



## **APPLICATION OF THE IMPACT-ECHO DIAGNOSTIC METHOD FOR THE DETECTION OF LARGE CAVITIES IN THICK-WALLED CONCRETE STRUCTURES OF NUCLEAR POWER PLANTS**

**Š. Morávka\***

***Summary:** The methods, how to do in-service inspections of ageing reinforced concrete of nuclear power plants more quickly, cheaply and reliably, are still looking for. Advanced Impact-Echo method seems to be very hopeful. It consists in the locating void position by the reflections of elastic waves between the void and surface. This paper continues a set of previous works. The numerical simulations of the fast transient processes for the detection and localization of cavities in the different positions are presented here. The second way - the detection in frequency domain exactly according to ASTM - will be demonstrated in second part of the paper.*

### **1. Úvod**

Pro obnovování provozní licence musejí jaderné elektrárny prokazovat svoji bezpečnost. Ta je významně ovlivňována spolehlivostí stárnoucích betonových konstrukcí. Právě provozní prohlídky tlustostěnných armovaných betonových konstrukcí, které nejsou přímo přístupné, patří do první skupiny bezpečnostních priorit Komise pro bezpečnost jaderných zařízení CSNI (Commission on Safety of Nuclear Installation) NEA (Nuclear Energy Agency) OECD.

Nové metody, jak provádět provozní prohlídky tlustostěnných železobetonových konstrukcí rychleji, levněji a spolehlivěji, se stále hledají. Nadějná metoda Impact-Echo (podle ASTM C1383, viz lit.,1998) spočívá buď ve zjišťování polohy vad podle frekvence odrazů akustických vln mezi vadou a povrchem anebo v odrazu vln od nespojitostí a nehomogenit. Tímto způsobem (tj. ve frekvenční oblasti) lze ale velmi obtížně hledat trhliny kolmé k povrchu, případně stanovovat i jejich hloubku. Na rozdíl o řady autorů, např. Schubert (2003, 2004), se pokoušíme o detekci vad v časové oblasti, podle časů příchoďů a tvaru vlnových čel. To je postup méně obvyklý, ale může přinést další výsledky, viz např. také Anish Kumar et al. (2002) nebo Yiching et al. (2004).

Tento příspěvek navazuje na studii možností detekce armování a na modelování kolmých trhlin na obou površích, Morávka et al. (2003 a 2004). Vliv hloubky trhlin a lokalizace uzavřených trhlin byly prezentovány mj. v Morávka et al. (2004). Detekce ukloněných trhlin byla prezentována v (Morávka 2005, 2006) a na Cooperating meetingu projektu For384 německých kolegů v ÚJV Řež (2006). První výsledky detekce dutin byly předvedeny v (Morávka 2006) V zahraničí Pečínka et al.: (2004, 2005), ve Fraunhofer inst. Saarbrucken (2005, nepubl.) a na NDE Conference on Civil Eng., St. Louis (2006, nepubl.), v Problemy Pročnosti a Strength of Materials (2006).

---

\* Dr. Ing. Štefan Morávka, Nové technologie - Výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377634708, e-mail: moravka@ntc.zcu.cz.

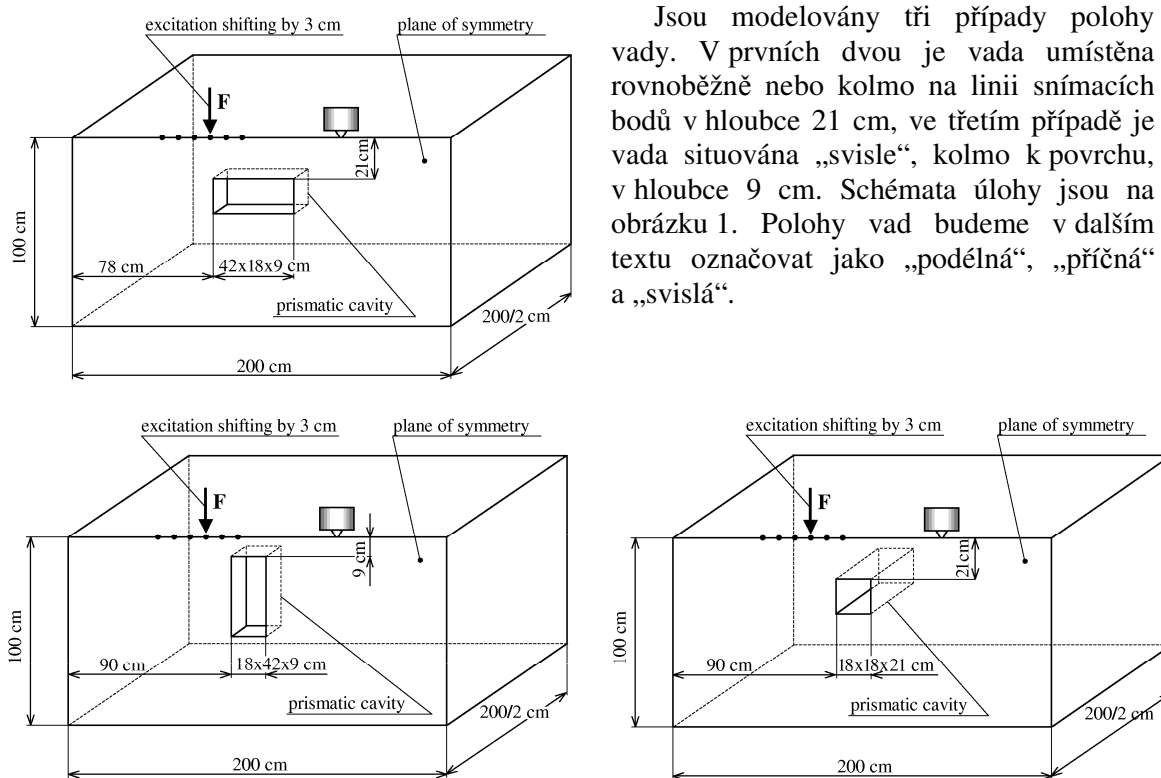
Nyní navazují simulace detekce objemných dutin. Ty mohou v masivních konstrukcích vzniknout např. přítomností cizího tělesa (částí bednění apod.), nebo jako vzduchové dutiny při nedostatečném zhutňování směsi. Hlavním cílem této práce jsou:

- numerické simulace detekce a lokalizace prizmatické podlouhlé dutiny ve třech různých polohách vzhledem k povrchu stěny v časové oblasti.
- ověření možnosti lokalizace stejných vad ve frekvenční oblasti.

