Czech Society for Nondestructive Testing
NDE for Safety / DEFEKTOSKOPIE 2011
November 9 - 11, 2011 - Harmony Club Hotel, Ostrava - Czech Republic

DIFERENČNÍ SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA IMPACT-ECHO SIGNÁLU
DIFFERENTIAL SPECTRAL ANALYSIS OF THE IMPACT-ECHO SIGNAL

Josef BAJER, Karel HÁJEK
University of Defence Brno, Dpt. of Electrical Engineering
Contact e-mail: josef.bajer@unob.cz

Abstrakt
Nedestruktivní testování sluchovou analýzou signálu odezvy testovaného tělesa na vybuzení úderem patří k nejstarším defektoskopickým metodám. Moderní technika umožňuje zvyšovat citlivost a objektivizovat tuto metodu NDT. Současná forma této metody, prostá spektrální analýza celého záznamu I-E signálu nevyužívá všechny informace v něm obsažené a zbytečně tak omezuje svou citlivost. Proto jsou realizovány různé detailní analýzy I-E signálu. Článek ukazuje přehled dosavadních přístupů a možnosti jejich zlepšování, které spočívají především ve vyhodnocování relativních časových změn spektra v průběhu odezvy.

Klíčová slova: *Impact echo, analýza signálu, nelineární spektroskopie*

Abstract
NDT by aural analysis of impact response is part of the oldest NDT methods. The modern technologies enable to improve a sensitivity and objectivity of this method. Simply spectral analysis as the present form of this method didn't derive benefit from all information of the recorded signal and it limits the sensitivity. Therefore there are realized various detailed analysis of I-E signal. This paper shows a summary of this accesses and possibilities of their improving. They consist first of all in evaluation of relative time changes of frequency spectrum in the time of response.

Key words*: Impact echo, signal analysis, nonlinear spectroscopy*

1. Úvod

Zvyšující rozvoj technologií a zvyšující se tlak na kontrolu spolehlivosti a bezpečnosti provozu i menších a levnějších zařízení. Proto je snaha rozvíjet i defektoskopické metody s levnějším integrálním (jednorázovým) testováním bez lokalizace místa poruchy s výsledkem třídění dobrý-špatný. Proto se pro některé typy testovaných těles s výraznějšími rezonančními vlastnostmi (kovy, keramika atp.) začala rozvíjet staronová metoda spektrální analýzy impact-echo (I-E) signálu.

V principu tato metoda patří historicky mezi nejstarší metody NDT, kdy „spektrální analýzu“ prováděnu sluchem používali hrnčíři, zvonaři a mnoho dalších profesí. Je ale skutečností, že takovéto testování je do určité míry subjektivní a málo citlivé na malé defekty. Proto se s rozvojem technologií a především počítačů přešlo na diskrétní fourierovskou spektrální analýzu (rychlá Fourierova transformace - FFT),

která odstranila subjektivitu a zvýšila kmitočtovou rozlišitelnost a tím i teoretickou citlivost. Praktická citlivost se pak dále zvyšuje vytvořením co nestabilnějšího způsobu testování (stabilita buzení úderem, stabilita umístění testovaného tělesa) a nasnímáním co nevětšího počtu referenčních signálů z nepoškozených těles. Důležité je pak následně vytvořit správná testovací kritéria na povolené odchylky vypočítaného kmitočtového spektra. Je zřejmé, že nastavení testovací aparatury je trochu pracné a vyžaduje určité znalosti a zkušenosti. Z toho vyplývá, že se takovéto testování vyplatí pro sériovou výrobu s velkou produkcí. V tom případě se tato metoda stává provozně velmi levnou, protože vlastní provozní náklady jsou minimální, zařízení pracuje naprosto automaticky a s velkou rychlostí cca 1 test/sec.

