

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 720*

*ISSN 1213-418X*

**Monika Manychová**

**NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÁ  
SPEKTROSKOPIE  
STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

Ing. Monika Manychová, Ph.D.

# NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÁ SPEKTROSKOPIE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

MONITORING OF BUILDING STRUCTURES BY NONLINEAR  
ULTRASONIC SPECTROSCOPY

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
V OBORU POZEMNÍ STAVBY



BRNO 2022

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

stavební konstrukce, nedestruktivní zkoušení, integrita struktury, trhliny, nelineární efekty, keramické prvky, betonové trámce, kamenné bloky, železobetonové trámce, předpínací ocelová lana

## **KEYWORDS**

building structure, non-destructive testing, structure integrity, cracks, nonlinear effects, ceramic elements, stone blocks, concrete beams, reinforced concrete beams, steel prestressing strands

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

# OBSAH

CURRICULUM VITAE .....	4
1 ÚVOD .....	6
2 NELINEÁRNÍ MATERIÁLOVÉ MODEL Y .....	6
2.1 KLASICKÁ NELINEÁRNÍ ELASTICITA .....	7
2.2 NEKLASICKÁ NELINEÁRNÍ ELASTICITA .....	8
3 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN .....	10
3.1 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPICKÉ METODY .....	10
3.2 VÝHODY A OMEZENÍ METOD VE STAVEBNICTVÍ .....	14
4 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ NELINEÁRNÍ ULTRA ZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE .....	14
5 APLIKACE METOD NELINEÁRNÍ ULTRA ZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE .....	15
5.1 OBKLADOVÉ PRVKY Z DRUHOTNÝCH SUROVIN .....	16
5.2 STROPNÍ DESKY HURDIS .....	17
5.3 STROPNÍ DESKY UPRAVENÉ JAKO SENDVIČE .....	19
5.4 KAMENNÉ BLOKY .....	20
5.5 VZORKY Z JEMNÉ BETONOVÉ SMĚSI .....	22
5.5.1 První fáze experimentu .....	22
5.5.2 Druhá fáze experimentu .....	24
5.6 ŽELEZOBETONOVÝ NOSNÍK .....	26
5.7 PŘEDPÍNACÍ OCELOVÁ LANA .....	28
5.7.1 Nepředpjaté ocelové lano .....	29
5.7.2 Předpjaté ocelové lano .....	32
6 ZÁVĚR .....	35
7 REFERENCE .....	37
ABSTRAKT .....	40
ABSTRACT .....	40

## CURRICULUM VITAE

**Jméno a příjmení:** Monika Manychová, roz. Kořenská  
**Datum a místo narození:** 29. dubna 1975, Brno  
**Národnost:** česká



**Adresa do zaměstnání:** VUT v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav pozemního stavitelství  
Veveří 331/95  
602 00 Brno  
Česká republika  
e-mail: manychova.m@fce.vutbr.cz

### Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

2005 Ph.D. VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Pozemní stavby  
1998 Ing. VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Ekonomika a řízení stavebnictví  
1993 maturita Gymnázium, Brno, Táborská, zaměření matematika a fyzika

### Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

2005 – dosud: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, odborná asistentka  
2001 – 2005: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, asistentka  
1998 – 2001: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky, prezenční forma doktorského studia

### Odborné a výzkumné zaměření:

Nedestruktivní testování zaměřené na studium a výzkum akustických metod pro diagnostiku stavebních konstrukcí

### Projekty a granty:

TACR Projekt CK01000108 *Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků*, řešitel (2020–2022)  
GA ČR Projekt č. P104/10/1430 *Nelineární ultrazvuková defektoskopie stavebních prvků a konstrukcí*, člen týmu (2010–2012)  
Projekt č. 103/09/1499 *Vícekanálový georadar jako nástroj pro monitorování poruch pozemních komunikací a mostních konstrukcí*, člen týmu (2009–2011)  
Projekt č. 103/06/1711 *Defektoskopie železobetonových dílců a konstrukcí metodami nelineární akustické spektroskopie*, člen týmu (2006–2008)  
Projekt č. 103/06/P401 *Diagnostika stropních konstrukcí z desek Hurdis metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie*, odpovědný řešitel (2006–2008)  
VVZ MSM VVZ MSM 0021630511 *Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí*, člen týmu (2005–2011)  
MD ČR Projekt MDS č. 803/120/108 *Stanovení metodiky monitorování výztuží železobetonových a předpjatých konstrukcí*, člen týmu (2001–2004)

### Publikační činnost:

- 9 článků v databázi Web of Science
- 5 článků v impaktovaných časopisech
- 7 článků ve vědeckých časopisech bez IF

- 13 citací (s vyloučením autocitací) podle Web of Science
- 10 příspěvků ve sbornících světových a evropských kongresů
- 2 abstrakty ve sbornících světového nebo evropského kongresu
- 44 příspěvků ve sborníku mezinárodní nebo národní vědecké konference
- 3 publikace v odborném časopisu
- 20 příspěvků ve sborníku odborné konference
- 3 posudky domácí publikace, projektu
- Členka vědeckého výboru/recenzentka příspěvků ve sbornících 44. – 51. Mezinárodní konference Defektoskopie

### **Pedagogická činnost:**

#### *Bakalářské a magisterské studium*

Vedení cvičení předmětů BHA001, NHB042, BHB005.

Vedení projektů předmětů BH006, BH009, BH053, BH056, NHB043, NHB054, CH006 (prezenční a kombinovaná forma studia)

Konzultantka předmětů TG02, TG10, specializace Tepelná technika, pro Ústav architektury

Členka komise pro státní závěrečné zkoušky: 28×

Vedení obhájených bakalářských prací: 32×

Vedení obhájených diplomových prací: 19×

### **Členství a funkce:**

od 2004      předsedkyně správní rady Nadačního fondu FAST VUT v Brně

od 2015      členka kontrolní komise České společnosti pro nedestruktivní testování, z. s.  
(L 21357/RD19/KSBR)

od 2019      místopředsedkyně ČNDT, z. s., RS07 – Jižní Morava

# 1 ÚVOD

*Nedestruktivní testování* (NDT) je široký obor s mnoha metodami, který dokáže zjistit poruchy dřívě, než mohou způsobit problém. Definice charakterizuje NDT jako použití neinvazivních technik k určení integrity materiálu, komponent nebo celé konstrukce. Cílem a výsledkem NDT je predikce životnosti nebo rizika spojeného s dalším využíváním testovaného objektu. Používáno je téměř ve všech technických oblastech a stále častěji i ve stavebnictví a provozním monitoringu budov. Rozvoj nových technologií a materiálů, vzrůst požadavků na bezpečnost a spolehlivost provozu vyvíjí tlak na zdokonalování stávajících a vývoj nových NDT metod. Široké spektrum uplatnění mají ultrazvukové metody založené na využití lineárního ultrazvuku. V některých případech však tyto konvenční metody naráží na svoje fyzikální možnosti a stávají se nepoužitelnými (např. v případě materiálů složitých těles nebo defektů vzhledem k vlnové délce použitého ultrazvuku nezjistitelné). V posledních deseti až patnácti letech je věnována značná pozornost vývoji nových metod založených na nelineární ultrazvukové spektroskopii (NUS). Nelineární vlnové metody poskytují nové možnosti akustického nedestruktivního testování, nabízejí možnosti použití ultrazvukového testování i do oblastí, které jsou klasickým metodám nedostupné [8]. Stavební materiály jsou klasickým příkladem, kde je použití konvenčních ultrazvukových metod velice komplikované. Proto představují ideální prostředí pro nasazení nelineárních ultrazvukových metod [29].

Jak tato zkrácená verze habilitační práce, tak habilitační práce samotná předkládá výsledky dosažené ve studiu metod nelineární ultrazvukové spektroskopie z hlediska možnosti jejich využití ve stavebnictví. Práce v ní obsažená je výsledkem autorčina systematického studia a vychází z jejího působení na Fakultě stavební VUT v Brně. V práci jsou popsány základní modely, které se uplatňují v metodách nelineárního ultrazvukového testování a zkoumána je použitelnost metod pro monitorování stavebních konstrukcí. Experimentální část se zabývá sestavením měřicího zařízení a výsledky dosaženými při testování stavebních prvků.