Práce probíhají ve spolupráci s Ústavem stavebního zkušebnictví VUT Brno a s Ústavem jaderného výzkumu v Řeži.

## 2. Numerický model

Přechodové děje šíření elastických vln numericky modelujeme MKP na výřezu rovinné betonové stěny o rozměrech 2x2 a tloušťce 1 metr. Využívající rovinnou symetrii modelu můžeme řešit poloviční modely o cca 70 tisících 3D prvcích. Vadu představuje prizmatická dutina o rozměrech 42 x 18 x 18 cm. Počítány jsou odezvy na jednotlivá buzení ležící na povrchu stěny v linii procházející středem vzorku. V této dvoumetrové linii se bod buzení posouvá po 3 cm, celkem se tak postupně počítají odezvy na buzení v 67 různých bodech. V týchž 67 bodech se pro každé buzení snímá časový průběh posuvu kolmého k povrchu.



Jsou modelovány tři případy polohy vady. V prvních dvou je vada umístěna rovnoběžně nebo kolmo na linii snímacích bodů v hloubce 21 cm, ve třetím případě je vada situována „svisle“, kolmo k povrchu, v hloubce 9 cm. Schémata úlohy jsou na obrázku 1. Polohy vad budeme v dalším textu označovat jako „podélná“, „příčná“ a „svislá“.

**Obr. 1.** Schémata numerických modelů

Software: Numerické modely diagnostiky metodou Impact-Echo byly realizovány metodou konečných prvků, softwarem MARC/MENTAT firmy MSC. Tento systém byl použit i v předcházejících citovaných pracích a také již dříve podrobně testován a verifikován experimenty, např. Morávka (1998a, b, 2000, 2001).

Prostorová a časová diskretizace: Stěny jsou modelovány jako 3D tělesa osmiuzlovými izoparametrickými prvky s plnou integrací. Velikost hrany prvků je 3 cm. Nejkratší vlna, kterou takový model může přenést bez poklesu amplitudy, má vlnovou délku  $\lambda_{\min} = 60 \text{ mm}$ . Tomu odpovídá tzv. mezná frekvence přibližně 70 kHz. Podobně omezuje frekvenční pásmo i velikost časového kroku integrace. Je tedy účelné, aby obě frekvenční omezení byla „podobná“. Podrobněji např. Okrouhlík et al. (1976), Brepta (1982), Morávka (1999). Časový krok integrace byl s ohledem na velikost prvku zvolen  $\Delta t = 7 \mu\text{s}$ . Integrace se provádí do času  $t = 1001 \mu\text{s}$ , kdy již výsledky začínají znehodnocovat odrazy od okrajů vzorku.

Metody diskretizací: Pro časovou diskretizaci byla zvolena implicitní Newmarkova integrační metoda s modifikovanými koeficienty:  $\beta = 0,275625$  a  $\gamma = 0,55$ . Tím, zachovávající bezpodmínečnou stabilitu metody, zavádíme mírné numerické tlumení, které potlačuje zejména rušivé vyšší frekvence.

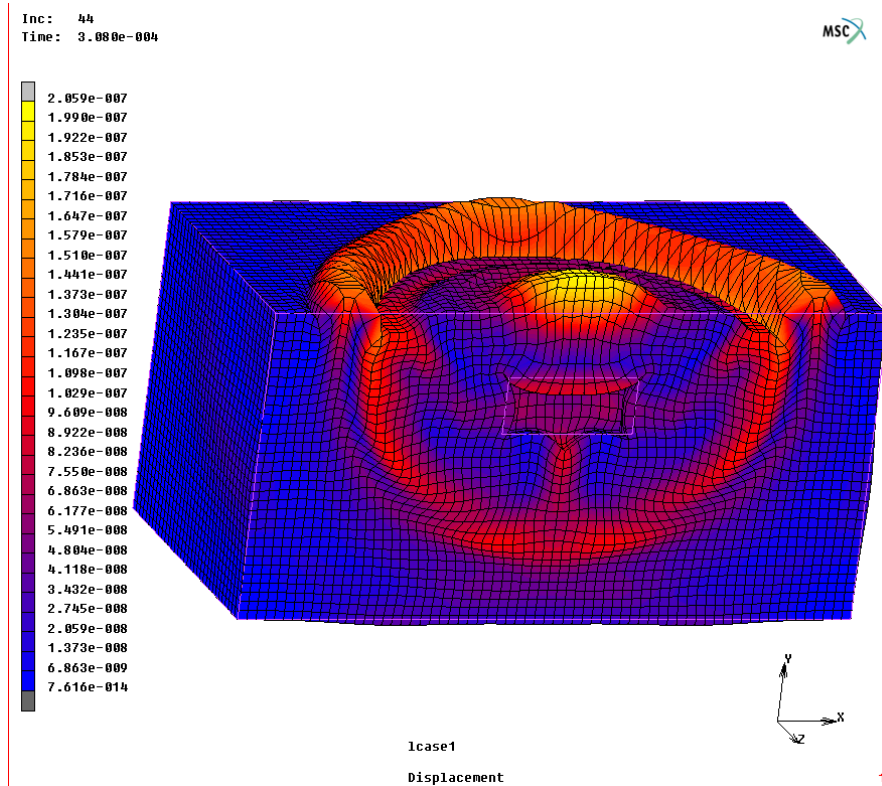
Názory na vhodnost použití implicitní či explicitní formule pro přechodové děje se různí. Výpočet časového kroku explicitní metodou (např. centrální diference) je rychlejší, ale pro dosažení stejné přesnosti je potřeba menší časový krok. Integrační metodu je třeba také volit s ohledem na prostorovou diskretizaci. Zde použitá prostorová diskretizace s plnou (konzistentní) maticí hmotnosti a časová diskretizace Newmarkovo metodou způsobí, že nežádoucí vedlejší účinky obou diskretizací se částečně eliminují, viz např. Morávka (1999). Problematikám frekvenčního omezení, vlnové disperze a numerické anizotropie byla věnována řada prací, z českých např. Okrouhlík (1976) a další a Brepta (1982) a další.

