou. Autor používá jasné a výstižné formulace a velkou pozornost věnuje i terminologii. Ve stěžejní kapitole 4.3 by mohla být specifická symbolika, např. \square_* , podrobněji vysvětlena, viz dotaz 1.

Teze.

Autor spolu s dizertační prací předložil teze. Teze představují zkrácenou verzi dizertační práce. Struktura i obsah tezí jsou v plném souladu s předloženou dizertační prací.

Závěrečné hodnocení.

Ing. Michal Mračko předložil práci, která je přínosem aplikace metod reverzace času. Cíle práce byly beze zbytku splněny, práce má vysokou úroveň jak po stránce odborné, tak i po stránce formální. Je zřejmé, že autor má kromě vynikajících znalostí v oboru i schopnost je aplikovat v tvůrčí výzkumné nebo vědecké činnosti. **Práci doporučuji k obhajobě** a po jejím úspěšném obhájení doporučuji udělit panu Ing. Ing. Michalu Mračkovi titul „**doktor**“ (Ph.D.)

Miroslav Španiel

Dotazy pro disertanta

1. Vysvětlete podrobně význam \mathbf{f}_{ext} a $\mathbf{f}_{ext,*}$ na pravé straně $\mathbf{f}_{ext}(t + \Delta t) := \mathbf{f}_{ext}(t + \Delta t) + \mathbf{f}_{ext,*}(t + \Delta t)$ at $\partial\Omega_m$ ve schématu „Application of 'loading' of **TYPE II**“ na straně 40.
2. Platí předpoklad, že budící síla odpovídá integrálu budící rychlosti univerzálně? Jsou-li nějaká omezení, šlo by je kvantifikovat?