Základní výzkum zaměřený na konkrétní úkoly byl řešen v rámci tří projektů poskytnutých Grantovou agenturou ČR s označením: 103/06/P401 „*Diagnostika stropních konstrukcí z desek HURDIS metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie*“ (řešitelka), 103/06/1711 „*Defektoskopie železobetonových dílců a konstrukcí metodami nelineární akustické spektroskopie*“ a P104/10/1430 „*Nelineární ultrazvuková defektoskopie stavebních prvků a konstrukcí*“ (členka řešitelského týmu). Poznatky byly využity k plnění dílčích úkolů výzkumného záměru MŠM 0021630511 „*Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí*“, aktuálně je autorka zapojena do řešení projektu TAČR CK01000108 „*Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků*“, (2020 až 2022). Hlavní řešitel CDV, v.v.i., další řešitelé: ČVUT, VUT a Preditest Ltd. Autorka je řešitelkou (VUT) částí projektu zaměřené na využití nelineární ultrazvukové spektroskopie pro diagnostiku koroze zabudovaných předpjatých lan.

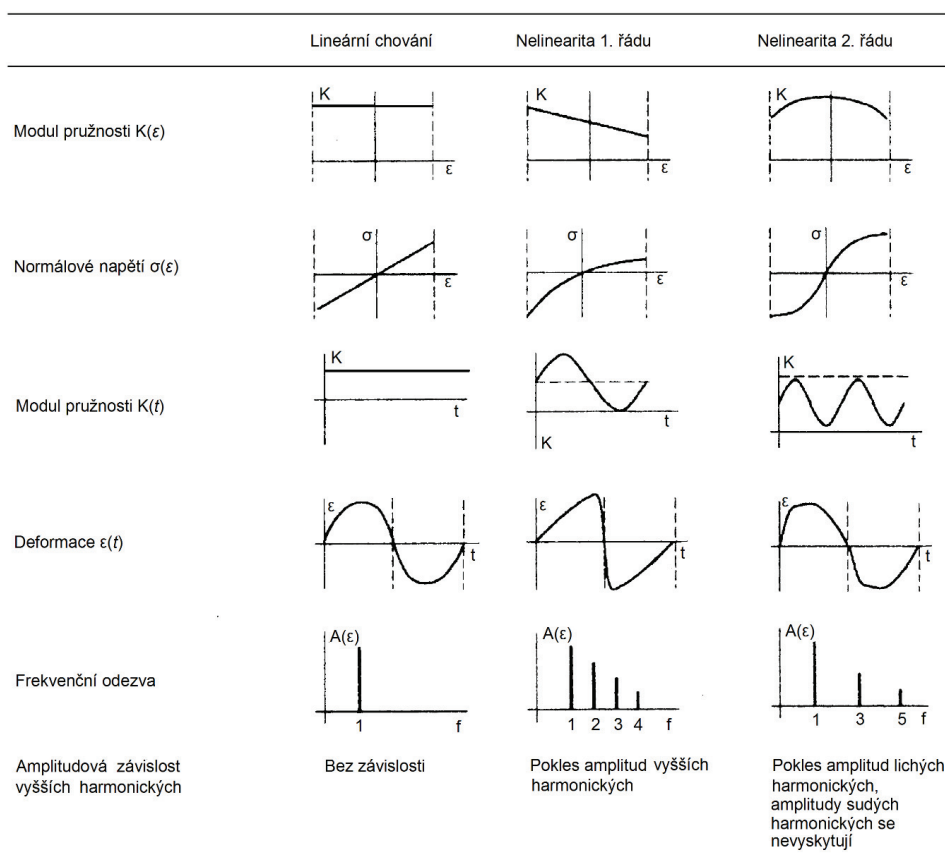
## 2 NELINEÁRNÍ MATERIÁLOVÉ MODEL Y

Modely nám umožňují v některých případech hodnotit nejen nelinearitu tělesa a materiálu jako celku, ale také vztáhnout nelineární chování k míře poškození tělesa. Bylo pozorováno, že tělesa poškozená a tělesa s mikrotrhlinami vykazují větší nelineární elastickou odezvu na statické zatížení a dynamické buzení než nepoškozená tělesa. To nám poskytuje účinný nástroj pro jejich kvalitativní rozlišení typu: poškozený nebo nepoškozený. Velkou pozornost při nelineárním ultrazvukovém testování je třeba věnovat amplitudě buzení, jelikož většina nelineárních efektů se začíná projevat až po aplikaci dostatečně vysokých amplitud buzení.

## 2.1 KLASICKÁ NELINEÁRNÍ ELASTICITA

Klasická nelinearita homogenních materiálů má svůj fyzikální původ na atomární úrovni. Nelinearita vzniká ze slabé anharmonicity meziatomových potenciálů, jak uvádí např. Landau s Lifshitzem [20] a Stobbe [41]. Někteří autoři, jako Johnson a Ostrovsky [6], nazývají tento typ nelineárního chování *atomární elasticitou*. Většina běžně používaných konstrukčních materiálů vykazuje známky atomární elasticity, ale jsou obvykle tak nevýrazné, že je lze jen velmi obtížně měřit. Naproti tomu materiály, které obsahují tzv. „bond“ systémy (trhliny, praskliny, póry) v tvrdé matici, vykazují *konstrukční nelineární elasticitu*. Materiály tohoto typu, což jsou pískovec a beton, se chovají silně nelineárně i při malých výchylkách deformace v porovnání s materiály vykazujícími atomární nelinearitu.

Klasická nelinearita jednoduše vysvětluje generování vyšších harmonických ve spektru (obr. 1; 2. a 3. sloupec). Odezva na monofrekvenční sinusové buzení je vícesložková a obsahuje i násobky budící frekvence  $f_1$  – vyšší harmonické. Nelinearita 2. řádu generuje ve spektru pouze liché harmonické ( $3f, 5f$ ), zatímco nelinearita 1. řádu generuje sudé i liché harmonické ( $2f, 3f$ ).



Obr. 1. Schematické znázornění dvou typů nelinearity a jejich vlivu na modul pružnosti, změnu tvaru sinusové vlny a frekvenční odezvu na monofrekvenční buzení [46]



## 2.2 NEKLASICKÁ NELINEÁRNÍ ELASTICITA

Chování některých materiálů, zejména hornin, betonu a materiálů poškozených, nelze dostatečně přesně popsat pomocí klasické nelineární teorie. Pro tyto materiály je typická neklasická nelineární elasticita. Typickým projevem neklasické nelinearity je rozdílnost chování při střídaném tlakovém a tahovém zatěžování, kdy se projevuje asymetrie deformační křivky. Tento efekt je připisován uzavírání a otevírání systémů nehomogenit (pórů, příměsí) a trhlin.

Nejjednodušším modelem neklasické nelinearity je bimodulární model, který je označován zjednodušeně jako „*crack clapping*“ – *tleskání trhliny* nebo kontaktní akustická nelinearita (CAN). Poskytuje názorný příklad pro porozumění vzniku vyšších harmonických složek ve spektru při interakci elastických vln s trhlinou [39, 40]. Model vychází z předpokladu lineárního tělesa s jednou centrální trhlinou. Při cyklickém namáhání je trhlina opakovaně zavírána a otevírána a pokud je amplituda zatěžování dostatečně vysoká, objeví se asymetrie mezi tlakovou a tahovou částí cyklu. V tahové části cyklu deformaci stěn trhliny nic nebrání, kdežto v tlakové části cyklu se po překročení určitého napětí stěny dotknou a jejich vzájemný pohyb je omezen. Materiál se tak v tlakové části cyklu jeví *tužším*.