Materiál: Betonová směs podle technické zprávy o betonáži na JE Dukovany (viz.lit.) obsahuje písek velikosti zrn do 4 mm a kamenivo do 16 mm. Vzhledem k nejkratší vlnové délce  $\lambda_{\min} = 60 \text{ mm}$  lze zde beton považovat za *homogenní*. Dále je beton litý, uvažujeme ho tedy jako *izotropní*. Testovací zatížení jsou velmi malá, proto vystačíme s modelem *elastickým*. Mechanické vlastnosti odpovídají betonu B40 podle ČSN 73 12 01.

Buzení: Je realizováno úderem experimentálního kladívka. Podle velikosti kladívka odhadujeme úder o síle 5000 N, trvajícím 36  $\mu\text{s}$ . Zdá se ale, že pro měření bude stačit úder mnohem slabší, viz zmínka o experimentech v závěru příspěvku.

### 3. Detekce v časové oblasti

Detekce dutiny je umožněna odrazem dilatačních a smykových vln od jejího povrchu. Největší výchylky na povrchu registrujeme přímo nad samotnou vadou, pokud zde zároveň budíme. Ke změně odezvy dochází ale i jinde než jen nad hledanou vadou, což o ní přináší další informace, zejména tehdy, pokud by horní povrch vady nebyl rovnoběžný s povrchem stěny. Jako příklad je na obrázku 2 uvedeno rozložení posuvů pro model s podélně situovanou dutinou v čase 308  $\mu\text{s}$ . Odraz čela dilatační vlny od dutiny v tomto čase již potřebí dorazil k povrchu a způsobil jeho vychýlení.



**Obr.2.** Rozložení posuvů v čase 308  $\mu\text{s}$  při buzení přímo nad vadou. Symetrická polovina.

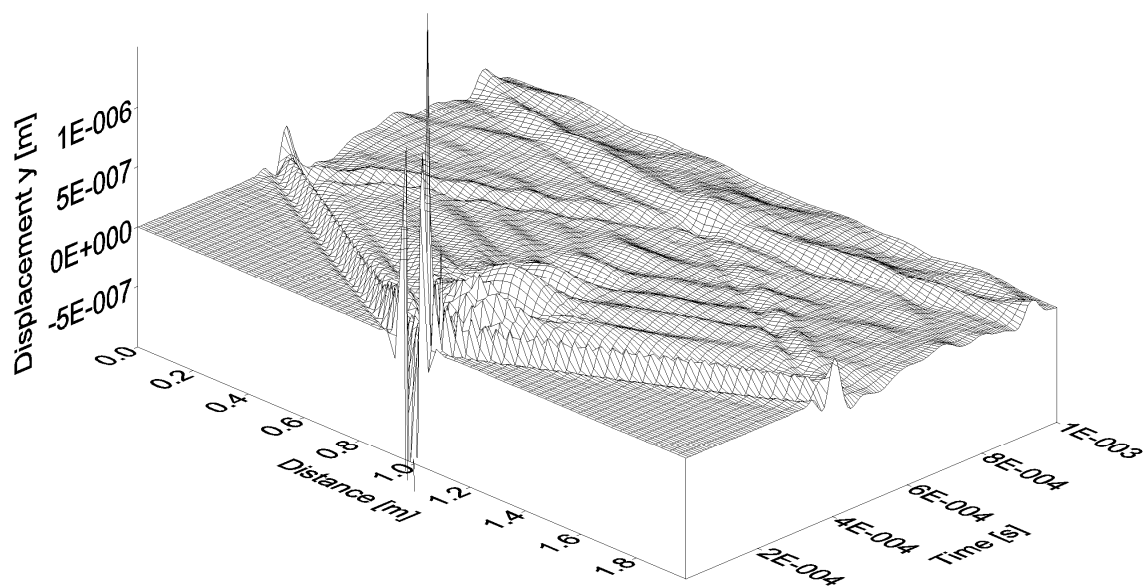
užší oblast buzení. Zajímavé je, že v tomto případě lze odezvu o odpovídající frekvenci (i když s podstatně menší amplitudou) snímat i v širším okolí vady, nejen nad místem s dutinou, viz obr. 3. Dutina ve svislé poloze má menší odrazovou plochu, takže i amplituda odezvy je menší. Je ale blíže k povrchu než obě předchozí a pozorovatelná vyšší frekvence odrazů tomu odpovídá, viz obr. 6 a 7.

Vcelku lze konstatovat, že vada je ve všech polohách metodou Impact-Echo dobře detekovatelná. Samozřejmě, že povrch dutiny, pokud zde není zabetonován zrovna odřezek bednění, nemusí být rovný jako v našem modelu. Nemusí to ale být na závalu, rovinnost povrchu je nutno posuzovat vzhledem k délce vln, resp. měřenému frekvenčnímu pásmu.

Na následujícím obrázku č. 3 je ukázáno rozložení časových průběhů kolmých k povrchu při buzení nad středem vady. Na tomto grafu jsou zobrazeny všechny odezvy na jedno buzení, snímané v linii bodů ležící na povrchu. Na obrázku jsou vidět pravidelné odrazy mezi vadou a povrchem s odpovídající frekvencí. V tomto případě je dutina umístěna příčně ke snímací linii. Šířka odrazů přibližně správně odpovídá šířce dutiny (18 cm), stejně jako pro vadu umístěnou podélně (42 cm), obr. zde neuveden. Zajímavé je uvedené zvlnění o shodné frekvenci v oblasti ne přímo nad dutinou, které u vady položené podélně nenalzáme.

Odezvy při měnící se poloze buzení pro všechny 3 polohy vady budou uvedeny animovaně na konferenci.

Na časových odezvách vzorku s podélně umístěnou vadou lze dobře identifikovat pravidelně se opakující odrazy mezi dutinou a povrchem, viz obr. 4. Amplitudy od odrazů od okrajů dutiny jsou poněkud vyšší (zvýrazněné) než od rovného středu vady. Hranolová dutina umístěná příčně ke směru krokování se projevuje odrazy o stejné frekvenci (vady jsou ve shodné hloubce pod povrchem), ale pro podstatně



**Obr.3.** Časové průběhy posuvu kolmému k povrchu pro vadu v poloze napříč linií snímacích bodů při buzení přímo nad vadou.