Na druhou stranu má tato metoda některé nedostatky. Jednak je její citlivost na malé defekty také omezená a dále neumí rozeznat např. rozdíly spektra způsobené povolenými tolerancemi rozměrů a defekty. Hlavní důvod vyplývá ze samotného principu FFT spektrální analýzy. Ten spočívá v počítání průměrného spektra z celé doby záznamu I-E signálu. Nedokáže tak zjistit informace vyplývající z časově a intenzitně proměnného působení tohoto signálu na testované těleso. Určitou nevýhodou je v případě širokospektrálního vyhodnocování i lineární osa FFT s malým relativním rozlišením pro nízké kmitočty a vysokým rozlišením pro vysoké kmitočty. Zde je kupodivu na tom lépe „spektrální analýza“ prováděná lidským sluchem. To totiž neprovádí klasickou fourierovskou analýzu ale frekvenčně-časovou analýzy v logaritmické ose kmitočtu. Navíc je „zpracování v mozku zvýšeně citlivé na intermodulační složky (zní disharmonicky) oproti vyšším harmonickým složkám (zní harmonicky). Proto dokáže rozlišit špatný vzorek i bez „vytvoření přesného modelu“ poslechem mnoha dobrých vzorků.

Dosavadní přístupy k podrobnější analýze I-E signálu pro defektoskopii [5], [6], [7] vycházejí z různých předpokládaných aspektů projevů defektů v I-E signálu i z různých technik analýzy těchto signálů. Dostupné testované vzorky ovšem obvykle měly poměrně malé defekty, obtížně zjistitelné i náročnějšími NDT metodami. Je bohužel velmi obtížné získat vzorky vhodných těles s rezonačními projevy, které by měly větší a odstupňované defekty typu prasklina. Proto dosud publikované přístupy k analýze I-E signálů neprokázaly na těchto vzorcích jednoznačné výsledky a nebyly stanovené jednoznačné postupy pro takovouto analýzu.

2. Teoretická východiska pro analýzu I-E signálů a dosud publikované metody

Základní časový průběh I-E signálu s typickým exponenciálním tlumením jeho amplitudy je velmi dobře znám a publikován v mnoha pramenech. Detekce poruch a defektů testovaných těles se provádí vesměs ve spektrální oblasti a je sledováno více vlastností snímaných I-E signálů založených na různých fyzikálních projevech.

Nejjednodušší je klasická spektrální analýza celého I-E signálu testovaného tělesa. Získané spektrum můžeme porovnávat se standardním spektrem získaným testem sady dobrých vzorků, jak to bylo popsáno v úvodu. Tento postup je poměrně spolehlivý pro větší rozměrové, tvarové a materiálové odlišnosti a pro relativně velké defekty typu prasklina. Ale jak již bylo uvedeno v úvodu, nelze dosáhnout vyšších citlivostí a z důvodu průměrování celé odezvy se evidentně ztrácí množství časově proměnných informací v signálu, které vypovídají o různých vlastnostech tělesa.

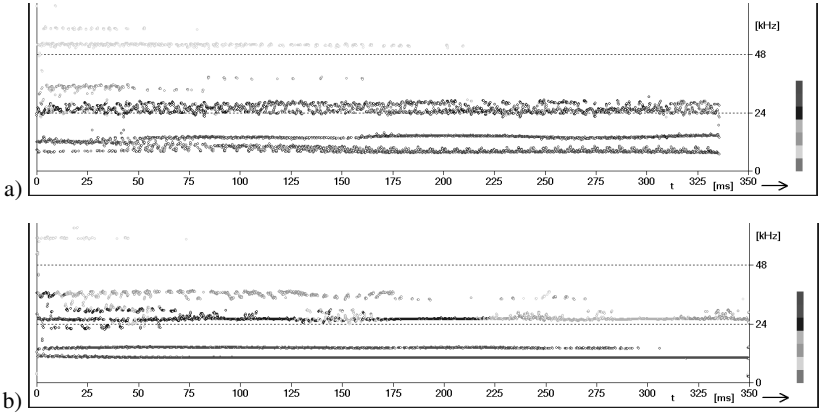
Proto byl v článcích [5], [6] publikován nový princip NDT, který vychází z nelineárních projevů defektů typu prasklina na šíření elastických kmitů v materiálech. Východiskem k tomu byl poznatek o vlivu praskliny na posuv