Tento efekt pak může být chápán jako změna modulu pružnosti, která se dá popsat Heavisideovou skokovou funkcí  $H(\varepsilon)$ , podle Solodova et al. [40], jako

$$E = E_0 \left[ 1 - H(\varepsilon - \varepsilon_c) \left( \frac{\Delta E}{E_0} \right) \right], \quad (1)$$

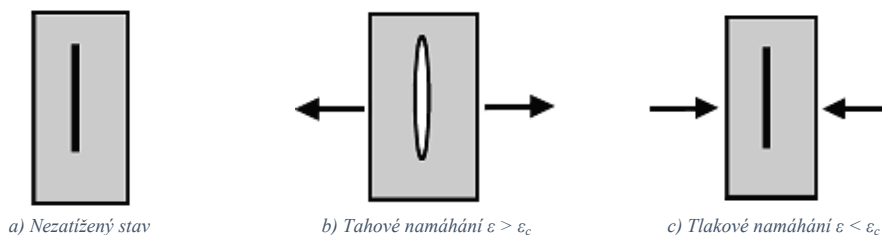
kde  $E_0$  je modul pružnosti,  $\Delta E$  je jeho změna způsobená dotekem stěn trhliny,  $\varepsilon$  je aktuální deformace a  $\varepsilon_c$  je hodnota deformace odpovídající počátečnímu dotyku stěn.

Hodnota  $\varepsilon_c$  je také velice často označována jako CAN práh. Za předpokladu, že trhlina je ve výchozím stavu uzavřená, můžeme předchozí rovnici přepsat do tvaru

$$E = \begin{cases} E^+ & \text{pro } \varepsilon > 0 \\ E^- & \text{pro } \varepsilon < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

kde  $E^+$  znamená modul pružnosti v tahu a  $E^-$  modul pružnosti v tlaku.

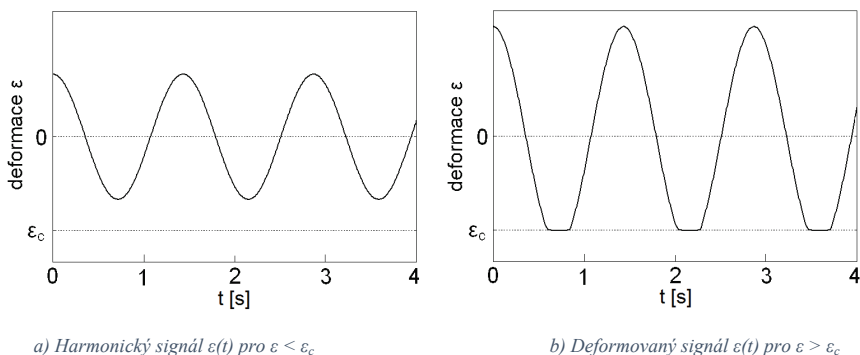
Jedním ze způsobů, jak vyvolat chování odpovídající bimodulárnímu modelu, je průchod ultrazvukového vlnění odpovídající amplitudy tělesem s vhodně orientovanou trhlinou (obr. 2), případně systémem trhlin.



Obr. 2 Schematické zobrazení bimodulárního modelu pro  $\varepsilon_c = 0$

Tento model byl experimentálně ověřen několika autorskými kolektivy např. [2, 19, 38, 48]. Jako první aproximace popisuje tvorbu vyšších harmonických při monofrekvenčním buzení.

Jestliže se původně monofrekvenční sinusové vlnění pohybuje oblastí, která se dá popsat bimodulárním modelem (1), začíná se čelo vlny postupně deformovat. Část signálu, která by amplitudově odpovídala hodnotám vyšším, než je CAN práh, se začíná zarovnávat, rektifikovat vlivem doteku stěn a změny modulu pružnosti (obr. 3).



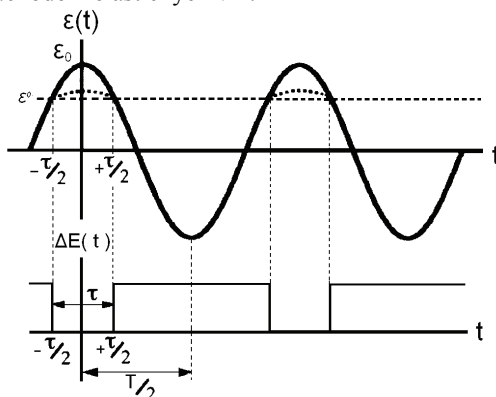
**Obr. 3** Deformace signálu vlivem doteku stěn trhliny

Guyer a Johnson [3] ukázali, že takový typ signálu může být jednoduše analyticky popsán vztahem

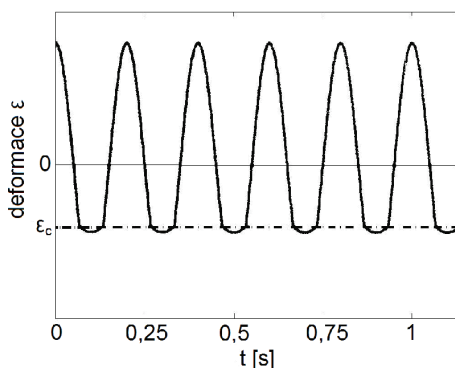
$$\sigma(t) = \Delta E(t)\varepsilon = 2\Delta E\left(\frac{\tau}{T}\right)\left(\varepsilon \cos(2\pi f t) - \varepsilon_c\right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left[\frac{n\tau}{T}\right] \cos(2\pi n f t), \quad (3)$$

kde  $\tau$  je šířka pulsu a  $T$  je perioda.

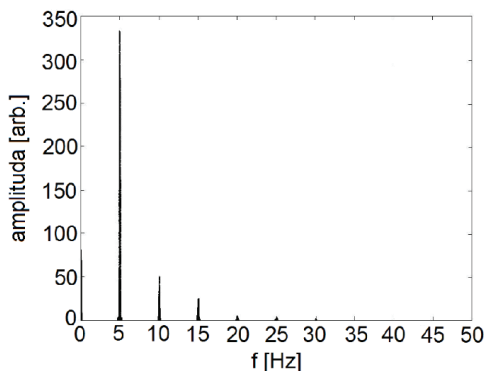
Je patrné, že z hlediska analýzy signálu představuje rovnice (3) pulsní modulaci původně sinusového signálu. Oblasti mezi jednotlivými pulsy představují časové úseky, kdy se stěny nedotýkají a naopak. Grafické zobrazení modulace dle rovnice (3) je uvedeno na obr. 4. Míru deformace původně sinusového signálu určuje změna modulu pružnosti  $\Delta E$  a výška CAN prahu. Tato modulace způsobuje nárůst podílu harmonických ve frekvenčním spektru vypočteném pomocí Fourierovy transformace (obr. 5). Podíl harmonických spektrálních složek a jejich konkrétních amplitud závisí opět na rozdílu modulů pružnosti  $\Delta E$ , výšce CAN prahu a amplitudě deformace způsobené průchodem elastických vln.



**Obr. 4** Pulsní modulace a  $\Delta E$  jako funkce času [3]



a) Deformovaný signál



b) Spektrum signálu – generování harmonických

**Obr. 5** Změna tvaru signálu a spektrum signálu – bimodulární model,  $f = 5$  Hz

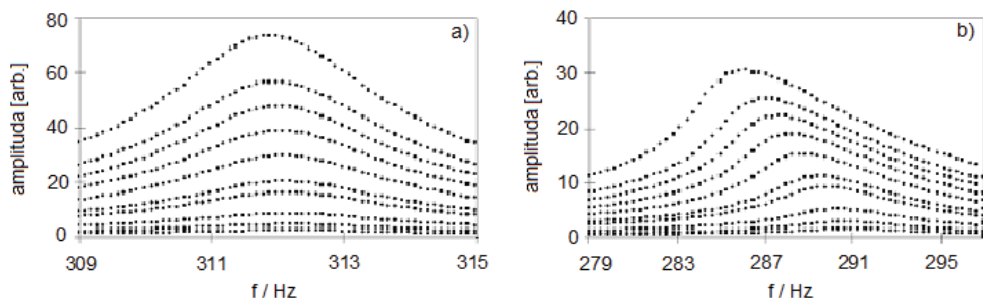
V současné době je snahou mnoha autorů upravit a přizpůsobit bimodulární model pro použití v obecnějších případech interakce ultrazvuku se systémy trhlin a různých rozhraní. Cílem je popsat pomocí upraveného modelu interakci s trhlínami realističtějších tvarů, kde do výpočtů vstupují veličiny jako tření a geometrie stěn trhlíny. Objevily se již první teoretické práce zabývající se touto problematikou, jako např. [1, 10]. Tohoto modelu se rovněž využívá pro hodnocení vlastností povrchů pomocí ultrazvuku [9] nebo při analýzách bimodulárních stavebních konstrukcí [49].