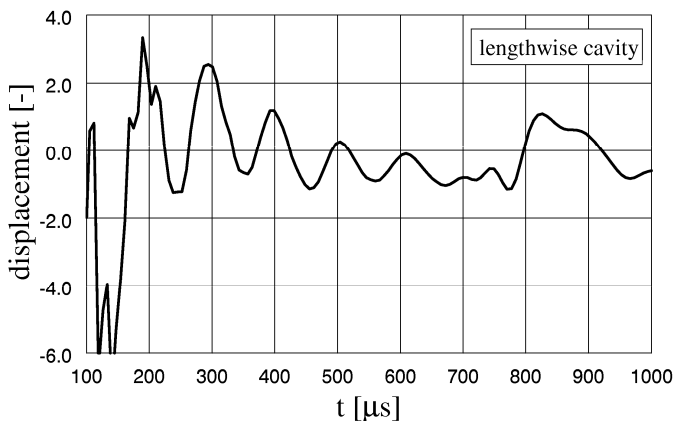
#### 4. Ověření možnosti detekce ve frekvenční oblasti

Výše zmíněná norma ASTM má dvě části - první popisuje postup stanovení rychlosti dilatační vlny v betonu pomocí dvou snímačů o známé vzdálenosti. V druhém postupu je popsáno měření hloubky vady (nebo tloušťky desky), spočívající v nalezení dominantní frekvence, která odpovídá opakovaným odrazům dilatační vlny mezi vadou a povrchem. Takto, ve frekvenční oblasti, lze nalézt např. trhliny nebo dutiny mající rovnoběžnou plochu s povrchem nebo např. kanály pro napínací lana. Takový přístup aplikují např. kolegové v IZFP (Fraunhofer Institut Zerstorungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken) v pobočce ústavu v Drážďanech. Ale velmi obtížně lze takto detekovat trhliny jdoucí k povrchu, jejich hloubku, popř. sklon. V naší práci se pokoušíme o přístup, vycházející z první části ASTM. Pracujeme v časové oblasti - podle časů příchodů vlnových čel a celkového průběhu odezvy a podle a podle předpočítaných modelových simulací usuzujeme na charakter defektu, např. pro šikmé trhliny Morávka (2005 a 2006).

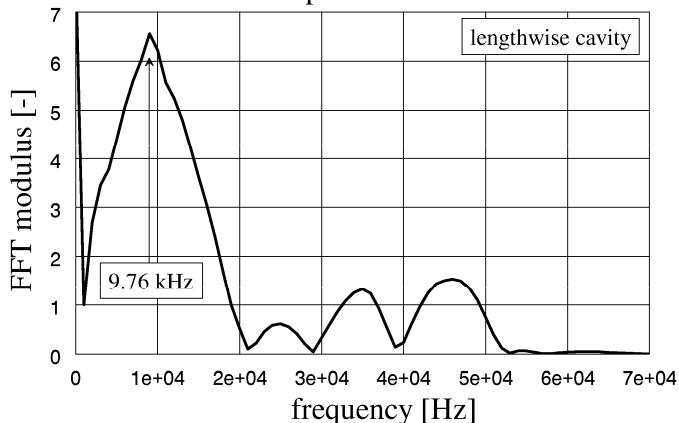
Zde, pro objemné dutiny mající rovnoběžnou stěnu s povrchem, je vhodné aplikovat i právě popsany frekvenční přístup, který pro porovnání možností detekce zde uvádíme.

Na následujícím obrázku 4 je zobrazen časový průběh odezvy vzorku s podélnou dutinou. Budící i snímací místo je identické - jedná o polohu přímo nad středem dutiny. Na první pohled je vidět dominantní frekvence s periodou cca 100  $\mu s$ . Jí při rychlosti dilatační vlny  $c_l = 4101 \text{ m/s}$  a hloubce vady 21 cm odpovídá frekvence odrazů  $f = 9,76 \text{ kHz}$ . Po provedení rychlé diskretní Fourierovy transformace (FFT) se skutečně významný vrchol na této frekvenci objeví, viz obr. 5. Reálný postup detekce neznámé vady je pak opačný: naměřená odezva je transformována FFT a ze známé rychlosti dilatační vlny (viz první část ASTM) je

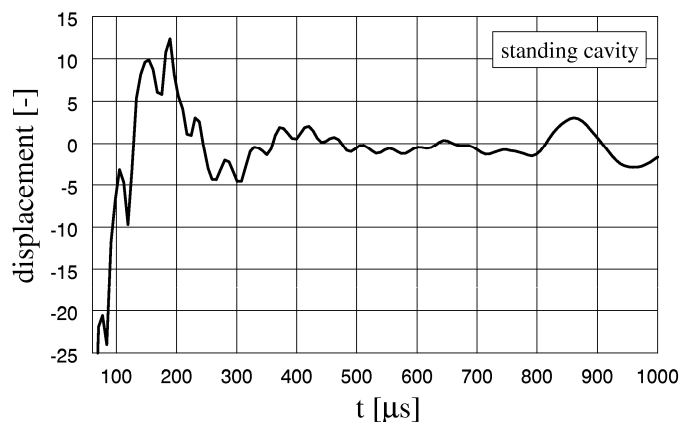
pak vypočítána hloubka vady podle vztahu 
$$H = \frac{c_l}{2f}.$$



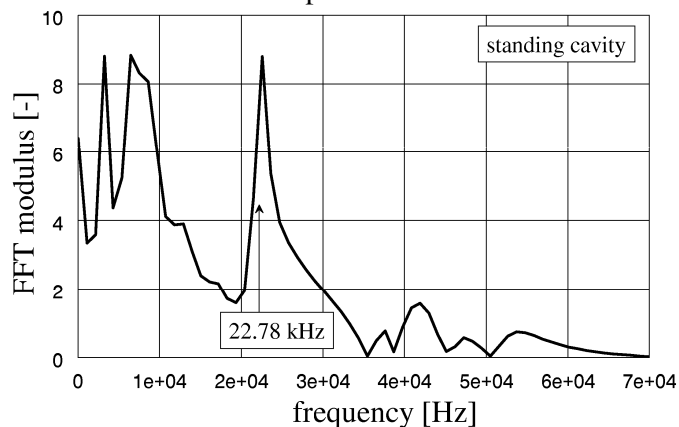
**Obr.4.** Odezva na buzení nad podélně umístěnou dutinou snímaná přímo v místě buzení