rezonančního maxima při harmonickém buzení tělesa [2], [4]. Lze předpokládat, že tento efekt se alespoň částečně projeví i při buzení širokopásmovým úderovým signálem. Další úvahy o nelineárním projevu těchto defektů vychází z obecné teorie současného působení více různých harmonických signálů, kdy pro dva budící signály získáme výsledné spektrum se složkami podle vztahu

$$f_V = \left| \pm\ nf_1 \pm\ nf_2 \right|_{m,n=0,1,2...\infty}\ , \qquad (1)$$

takže těleso s defektem bude v I-E signálu obsahovat nové kmitočtové složky, a to jednak tzv. vyšší harmonické od budících signálů (různé rezonance vybuzené úderem) a dále tzv. součtové a rozdílové (intermodulační) složky. Další zásadní myšlenkou článku [5] byla ta skutečnost, že nelineární efekty se projevují s vyššími mocninami amplitudy budících signálů, a tudíž že tyto efekty budou výrazně závislé na amplitudě a tudíž také na čase proměnného I-E signálu. Z toho vyplynula potřeba realizovat časově-frekvenční analýzu známou např. jako spektrogramy, založené na použití krátkodobé FFT (tzv. STFT).

Pro tuto analýzu se ale nepříznivě projevuje princip neurčitosti, kdy při zvyšování časové rozlišitelnosti (zkracování analyzovaného úseku) klesá adekvátně kmitočtová rozlišitelnost. Proto byly hledány jak optimální kompromisy z hlediska volby délky analyzovaného úseku, tak i další výpočetní postupy, minimalizující tyto negativní efekty, jako umělé prodlužování testovaného úseku, použití „klouzavých“ spekter apod. Cílem pak bylo nalézt ve spektrogramech zmíněné nelineární efekty (frekvenční posuv a vznik nových složek) závislé na amplitudě a tudíž i čase I-E signálu. Po prvních jednodušších pokusech a metodách byl vytvořený speciální programem, který detekoval a zakreslovat polohu maxim [6]. Tak jsme získali výsledky pro dobrý a špatný vzorek, kde u špatného vzorku se projevovala zjevná kmitočtová nestabilita některých kmitočtových složek, viz obr. 1.



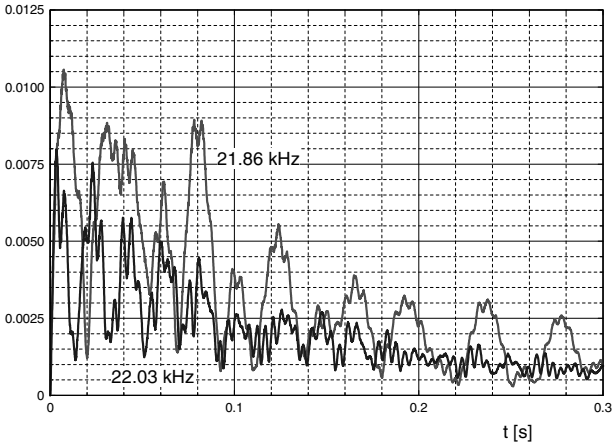
Obr.1 Maxima spektrogramu: a) špatný vzorek, b) dobrý vzorek

Fig.1 Tops of spectrogram: a) damaged sample, b) good sample.

Nicméně výsledky do značné míry záležely na nastavení mnoha parametrů použité spektrální analýzy (klouzavé spektrum) a byl použit poměrně malý analyzovaný úsek s malou kmitočtovou rozlišitelností, takže často bylo výsledné maximum dáno součtem více blízkých proměnných složek a výsledky nebyly zcela spolehlivé.

Jako kontrolní metodu jsme se pokoušeli využít sluchovou analýzu, kdy jsme transponovali široké kmitočtové spektrum (v závislosti na typu vzorku 30-150 kHz) do akustického pásma.