### 3 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN

Nelineární spektroskopie elastických vln (Nonlinear Elastic Waves Spectroscopy, dále NEWS) je souborem moderních, dynamicky se rozvíjejících experimentálních metod, které využívají nelineární odezvy poškozených těles a materiálů k určení míry poškození jejich struktury a případné lokalizaci poškození. Většina metod spadajících pod NEWS využívá šíření elastických vln, které jsou generovány ultrazvukem, laserem, mechanickými pulsy apod. Pro hodnocení, modelování a popis dějů jsou používány obvykle modely popsané v předchozí kapitole. Významným pojitkem mezi metodami NEWS je využití spektrální analýzy. Hlavním nástrojem pro analýzu výsledků měření je především Fourierova transformace (FFT).

#### 3.1 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPICKÉ METODY

Rozpracovány byly dvě skupiny metod zaměřených na akustickou nelinearitu odezvy materiálu: rezonanční a nerezonanční. V první skupině metod používaných u těles s vysoce rezonančními projevy se využívá především měření nelineárního efektu posunu rezonančního kmitočtu v závislosti na intenzitě budícího signálu (obr. 6). Tyto metody se nazývají Single Mode Nonlinear Ultrasound Spectroscopy – SIMONRUS, v případě buzení na nižších akustických frekvencích jako SIMONRAS (Single Mode Nonlinear Resonance Ultrasound, respektive Acoustic Spectroscopy) [47]. V odezvě vzorků jsou detailně vyšetřovány frekvenční posuny rezonančního maxima jednoho vlastního módu v závislosti na změnách amplitudy buzení. U nepoškozeného vzorku je rezonanční frekvence s amplitudou neměnná (obr. 6 a), v poškozeném vzorku se s amplitudou mění tvar rezonanční křivky a posouvá se vrchol rezonančního maxima (obr. 6 b).



a) Nepoškozený vzorek

b) Poškozený vzorek

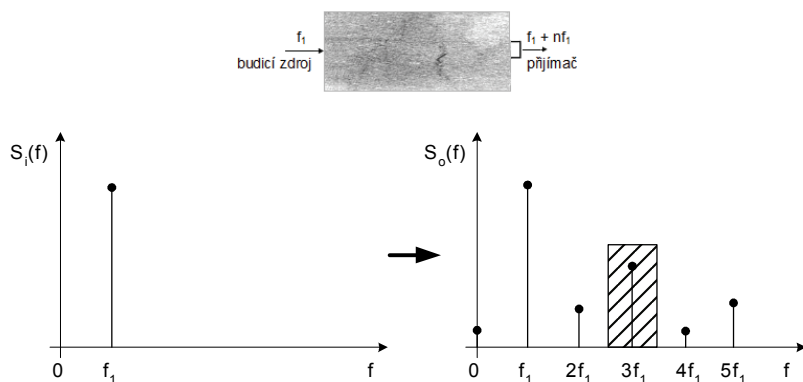
Obr. 6 Příklad posunu rezonančního kmitočtu tělesa na intenzitě vybuzení [44]

Pro tělesa s potlačenými rezonančními vlivy nejsou rezonanční metody dobře použitelné. Proto se pro taková tělesa využívají nerezonanční metody, vyhodnocující vliv nelinearity na procházející akustický signál. Tyto metody lze rozdělit do dvou skupin:

1. měření s jedním harmonickým ultrazvukovým signálem (jeden kmitočet  $f_1$ )
2. měření s více harmonickými ultrazvukovými signály (obvykle dva kmitočty  $f_1$  a  $f_2$ ).

V prvním případě (obr. 7) způsobuje nelinearita vznik dalších harmonických signálů  $f_n$  s kmitočty dle Fourierova rozvoje

$$f_n = n \cdot f_1 \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (4)$$



Obr. 7 Frekvenční spektrum odezvy nelineárního prostředí

Amplitudy těchto složek obecně klesají s růstem přirozeného čísla  $n$ . Může se však také projevit menší amplituda druhé a dalších sudých harmonických složek v porovnání s lichými složkami při malé nesymetrii vlivu nelinearity, jak je parné na obr. 7. Důležitý je výrazný projev třetí harmonické složky mezi nově vzniklými frekvencemi, a proto je nejčastěji vyhodnocována její amplituda.

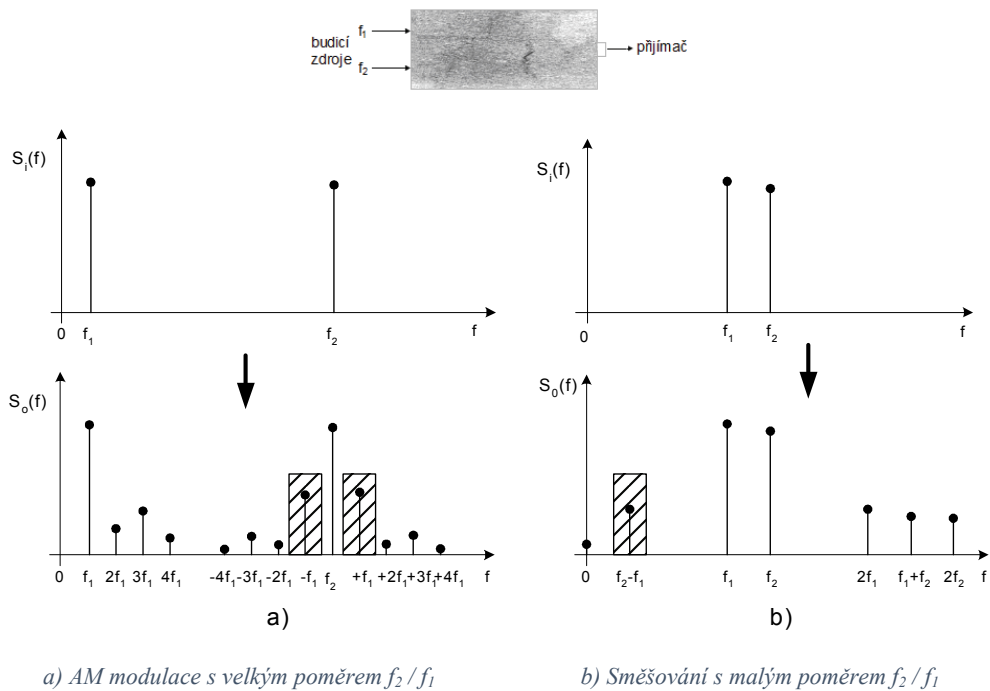
Druhá skupina metod spočívá v současném buzení zkoušeného tělesa dvěma odlišnými frekvencemi  $f_1, f_2$  (obr. 8). V důsledku nelinearity materiálu vzniknou další harmonické signály  $f_n$  podle vztahu

$$f_v = |\pm m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2| \quad \text{pro } m, n = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (5)$$

V tomto případě vzniká podstatně vyšší počet harmonických složek a kromě vyšších harmonických složek od obou budících harmonických signálů vznikají součtové a rozdílové složky (postranní pásma). Vzhledem k obecné zákonitosti poklesu amplitud výsledných složek s růstem přirozených čísel  $m$  a  $n$  jsou nejvýraznější první součtové a rozdílové složky s frekvencemi

$$f_v = |\pm f_1 \pm f_2| \quad (6)$$

Tyto metody se nazývají Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy – NWMS (modulační ultrazvuková spektroskopie). Mají také dvě základní varianty (obr. 8), které se liší dle relativního poměru hodnoty kmitočtů  $f_1$  a  $f_2$ . Metody lze přirovnat k radiotechnickým principům AM modulační a směšování.



a) AM modulační s velkým poměrem  $f_2/f_1$

b) Směšování s malým poměrem  $f_2/f_1$

**Obr. 8** Kmitočtové spektrum při průchodu dvou signálů nelineárním prostředím

V prvním případě mají dva harmonické kmitočty řádově odlišnou hodnotu, jeden je nízkofrekvenční a druhý vysokofrekvenční. Při interakci těchto signálů s defektem vznikne úzkopásmový AM signál, a kromě původního kmitočtu  $f_2$  se objeví postranní složky  $f_2 \pm n f_1$ , (obr. 8a). Pro detekci a měření součtové a rozdílové složky lze použít buď spektrální analýzu (velmi jemné rozlišení složek spektra), anebo synchronní demodulaci s následnou analýzou nízkofrekvenčního signálu.