**Obr.5.** FFT odezvy nad podélnou dutinou z obr. 4



**Obr 6.** Odezva na buzení nad svisle umístěnou dutinou snímaná přímo v místě buzení.

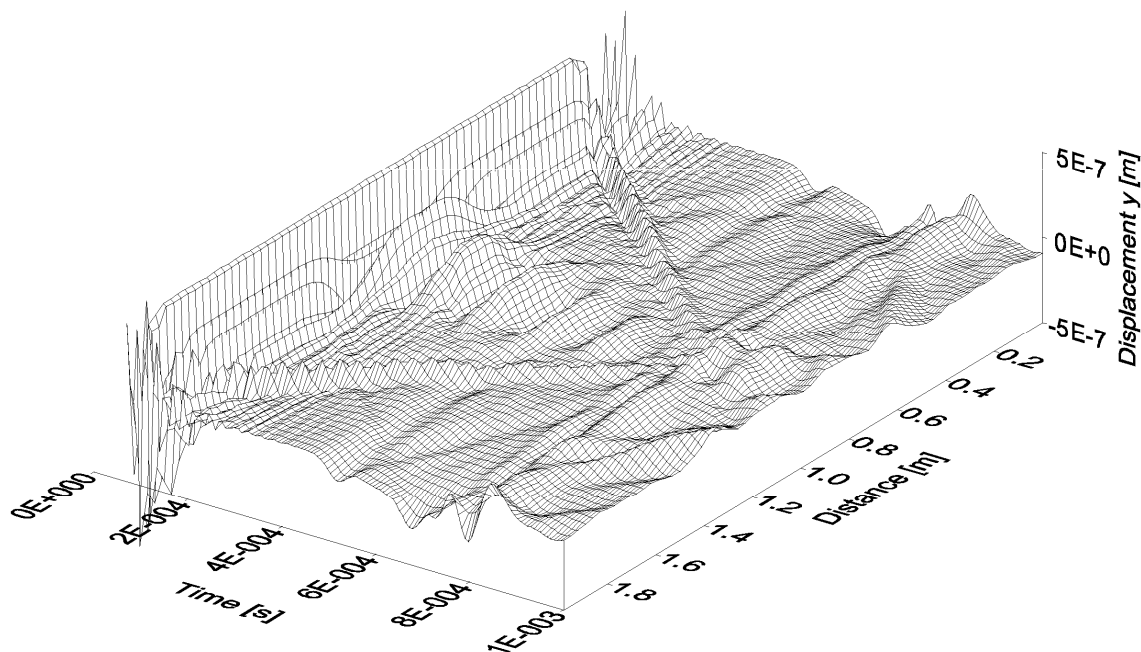


**Obr.7.** FFT odezvy nad svislou dutinou z obr. 6

Stejný postup byl ověřen pro dutinu ve svislé poloze. Zde je vzdálenost mezi vadou a povrchem menší - 9 cm - a také na průběhu odezvy na obrázku 6 je kratší perioda odrazů cca  $45 \mu s$  zřetelně identifikovatelná. Dané rychlosti dilatační vlny a vzdálenosti odpovídá frekvence 22,78 kHz, kterou vidíme na FFT odezvy na obrázku 7.

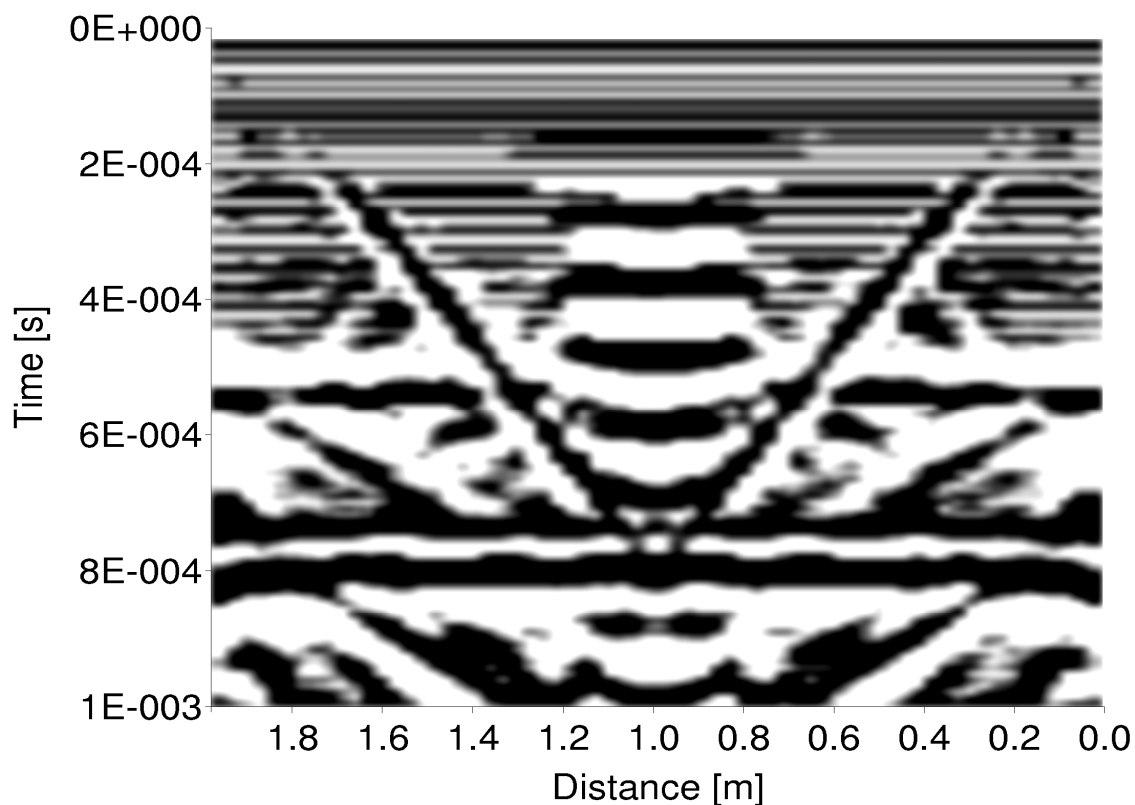
Z uvedených dvou ukázek je zřejmé, že pro tyto vady s plochou rovnoběžnou s povrchem „klasický“ postup dává velmi dobré výsledky. Bylo by jen potřeba snímat delší čas odezvy. Praktická měření ani zpracování výsledků ale nelze realizovat takto - po jednom bodě. Proces měření se různým způsobem automatizuje. Někde mají měřicí rám s příčnickem, který se může pohybovat v jednom směru a na něm uchycený snímač a impaktor (blízko sebe) se pohybují kolmo. Jiným řešením jsou jakési kolejničky, po nichž se pohybuje příčnick se snímačem. Projeté kolejničky se pak demontují a nastavují se dopředu. Takto je možno např. skenovat celou délku mostu. Naskenované průběhy pak tvoří tzv. Impact-Echogram, nebo v případě výpočtu tzv. B-scan. Takový B-scan je uveden na následujícím obr. 8. Na rozdíl od grafu na obr. 3, který zobrazoval odezvu na jedno jednotlivé buzení ve všech bodech skenované linie, zde je každý průběh odezvou na jedno blízké (či identické) buzení.