Protože slabinou uvedené metody se jevila malá kmitočtová rozlišitelnost, snažili jsme se ji doplnit úzkopásmovou filtrací „podezřelých“ kmitočtových složek se získáním jejich časových závislostí, viz obr. 2. Ani tato cesta nevedla k získání spolehlivých výsledků a byla dosti pracná.



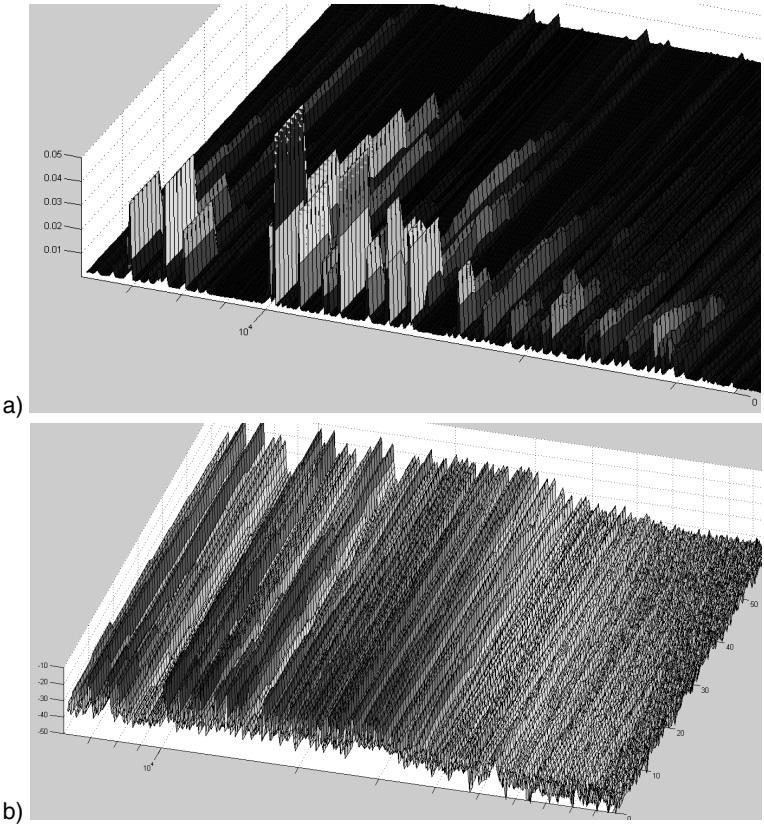
Obr. 2 Časové průběhy amplitudy dvou vybraných rezonančních složek
Fig. 2 Time dependencies of magnitude of two resonant frequency components .

Pro zvýšení časově-frekvenční rozlišitelnosti relativně širokopásmových signálů a přehlednější zobrazení spektrogramů byla vytvořena metoda kvazi-logaritmické FFT s proměnnou délkou úseků pro různá kmitočtová pásma[7]. Touto cestou byly získány jiné pohledy na časově-spektrální znázornění I-E signálů, viz obr. 3, kde jsou tyto spektrogramy zobrazeny jak v lineární, tak i v logaritmické ose. Opět se ukázala malá spolehlivost v rozlišení dobrých a špatných vzorků, protože i u dobrých vzorků se projevovala určitá nestabilita jednotlivých složek spektra.

2. Diferenční analýza I-E signálů ve frekvenční oblasti

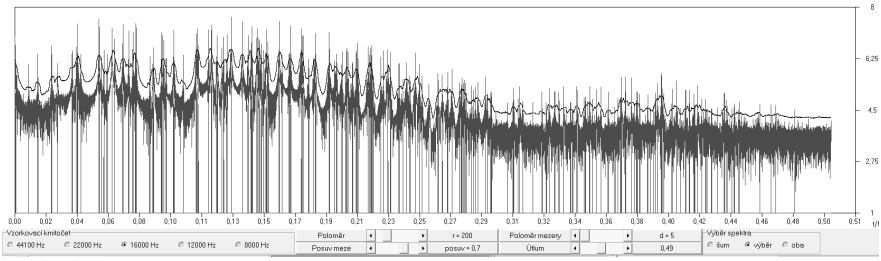
Z dosavadních výsledků bylo zjevné, že projevy způsobené nelineárními projevy relativně malých defektů byly obtížně rozlišitelné v množství dominantních a při tom časově částečně nestabilních kmitočtových složek. Proto jsme se pokusili jít cestou zvýraznění nestabilit odečtením základních dominantních složek signálu a také bazálního šumu. K tomu byl vytvořen program pro realizaci odečtení těchto složek s nastavitelnou mezí úrovně pro jejich odlišení. Jak je zřejmé z obr. 4, z vypočteného spektra celé odezvy byla vypočítána relativní úroveň spektra, která byla použita jako posouvaná mez pro rozdělení spektrálních složek. Z takto separovaných složek byly zpátky poskládány a zaznamenány časové signály.