Druhý případ využívá směšovacího principu, kdy oba budící signály mají relativně blízké hodnoty kmitočtů a první rozdílová složka má naopak poměrně nízkou hodnotu (obr. 8 b). V tomto případě je, vzhledem k relativně velkému rozdílu kmitočtů budících signálů a kmitočtu měřené rozdílové složky, evidentní výhoda možnosti přímé detekce této rozdílové složky.

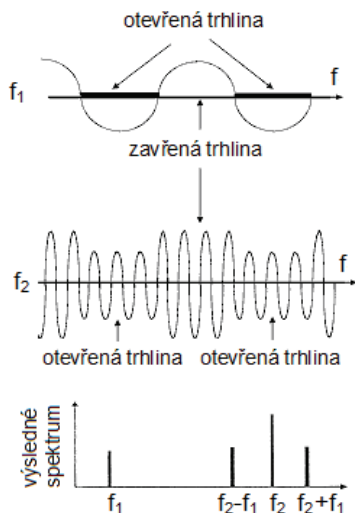
Časový rozměr působení budících signálů se projevuje ve třech výrazných případech. V obou základních variantách kmitočtového působení (1. a 2.) lze při měření pracovat ve spojitým a), či impulsním b) režimu:

a) Ve spojitým režimu (CW – continuous wave) je vzorek buzen dvěma sinusovými signály pomocí elektromagnetických nebo piezoelektrických měničů. Tento způsob je vhodný pro citlivá integrální měření.

b) V impulsním režimu s *radiovými impulsy* nebo instrumentálním kladívkem. Instrumentální kladívko lze označit jako méně vhodné, protože v tomto případě se jedná o buzení kontinuálním spektrem (spektrum Diracova impulsu) a vliv nelineárních vlastností tělesa je obtížněji detekovatelný. Avšak mechanickým impulsním signálem lze dosáhnout podstatně většího výkonu než v případě elektrického buzení s čistým harmonickým signálem, což zvyšuje citlivost měření. Tyto metody jsou vhodné pro použití v případě výrazně rezonančního charakteru odezvy zkoumaného tělesa. Lze uvést dva typické příklady impulsního buzení instrumentálním kladívkem z běžné praxe – spektrální analýza lidským uchem při poklepu kladívkem na kolo železničního vagónu, či známá změna spektra zvuku u prasklého zvonu.

c) Třetí případ metody spočívá naopak v modulaci ultrazvukového pulsu stacionárně buzenými vibracemi vzorku v rozmezí desítek Hz. Nízkofrekvenční vibrace modulují vysokofrekvenční ultrazvukový signál (1 až 3 MHz) odražený od defektu a pomocí metody nelineárního akustického zobrazování se měří prostorové rozložení modulační úrovně. Způsob vytvářeného zobrazení umožňuje velmi dobře lokalizovat polohu defektů typu trhliny, ale jak uvádí [7] nelze touto metodou detekovat např. otvory v tělese.

Jednoduché vysvětlení pozorovaných nelineárních jevů vychází z modelu chování defektů typu trhlin [36]. Trhliny uvnitř tělesa se střídavě zavírají a otevírají při průchodu budící (nosné) vlny o nízké frekvenci  $f_1$  (obr. 9).



Obr. 9 Fyzikální princip nelineární vlnové modulační spektroskopie (NWMS)

V tlakové fázi se zavírají a v tahové otevírají. Druhá vlna o vysoké frekvenci  $f_2$  pak střídavě prochází větší, resp. menší plochou při zavření, resp. otevření trhliny, což má za následek amplitudovou modulaci výstupního signálu. Nové harmonické složky a postranní pásma vznikají v důsledku nárazu stěn trhliny o sebe při průchodu tlakové vlny „*crack clapping*“. U vznikajících malých, málo rozevřených defektů (rozevření řádově stovky nm) mohou být efekty nárazu stěn o sebe pozorovány již při relativně velmi malých amplitudách budicího signálu (malých posuvech).

### 3.2 VÝHODY A OMEZENÍ METOD VE STAVEBNICTVÍ

Nelineární ultrazvuková spektroskopie přináší oproti klasickému ultrazvukovému nedestruktivnímu testování kromě výhod také určitá omezení při jejich aplikacích ve stavebnictví [5].

Výhody:

- rychlost,
- extrémní citlivost,  $10\times$  až  $1000\times$  oproti klasickému ultrazvuku,
- pro tělesa složitých tvarů,
- pro velké rozpětí rozměrů (od mikročipů až po mosty),
- pro široké spektrum materiálů i s relativně velkou nehomogenitou.

Další výhodou je necitlivost těchto metod na odrazy měřících signálů, protože okraje těles nemají nelineární vlastnosti a selektivně vybírané signály nevznikají při těchto odrazech. Proto lze tyto metody využívat i pro tvarově složitá tělesa. Obdobně je důležitý vliv vysoké nehomogenity materiálu (typický pro stavebnictví), který je velkým problémem pro využívání ultrazvuku ve stavebnictví [21, 34]. V případě nelineární ultrazvukové spektroskopie je vliv nehomogenity materiálu minimální, protože její nelineární projev je podstatně nižší než u běžných defektů.

Základní omezení nelineární ultrazvukové spektroskopie závisí na typu metody a jejím použití. Pro nejjednodušší metodu integrálního měření s vyhodnocováním třetí harmonické složky je jedním z nejdůležitějších parametrů citlivost jako poměr úrovně měřeného signálu k rušivým signálům. Je určen [4]:

- úrovní měřeného signálu (výkon signálu  $f_1$ , koeficienty přenosu a změny spektra),
- úrovní rušivých signálů (parazitní signál  $3f_1$ , šum).

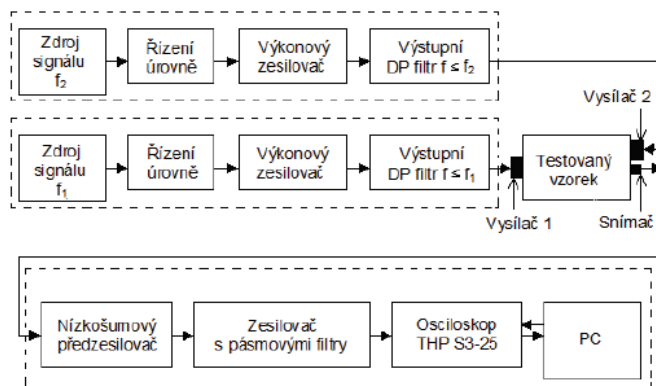
Existují některé podstatné rozdíly v omezení pro jednotlivé metody. Jiný je především vznik a působení parazitních složek u metod modulační vlnové spektroskopie (NWMS). Zde, v porovnání s metodou třetí harmonické, oddělené zdroje signálu neprodukují přímo parazitní složku (rozdílovou či součtovou  $|\pm f_1 \pm f_2|$ ). Ta vzniká až na nelinearitách v místě současného působení obou signálů. Dosažitelná citlivost této metody je poněkud menší než u předchozích metod. Na druhou stranu má tato metoda výhodu ve snadné vybuditelnosti i velkého tělesa nízkofrekvenčním signálem.