Poznámka: pro naše relativně krátké průběhy odezvy (napočítané pro účely detekce v časové oblasti) bylo třeba odříznout krátký úsek na začátku, protože při zobrazení B-scanu byla výchylka veliká a ta navíc pak při převodu do frekvenční oblasti vnášela chybu.

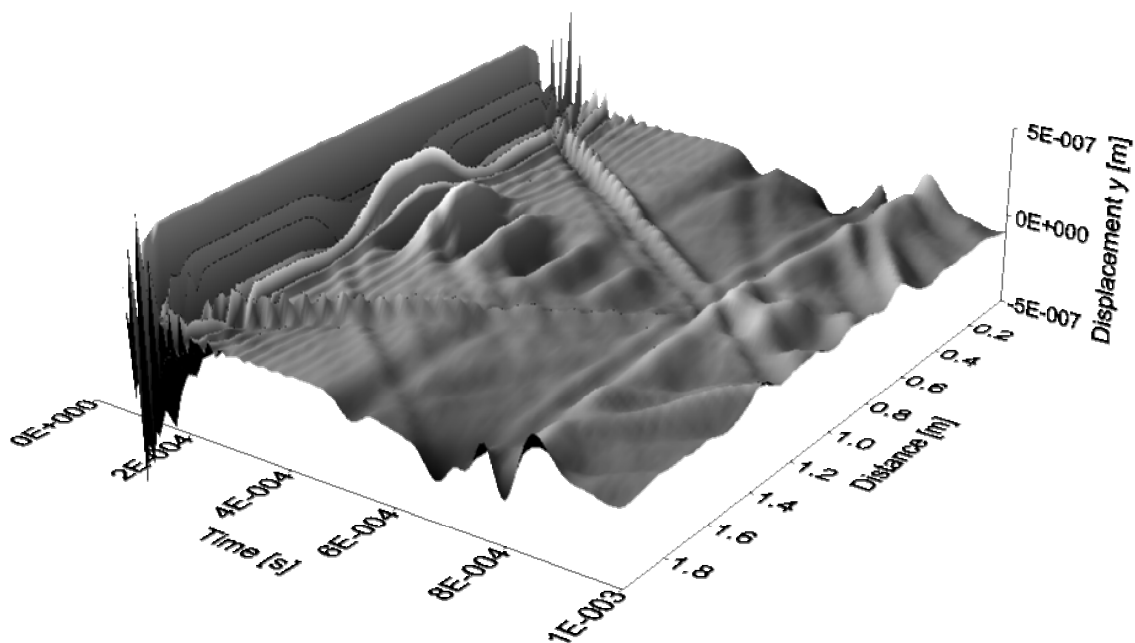


**Obr. 8.** B-scan linie procházající nad podélně umístěnou dutinou.

Úhelným bodem celé metody je samozřejmě správná interpretace získaných Impact-Echogramů, ať už v časové nebo zejména ve frekvenční oblasti a automatizace procesu rozpoznávání vad nebo alespoň „podezřelých míst“. Není proto samoučelné zkoušet různé způsoby zobrazení získaných dat. Na obrázcích 9 a 10 je tentýž Impact-Echogram v časové oblasti, jednou v reliéfním zobrazení a podruhé jako povrchová mapa. Na všech třech obrázcích (8, 9, 10) je dobře vidět zvlněná oblast nad dutinou o délce 42 cm. Šikmé odrazy od boků vzorku a odraz od zadní strany (cca nad 800  $\mu$ s) jsou nežádoucí „vedlejší produkty“, které se jednotlivá pracoviště snaží různými způsoby potlačovat.