Separované signály jsme opět podrobili časově-spektrální analýze. Jak je zjevné z obr. 5, lze pozorovat u vzorku s defekty ve spektrogramu s podstatně menší dynamikou mírně vystupující „podezřelé“ nestabilní složky, nicméně ani toto zvýraznění neposkytlo jednoznačné a spolehlivé výsledky.



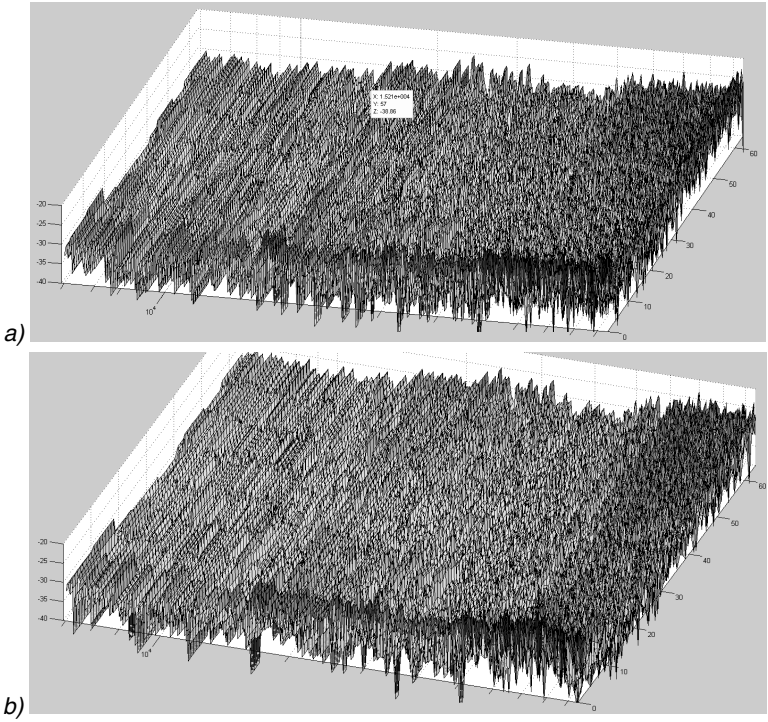
Obr. 3 Spektrogramy I-E signálu s kvazi-logaritmickou kmitočtovou osou : a) lineární osa amplitudy, b) logaritmická osa amplitudy

Fig. 3 Spectrograms of I-E signal with quasi-logarithmic frequency axis: a) linear axis of magnitude, b) logarithmic axis of magnitude.