## 4 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE

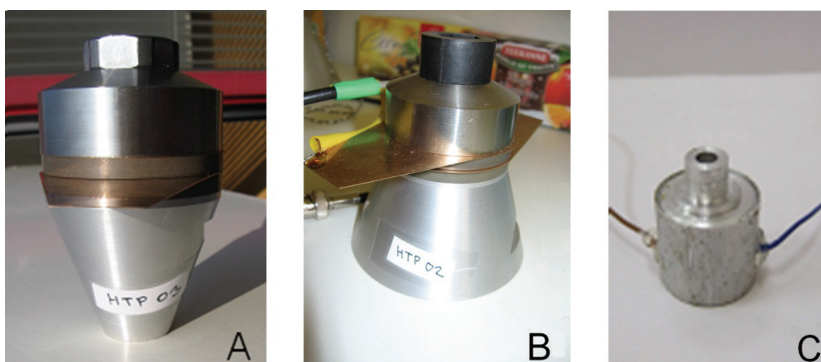
Na základě teoretického rozboru jednotlivých metod nelineární akustické spektroskopie z hlediska jejich složitosti, aplikovatelnosti a užitečnosti pro účely stavebnictví [23], bylo realizováno měřicí zařízení pro dvě metody nelineární ultrazvukové spektroskopie: měření s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem a měření se dvěma budícími harmonickými ultrazvukovými signály [26].

Zařízení se sestává ze dvou hlavních částí, vysílací a přijímací (obr. 10). Hlavní větev vysílací části obsahuje čtyři bloky. První blok tvoří generátor harmonického signálu s řízením úrovně. Další tři bloky byly sestaveny z prvků speciálně zhotovených v rámci řešení grantového projektu:

výkonový zesilovač s maximálním výkonem 100 W s dostatečně nízkým zkreslením, výstupní filtr typu dolní propust a výkonový piezokeramický vysílač (budič) pro buzení ultrazvukem. Zhotoveny a používány byly tři modifikace výkonových piezokeramických vysílačů (obr.11): A – s koncentrátorem mechanického vlnění, B – pro buzení ultrazvuku na deskách, C – pro buzení o vyšších kmitočtech).



*Obr. 10* Blokové schéma měřicího zařízení doplněné pro variantu se dvěma budícími signály



*Obr. 11* Výkonové piezokeramické vysílače: A – s koncentrátorem mechanického vlnění; B – pro buzení ultrazvuku na deskách; C – pro buzení na vyšších kmitočtech

Hlavní větev přijímací části má ve vstupu zesilovač s filtry pro zabezpečení minimalizace vzniku zkreslení v přijímací cestě a zesilovač s pásmovými filtry. Po zesílení je signál ze snímače vzorkován a analyzován pomocí přístroje THPS3-25 HandyScope3, pořízeným z finančních prostředků grantového projektu. Velká pozornost byla věnována testování linearitu měřicího řetězce a výběru přenosového media [24, 26]. Výsledky měření ve formě frekvenčních spekter jsou ukládány do paměti PC k dalšímu zpracování.

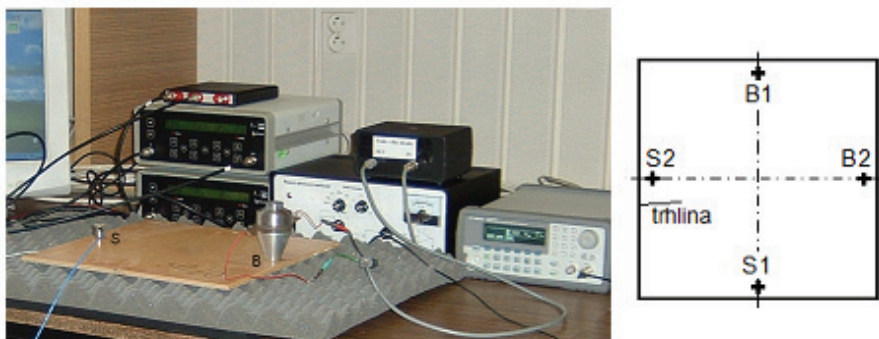
## 5 APLIKACE METOD NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE

Předmětem experimentů byly stavební materiály: keramika, kámen, beton, železobeton a předpínací ocelová lana.



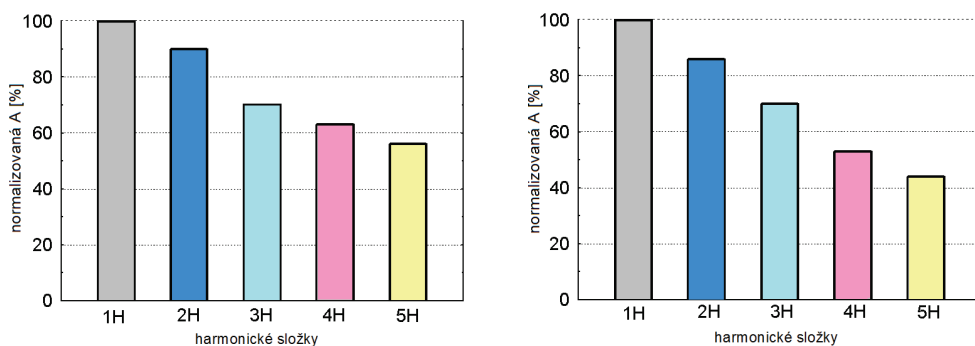
## 5.1 OBKLADOVÉ PRVKY Z DRUHOTNÝCH SUROVIN

Testován byl prototyp keramického obkladového prvku skupiny BIII podle ČSN EN 14411 na bázi popílkovitého střepu. Proměřovány byly dva typy vzorků (A, C), vzájemně se lišících obsahem popílkovitého střepu, o rozměrech 150 mm × 150 mm × 4 mm. V případě typu A se jednalo o intaktní vzorek, typ C byl zastoupen dvěma vzorky: C1 vzorek s neporušenou strukturou (intaktní), C2 vzorek obsahující viditelnou trhlinu. Uspořádání experimentu a schéma konfigurací budiče B a snímače S je zobrazeno na obr. 12 [13, 27, 29]. Aplikována byla metoda nelineární ultrazvukové spektroskopie s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem. Vzorky byly proměřovány ve dvou vzájemně kolmých orientacích budiče a snímače, konfigurace 1 a konfigurace 2 (obr. 12 – vpravo). Pro buzení byl použit vysílač B (budič) s koncentrátorem harmonického ultrazvukového signálu o kmitočtu  $f_1 = 29$  kHz, připojení budiče a snímače bylo provedeno pomocí včelího vosku. Na intaktních vzorcích obou typů (A, C1) bylo zkoumáno, zda nehomogenní struktura materiálu obsahující popílkovitou střep není zdrojem nelineárních jevů při přenosu signálu. Na vzorku C2 s viditelnou trhlinou byl sledován vliv trhliny na procházející signál.



*Obr. 12 Uspořádání experimentu: vlevo – měřící zařízení s testovaným vzorkem; vpravo – schéma vzájemných konfigurací budiče B a snímače S na vzorku s trhlinou*

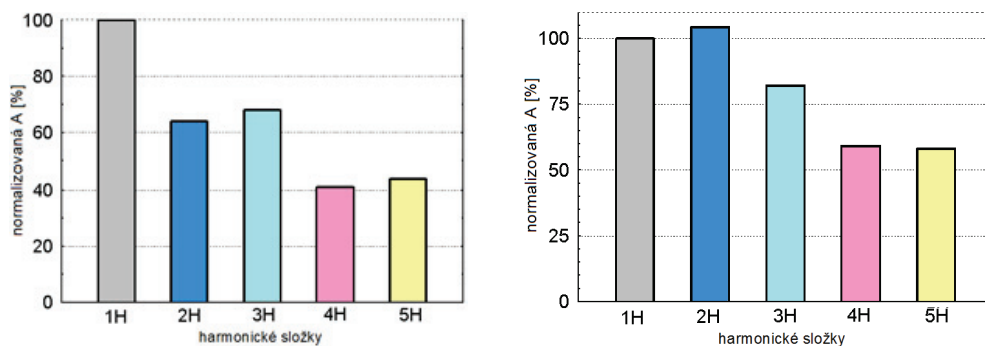
Výsledky měření prezentují relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí normalizované na hodnotu amplitudy první harmonické frekvence (obr. 13). Grafy na obr. 13 odpovídají intaktnímu vzorku typu C s neporušenou strukturou, označeného C1.



*Obr. 13 Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí intaktního vzorku C1: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace*

Z grafů odpovídajících intaktnímu vzorku C1 je patrný pokles hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí s jejich rostoucím pořadovým číslem. Při obou variantách měření nejsou v grafech patrný projevy nelinearity. Stejný výsledek měření byl dosažen i v případě měření intaktního vzorku A.