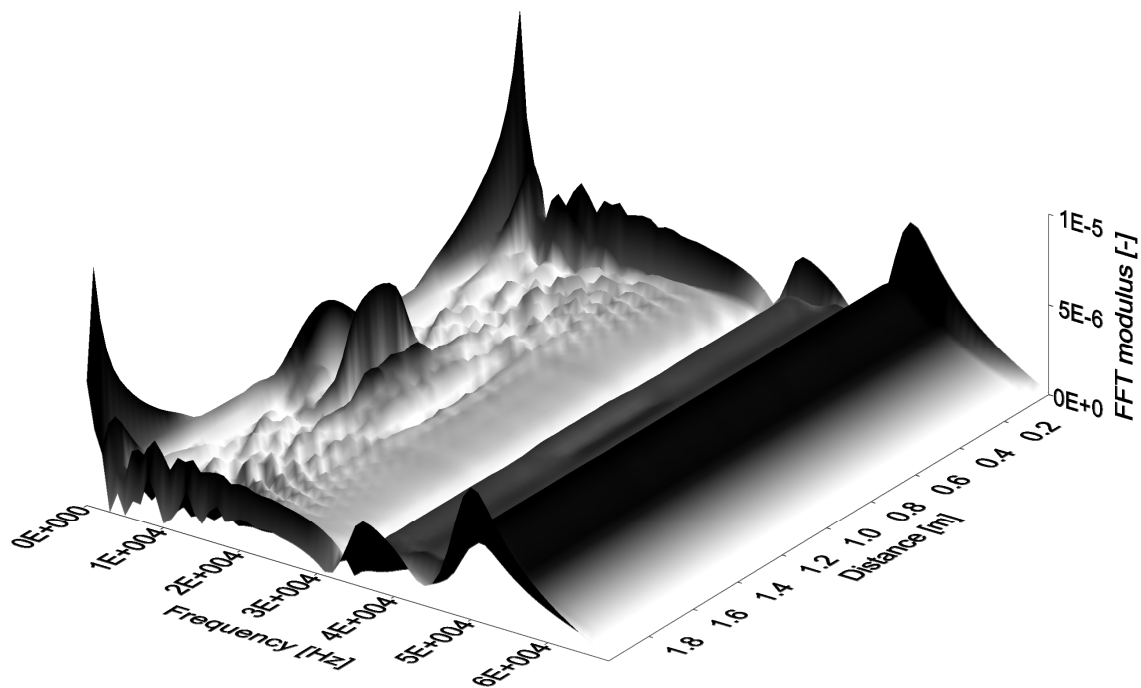


**Obr. 9.** B-scan linie procházající nad podélně umístěnou dutinou - zobrazení reliéf.



**Obr.10.** B-scan linie procházající nad podélně umístěnou dutinou - zobrazení povrchové mapy.

Na posledním obrázku 11 je Impact-Echogram pro tentýž vzorek s podélně položenou dutinou ve frekvenční oblasti. Je uvedeno už jen jedno zobrazení - jako povrchová mapa. Nad místem dutiny vidíme výrazný vrchol o frekvenci 9,76 kHz, která vypovídá o hloubce hledané vady.



**Obr.11.** Frekvenční B-scan linie procházající nad podélně umístěnou dutinou zobrazený jako povrchová mapa.



## 5. Závěr a další postup

V této části práce jsme prováděli numerické simulace diagnostické metody Impact-Echo pro detekci a lokalizaci objemné prismatické dutiny ve třech různých polohách vzhledem k povrchu. Tak jako v předcházejících etapách byla počítána odezva v časové oblasti a navíc zde byl ověřen i postup detekce ve frekvenční oblasti. Hlavním závěrem je, že pro vady, které mají alespoň část svého povrchu rovnoběžnou s měřicím povrchem, jsou oba přístupy úspěšně použitelné. Pro Impact-Echo ve frekvenční oblasti jsou potřeba delší časové záznamy, ale oproti tomu by mohly být zaznamenávány s menší vzorkovací frekvencí.

Výpočty přechodových jevů MKP vyžadují relativně velmi jemnou diskretizaci modelu, což vede k vysokým požadavkům na počítačový výkon. Celkem se řešilo 3 x 67 zatěžovacích stavů. Jeden výpočet na 3 GHz 32-bitovém počítači Intel Pentium IV, 2 GB RAM trvá cca 25 hodin. Proto byla většina výpočtů prováděna paralelně, na clusterech superpočítačové sítě METACentra. Optimální se ukázal výpočet na 8-mi procesorech. Na strojích Pentium 4 Xeon, 3 GHz, 2 GB RAM, spojených sítí GigaEthernet trvá výpočet jedné úlohy cca 30 minut.

Práce na projektu diagnostiky vad betonových konstrukcí dále pokračují simulací detekce trhlin, které vznikly expanzí korozních produktů, s respektováním přítomnosti jednotlivých ocelových výztuží. Korozní produkty mají cca 7 x větší objem než původní ocel. Tato problematika řešena v několika příspěvcích na workshopu CSNI, Pečínka et al. (2004).

Byla už zahájena první experimentální měření na pokusných blocích odlitých v měřítku 1:1 v ÚJV v Řeži. Nyní se řeší mj. problematika vhodného buzení (vhodná intenzita podle citlivosti snímače a rušení, vhodný vybuzený frekvenční rozsah). Například dánská firma Germann Instruments nebo americká Impact-Echo Instruments používají ve svých systémech sadu tvrzených ocelových kuliček o velikosti zhruba 5 až 15 mm, které jsou uchycené na pružinkách, tzv. „spider“. Dánská společnost, Dantec Dynamics, budí pro svá optická měření odezvy na Impact-Echo miniaturním kladívkem. Uvažujeme také o buzení tenkým dlouhým razníkem - tak bychom budili skokem, místo impulsem. Pro automatizovaná měření používají kolegové v BAM Berlin (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) razníček ovládaný servomotorkem. Pravděpodobně se pokusíme zkonstruovat buzení jakýmsi „obráceným snímačem“, piezoelektricky. To by vyřešilo i problém referenčního času (okamžik úderu), který je pro měření v časové oblasti potřeba znát., viz Yiching et al. (2004).

Samostatným problémem je volba a konstrukce vhodného snímače. Pro aplikaci metody Impact-Echo v časové oblasti musíme měřit časový průběh posuvů (nebo zrychlení) v okolí příchodů prvních vlnových čel. Na to by byl vhodný „nerezonanční snímač“, tedy takový, jehož vlastní frekvence je velmi nízká, takže se během měření nerozkmítá. Takový jsme ale na trhu neobjevili. Pokusíme se proto modifikovat velmi citlivý experimentální snímač navržený Proctorem (1982 a další), který byl pro účely metody akustické emise testován v ČR v 80. a 90. letech, Koberna (1993) a byl úspěšně používán pro laboratorní měření na ocelových vzorcích, např. Hora et al. (1994), Morávka (2000, 2001).

## 6. Poděkování

Práci podpořil grant GAČR *Metodika zkoušení masivních železobetonových konstrukcí* č. 103/06/0891, projekt MPO ČR v rámci projektu programu výzkumu a vývoje „Impuls“, evid.č. FI-IM/130, etapa 2.3 - „Inspekce a kontroly stavebních konstrukcí“ a MŠM ČR přístupem k clusterům projektu METACentra, který řeší sdružení CESNET v rámci výzk. záměru MSM6383917201 „Optická síť národního výzkumu a její nové aplikace“.