Obr. 4 Spektrum celého I-E signálu se zobrazením separační meze

Fig. 5 Spectrum of whole I-E signal with limit of separation



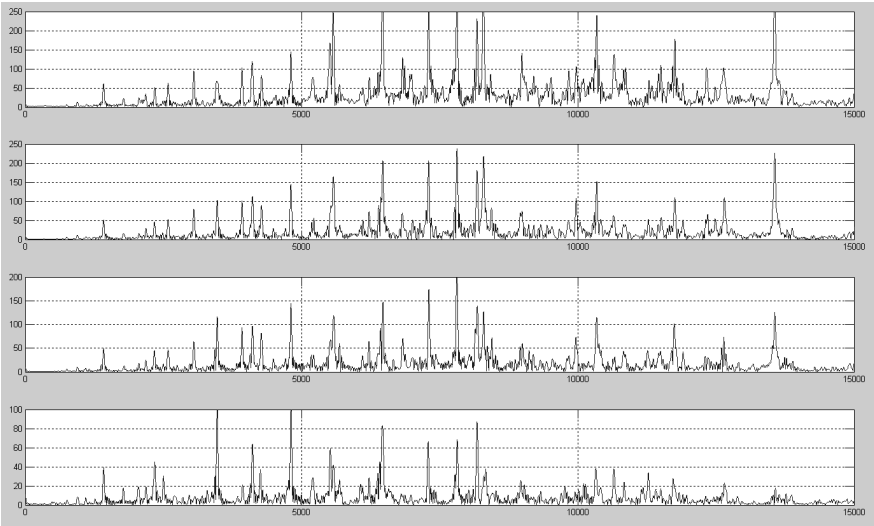
Obr. 5 Spektrogramy diferenčního I-E signálu s kvazi-logaritmickou kmitočtovou osou a) poškozený vzorek, b) dobrý vzorek

Fig. 5 Spectrograms of differential I-E signal with quasi-logarithmic frequency axis: a) sample with crack, b) good sample

3. Diferenční analýza I-E signálů v časové oblasti

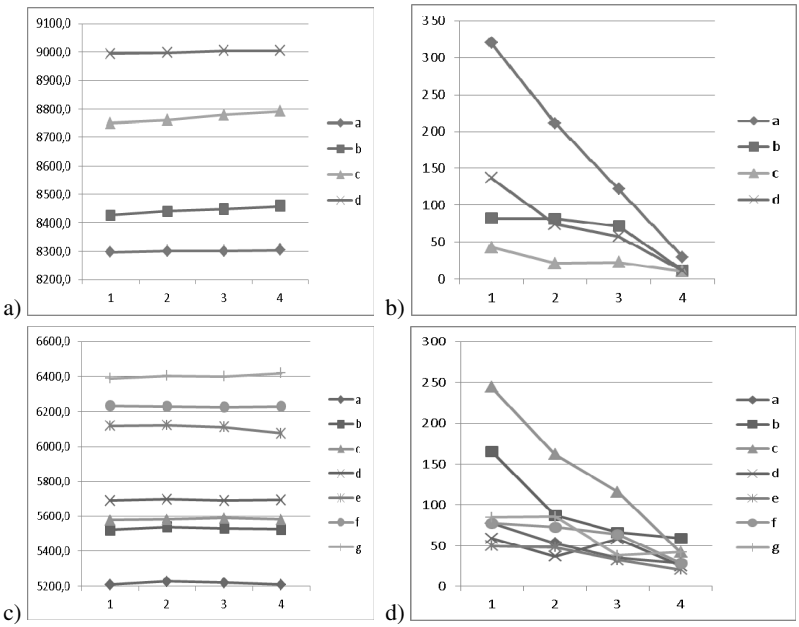
V dalším postupu jsme se vydali cestou důsledného a přesného porovnávání spekter z delších časových úseků s vysokým rozlišením. Vybrali jsme 4 úseky o délce 20% celého záznamu, a to z jeho první poloviny a první tři úseky z první čtvrtiny, kdy se projevují nevětší změny amplitudy (0-0,2; 0,05-0,25; 0,1-0,3; 0,3-0,5). Volba délky byla stanovena experimentálně tak, aby bylo dosaženo dostatečného rozlišení, přičemž jsme dále využili desetinásobného umělého prodloužení intervalu nulami pro zjemnění kroku výpočtu spektra. Na takto vytvořené čtyři soubory dat jsme použili klasickou FFT. Získané spektrum je poměrně složité, má mnoho harmonických složek, které se s časem mění. Graficky je znázorněno na obr. 6. Pro vyhodnocení kmitočtů maxim jsme vytvořili program, protože záznam spektra má cca 100 tis. bodů.