Následující obr. 14 zobrazuje výsledky měření vzorku s trhlinou, označeného C2. V tomto případě se při obou konfiguracích budiče a snímače projevila porušená struktura vzorku změnami v přenosových charakteristikách.



*Obr. 14 Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí poškozeného vzorku C2: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace*

V případě první konfigurace budiče a snímače, graf vlevo, dosahuje maximální hodnoty amplituda třetí 3H harmonické frekvence a rovněž pátá 5H harmonická nevykazuje klesající trend harmonických složek jako v případě intaktního vzorku (obr. 13). Výsledky měření při druhé konfiguraci budiče a snímače (obr. 14 – vpravo) vykazují rovněž nelineární efekty. V tomto případě (snímač byl umístěn v blízkosti trhliny) je ve frekvenčním spektru dominantní druhá 2H harmonická, hodnota její amplitudy je o 4 % vyšší oproti amplitudě první 1H harmonické – budící frekvenci. Dále pak amplitudy čtvrté 4H a páté 5H harmonické vykazují srovnatelné hodnoty.

## 5.2 STROPNÍ DESKY HURDIS

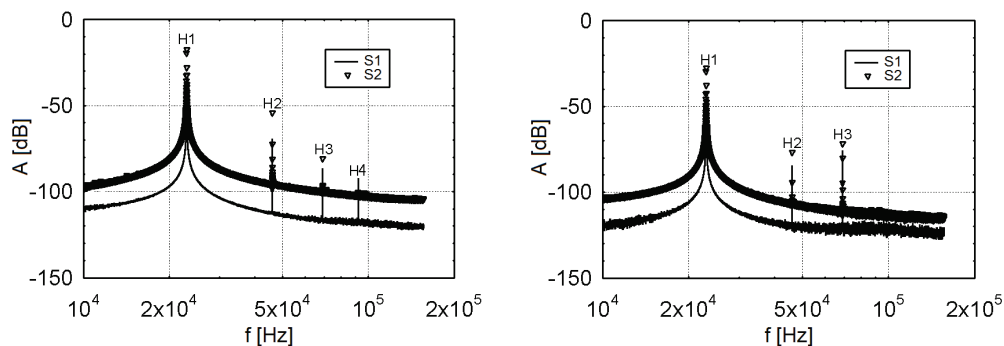
Havárie stropních konstrukcí s deskami Hurdis iniciovaly výzkum zaměřený na rozbor jejich příčin a na ověřování nedestruktivních metod, které by odhalily existenci závažných trhlin ve stropní konstrukci zhotovené z těchto desek. Důležitým poznatkem byla skutečnost, že je třeba odlišit případy narušených stropních konstrukcí účinkem objemových změn betonu a keramického střepu od poruch vyvolaných jinými příčinami. Aby se zabránilo možnosti zabudovat do stropní konstrukce i desky, které mají trhliny způsobené závadami ve výrobě, byla zkoumána také možnost vyloučit vadné desky zavedením nedestruktivní metody do výstupní kontroly ve výrobě. Autorka spolupracovala na výzkumu metody impakt-echo z hlediska možnosti jejího využití pro diagnostiku samostatných stropních desek a pro sledování důsledků objemových změn v deskách vlivem smršťování nadbetonovaného cementového potěru [11, 25]. Cílem navazujícího výzkumu bylo využití kombinace procedur nelineární ultrazvukové spektroskopie se stávajícími metodami pro uvedené problematické stropní konstrukce s deskami Hurdis. Výzkumná práce byla finančně podpořena tříletým projektem GA ČR č. 103/06/P401 „Diagnostika stropních konstrukcí z desek HURDIS metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie“ [14, 31].

Testovány byly stropní desky o rozměrech 117 cm × 25 cm × 7,5 cm, poskytnuté stavební firmou. Dodány byly desky nepoškozené a desky s viditelnými trhlinami. Aplikovány byly obě metody nelineární ultrazvukové spektroskopie (kap. 3.1), s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem a se dvěma budícími signály. V případě aplikace první metody byl použit budič pro buzení na deskách (obr. 11), aplikován byl harmonický ultrazvukový signál o kmitočtu 23 kHz. V první fázi byla pozornost měření zaměřena na stanovení intenzity budícího signálu z hlediska výskytu nelineárních efektů ve frekvenčních spektrech odezvy stropních desek. Jako optimální byly ověřeny budící signály o hodnotách napětí v rozsahu 4,6 V až 9,3 V. Při následujících měřeních bylo buzení realizováno budícím napětím o hodnotě 9,2 V. Přenosové charakteristiky byly studovány z hlediska výskytu nelineárních efektů a vlivu konfigurace budiče B a dvou pozic snímače S. Pozice snímače S1 se nacházela na protilehlém konci podélné osy vzhledem k budiči B, pozice snímače S2 uprostřed stropní desky (obr.15).



**Obr. 15** Ukázka stropní desky s vyznačenou polohou budiče B a pozicemi snímače (S1, S2) při aplikaci metody s jedním budícím signálem

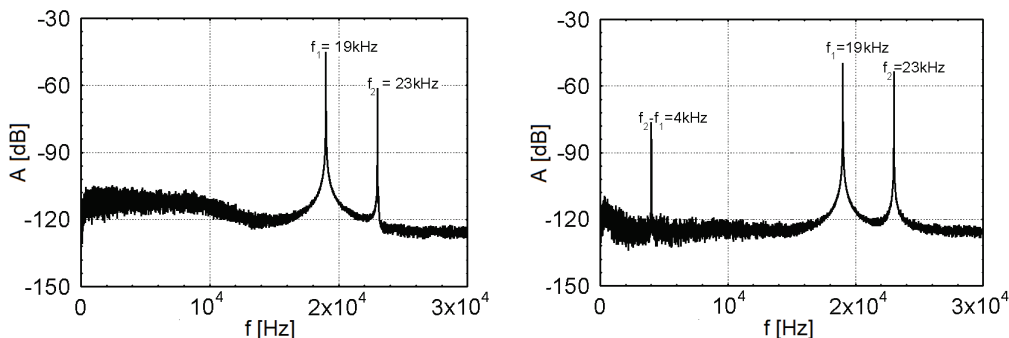
Výsledky měření intaktní stropní desky N1 pro obě pozice snímače zobrazuje graf uvedený vlevo na obr. 16 – vlevo. Z grafu je patrný pokles amplitud frekvenčních složek s rostoucím pořadím vyšších harmonických frekvencí. V přenosových charakteristikách se nevyskytují nelineární efekty.



**Obr. 16** Frekvenční spektra přenosových charakteristik stropních desek: vlevo – nepoškozená deska N1; vpravo – deska s trhlinou T1. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače

Graf uvedený vpravo (obr. 16), zobrazuje analogicky výsledky měření stropní desky T1 s viditelnou trhlinou pro obě pozice snímače. Ve frekvenčním spektru je patrné, že amplituda třetí H3 harmonické frekvence dosáhla vyšší hodnoty v porovnání s amplitudou druhé H2 harmonické frekvence, přičemž čtvrtá H4 harmonická nepřesáhla úroveň šumového pozadí.

Ve druhé fázi experimentu byly desky proměřeny metodou se dvěma budičimi ultrazvukovými signály [30]. Budiče byly umístěny na protilehlých koncích desky, snímač uprostřed stropní desky. Buzení bylo realizováno signály o blízkých hodnotách kmitočtů,  $f_1 = 19 \text{ kHz}$ ;  $f_2 = 23 \text{ kHz}$ . Využita byla výhoda této metody spočívající v možnosti přímé detekce jejich rozdílové složky. Výsledná spektra z měření obou stropních desek jsou zobrazena na obr. 17.