Doufáme, že budeme moci i další výsledky podobným způsobem publikovat.

## 6. Literatura

- ASTM standard C1383-98a*, 1998. Standard Test Method for Measuring the P-wave speed and the thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, American Society for Testing and Materials Committee of Standards, PA USA.
- kopie části technické zprávy o betonáži*, kapitola IX. Výroba čerstvé betonové směsi, A – Složení směsi, tab.str.18.
- Anish Kumar et al., 2002. Structural integrity assessment of the containment structure of a pressurised heavy water nuclear reactor using impact echo technique. *NDT&E International* 35, p. 213-220, Elsevier Science, Ltd.
- Brepta R., 1982. Modifikace metody konečných prvků pro nestacionární problémy dynamiky. *Studie ČSAV č.13*, Academia Praha.
- Hora P., Pátek J., 1994. Měření na tlusté desce. *Seminář s mezinárodní účastí Výpočtová mechanika 94*, Západočeská univerzita Plzeň, Pernink, str.81-88.
- Koberna M., 1993. Broadband acoustic emission sensor with a conical active element in practice. *Journal of Acoustic Emission*, 11, pp. 61-63.
- Morávka Š., 1998. Testování možností modelování nestacionárního šíření napěťových vln metodou konečných prvků. *Národní konference Inženýrská mechanika '98*, str.489-494, Svatka.
- Morávka Š., 1998. Porovnání analytického řešení nestacionární rázové napjatosti kontinua s výpočtem pomocí MKP., *Strojnícky čas.*49, č.6, str.406-425, Bratislava.
- Morávka Š., 1999. Společné posouzení vedlejších účinků časové a prostorové diskretizace při nestacionárním zatížení. *Národní konference Inženýrská mechanika '99*, str. 391-396, Svatka.
- Morávka Š., 2000. The Elastic Wave Propagation over the Shape Transitions of Bodies. *International Conference Engineering Mechanics 2000*, Svatka, pp. 133-138, Czech Republic.
- Morávka Š., 2001. Porovnání numerického modelu šíření elastických vln v tělesech s výsledky měření piezoelektrickým snímačem. Vliv přítomnosti snímače na měření. *38<sup>th</sup> International Conference EAN 2000*, pp. 231-236, Tábor.
- Morávka Š., Voldřich J., 2003. Příspěvek numerické simulace k detekci armování a trhlin v železobetonu. *19. konference s mezinárodní účastí Výpočtová mechanika 2003*, Nečtiny.
- Morávka Š., Voldřich J., 2004. Application the "Impact-Echo" Method to the Concrete Structure Diagnostic in NPP. *National Conference With International Participation Engineering Mechanics 2004*, Svatka, Czech Republic.
- Morávka Š., Voldřich J., 2004. Numerické modelování diagnostiky různě hlubokých trhlin a plochých dutin betonových konstrukcí J.E. metodou „Impact-echo“. *Computational Mechanics 2004, 20<sup>th</sup> conference with international participation*, Nečtiny, Czech Republic.
- Morávka Š., 2005. Numerická simulace diagnostiky ukloněných povrchových trhlin tlustostěnných betonových konstrukcí JE metodou „Impact-Echo“. *Computational Mechanics 2005, 21<sup>th</sup> conference with international participation*, Nečtiny, Czech Republic.

- Morávka Š., 2006. Oblique Inclined Surface Voids Of Thick-Walled Concrete Structures of Nuclear Power Plants - Numerical Simulation Of Impact-Echo Diagnostic Method. *National Conference With International Participation Engineering Mechanics 2006*, Svratka, Czech Republic, May 2006, ISBN 80-86246-27-2.
- Morávka Š., 2006. Numerická simulace detekce objemných dutin tlustostěnných betonových konstrukcí jaderných elektráren metodou Impact-Echo. *Computational Mechanics 2006, 22<sup>nd</sup> conference with international participation*, Nečtiny, Czech Republic.
- Okrouhlík M., Brepta R., 1976. Side Effect of Finite Element Method Applied on Stress Wave Propagation in a Thin Elastic Bar, *Acta Technica ČSAV*, No.4, Praha.
- Proctor, Jr. Thomas M., 1982. An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer. *Journal Acoust. Soc. Am.*, vol. 71, No. 5, pp. 1163-1168.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J., 2004. Mathematical Model of the Propagation of P, S and R-Waves in a Concrete Thick Walls with Rebars and Cracks. *CSNI/RILEM Workshop on Use and Performance of Concrete in NPP Fuel Cycle Facilities*, Madrid, Spain.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J., 2005. Lessons Learned From Mathematical Modeling of Detection of Deep Surface Cracks and Internal Voids of Thick Walled Concrete Structures Using Impact-Echo Method. Safety Assurance of Nuclear Power Plants with WWER, *The 4th International Conference*, Podolsk, Moscow Region, Russia.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J., 2005. Numerical Simulation of the NPP's Steel-Concrete Structures Diagnostic by the Impact-Echo Method., *18<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)* Beijing, China.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J., 2005. In-service Inspection of Thick Walled Concrete Structures. *31. MPA-seminar and symposium "Materials & Components Behaviour in Energy & Plant Technology"*, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Germany.
- Pečínka L., Morávka Š., 2006: In-service Inspections of Thick-Walled Concrete Structures. *Problemy pročnosti*, No. 4/2006, July 2006, pp. 64-78, Nacionalnaja Akademia Nauk Ukrainy, Institut Problem Pročnosti NAN imeni G.S.Pisarenka, Kiev, Ukrajina. Translation ed.: *Strength of Materials*, Springer New York, Vol. 38, Number 4.
- Schubert F., 2003. Geometrical Effects on Impact-Echo Testing on Finite Concrete Specimens. *Symposium NCT-CE Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003*, Berlin, Germany.
- Schubert F., 2004. On the accuracy of thickness measurements in impact-echo testing of finite concrete specimens - numerical and experimental results. *Ultrasonics* 42, p. 897-901, Elsevier B.V.
- Yiching L. et al., 2004. A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete. *NDT&E International* 37, p. 1-8, Elsevier Science, Ltd.