V souboru s hodnotami maxim a jejich kmitočtů jsme pak vyhodnocovali jak změny kmitočtu, tak i vznik případných intermodulačních složek. Zjištěná maxima jednotlivých složek mají různé časové závislosti. Část složek si zachovává kmitočet s vysoko stabilitou (vyhodnotitelné asi v mezi 10^{-5}). Část složek má počáteční pokles kmitočtu – asi 2 10^{-3} (obr. 7 a), ale další složky mají i opačný či střídavý trend změny



Obr. 6 Spektra úseků 1-4 poškozeného vzorku

Fig. 6 Spectrum of stages 1-4 of damaged sample



Obr. 7 a,c) závislosti kmitočtů dominantních složek, b,d) závislosti jejich amplitud na pořadí úseků

Fig. 7 a,c) frequency dependencies of dominant components, b,d) dependencies of their magnitudes as function of stage order

kmitočtu, viz obr. 7 c). Ani pokles amplitudy těchto složek není zcela pravidelný, jak to ukazuje obr. 7 b,d), existují i složky, které po poklesu mají i následný vzestup apod.

5. Závěr

Příspěvek ukazuje přehled různých přístupů k časově spektrální analýze I-E signálu se snahou o získání informace o relativně malých poškozeních typu prasklina. Vzhledem k malým defektům dostupných vzorků, se v předchozích přístupech nedařilo získat jednoznačné informace ať už přímým sledováním časových závislostí dominantních maxim spektrogramů, tak ani selektivnějším typem kvazi-logaritmických spektrogramů.

Proto bylo snahou zvýraznit relativně malé změny spektra diferenčním přístupem jak v kmitočtové, tak i v časové oblasti. Bohužel, ani toto zvýšení rozlišení změn v získaných spektrálních závislostech nepřineslo jednoznačné postupy pro detekci nelineárních efektů způsobených malými defekty typu prasklina. Nicméně, ukázalo se, že časově spektrální závislosti jsou značně proměnné i u dobrých vzorků a lze usuzovat, že se zde projevují další materiálové a mechanické vlastnosti testovaných těles.

Proto je potřebná další analýza podmíněná získáním vzorků s odstupňováním dostatečně velkých defektů, což umožní spolehlivější rozlišení důvodů časově-spektrálních změn v naměřených signálech a případná analýza dalších vlastností testovaných vzorků.

Tato práce byla podpořena prostředky grantové agentury ČR pro grant 102/09/H074.

Literatura

[1] Jaeger, B.J., Sansalone, M.J., and Poston, R.W. "Using Impact-Echo to Assess Tendon Ducts," *Concrete International*, Vol. 19, No.2, February 1997, pp. 42-46.

[2] Van Den Abeele K. A., Carmeliet, J., TenCate, J. A. Johnson P. A. “Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage. Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy”. *Res. Nondestr. Eval*. 12/1, 31-42, 2000.

[3] Johnson, P. A., TenCate, J. A., Guyer R. A. Van Den Abeele K. A. “Resonant nonlinear ultrasound spectroscopy”. US Patent 6330827

[4] Muller, M., Sutin, A., Guyer, R., Talmant, M., Laugier, P. Johnson P. A. “Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone.” *J. Acoust. Soc. Am*. 118 (6), December 2005.

[5] Hajek K, Sikula, J. A Resonance Frequency Shift in Spectral Analysis of the Impact Echo. Proceedings of the International Symposium 18th ISNA 2008, Stockholm. S. 525-528. ISBN: 978-0-7354-0544-8 (ISSN 0094-243X).

[6] Hájek K. Šikula, J. Analysis of Impact-Echo Signal of Nonlinear Damaged Elements in Frequency-Time Domain. Proceedings of the International Workshop NDT in Progress. Praha, 2009, pp., 93 – 100, ISBN 978-80-214-3968-9

[7] Hájek, K. Quasi-Logarithmic FFT and their Use for an Analysis of the Impact-Echo Signals. In Proc. of 8th Workshop NDT 2010 Brno, 2010.

[8] Hájek K. Šikula, J. Bajer, J. Detailed Analysis of Impact-Echo Signals of Specimens with Nonlinear Effects. ECCTD 2010, Moskva