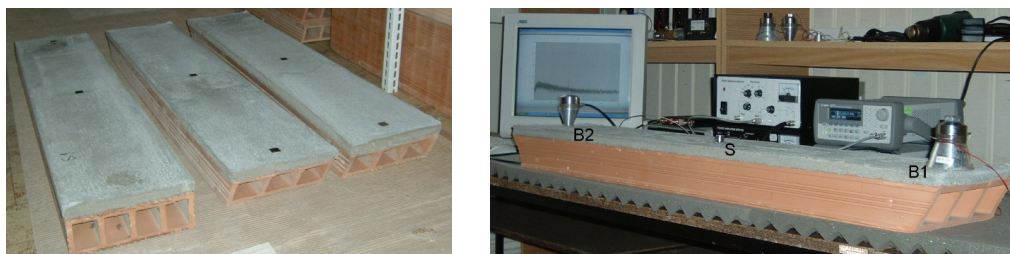


*Obr. 17 Frekvenční spektra přenosových charakteristik stropních desek při buzení dvěma harmonickými signály blízkých kmitočtů: vlevo – intaktní deska N1; vpravo – deska s trhlinou T1*

Graf uvedený vlevo odpovídá intaktní desce N1. Z frekvenčního spektra je patrné, že první rozdílová složka budičích kmitočtů  $\Delta f = 4 \text{ kHz}$  nepřesáhla hodnotu šumového pozadí, což opět informuje o neporušené struktuře desky. Graf uvedený vpravo odpovídá desce s trhlinou T1. Ve frekvenčním spektru se výrazně uplatňuje rozdílová složka budičích kmitočtů na hodnotě 4 kHz, generovaná v důsledku poškozené struktury desky.

### 5.3 STROPNÍ DESKY UPRAVENÉ JAKO SENDVIČE

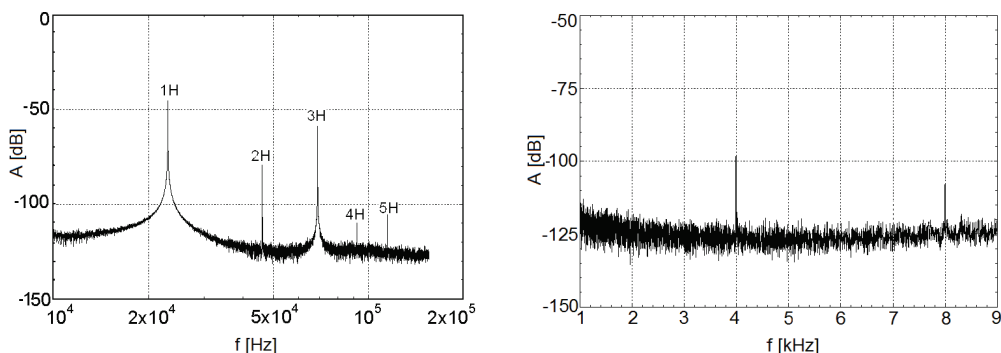
Pro tvorbu sendvičů byly použity proměřené stropní desky Hurdis bez trhlin i s trhlinami. Tloušťka nadbetonovaného potěru činila 2 cm, 3 cm a 4 cm (obr. 18).



*Obr. 18 Ukázka testovaných sendvičů. Vpravo – konfigurace budičů a snímače při metodě se dvěma budičimi ultrazvukovými signály*

Měření sendvičů bylo realizováno ve dvou časových odstupech, po sedmi a po dvaceti osmi dnech od jejich zhotovení. Pro snadné a dobře reprodukovatelné připojování snímačů byly na povrch betonového potěru přimeleny ocelové podložky [32]. Stropní desky zabudované v sendvičích byly denně vizuálně kontrolovány po dobu dvaceti osmi dnů. Po sedmi dnech od provedení betonového potěru se objevily trhliny ve vnějších stěnkách všech stropních desek. Trhliny v deskách Hurdís zřejmě vznikají při jejich přímém spojení s betonovým potěrem z důvodu objemových změn vlivem smršťování betonové mazaniny. Pro ověření tohoto poznatku byly zhotoveny dva sendviče z desek, které nebyly vlhčeny, což vedlo k malé přídržnosti a oddělení nadbetonované vrstvy (potěru). Tak byla umožněna samostatná dilatace jak desky, tak potěru (betonu) a nedošlo ke vzniku trhlin v deskách.

Prezentovány jsou výsledky měření sendviče SN1, se stropní deskou N1 z měření po dvaceti osmi dnech od zhotovení (obr. 19). Graf, zobrazený vlevo, zobrazuje přenosovou charakteristiku z měření s jedním budícím signálem.



**Obr. 19** Frekvenční spektra přenosových charakteristik sendviče SN1: vlevo – buzení jedním signálem; vpravo – buzení dvěma signály ( $f_1 = 19$  kHz;  $f_2 = 23$  kHz)

Vyšší harmonické frekvence nevykazují postupný pokles amplitud, jak tomu bylo v případě samostatné desky N1 (obr. 16 – vlevo). Amplitudy lichých harmonických, třetí 3H a páté 5H, dosahují vyšších hodnot oproti sudým, druhé 2H a čtvrté 4H harmonické.

Výsledky měření se dvěma budícími signály zobrazuje graf uvedený vpravo (obr. 19). Opět byly aplikovány signály o kmitočtech blízkých hodnot,  $f_1 = 19$  kHz;  $f_2 = 23$  kHz. Ve frekvenčním spektru odpovídajícím samostatné desce N1 (obr. 17 – vlevo) se rozdílové složky budících kmitočtů nevyskytovaly. V případě sendviče SN1, zhotoveného z této stropní desky, ve frekvenčním spektru dominuje amplituda na frekvenci odpovídající první rozdílové složce  $\Delta f = 4$  kHz. Rovněž je zvýrazněna amplituda na hodnotě 8 kHz, která odpovídá druhé harmonické frekvenci rozdílové složky.

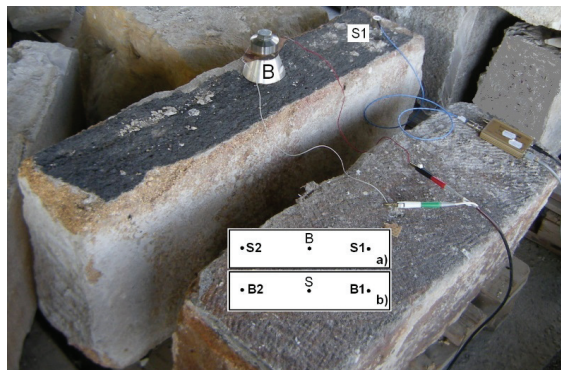
## 5.4 KAMENNÉ BLOKY

Testovány byly kamenné bloky vyjmuté z lícního zdiva Karlova mostu, uložené ve skladovém areálu v Praze. Cílem experimentálního studia bylo ověřit, zda lze metody nelineární ultrazvukové spektroskopie použít pro hodnocení integrity struktury vyjmutých kamenných bloků a zda jsou tyto metody perspektivní i pro hodnocení struktury bloků zabudovaných ve vnější stěně mostní konstrukce – pro měření in situ [18]. Testovány byly bloky s nepoškozenou integritou struktury (z nedegradovaných hornin), bloky v minulosti již vyspravované a bloky s porušenou integritou struktury. Proměřeno bylo celkem 11 kusů bloků, lišících se rozměry i původem materiálu. Měření bylo realizováno na stěnách bloků, které před jejich vyjmutím tvořily dostupnou vnější stěnu



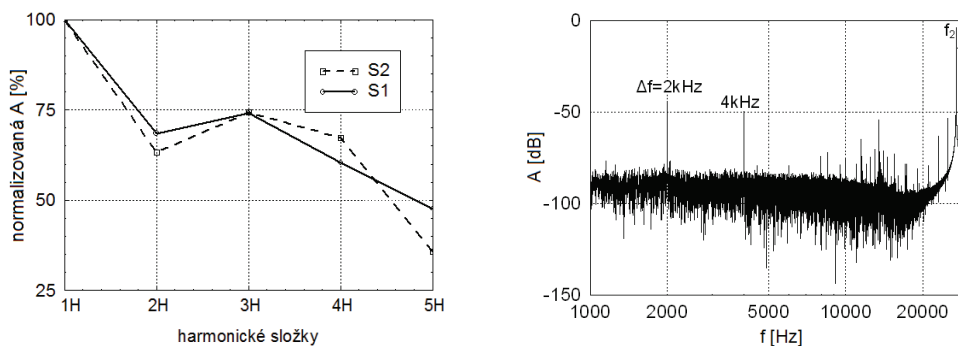
mostní konstrukce. Aplikovány byly obě metody nelineární ultrazvukové spektroskopie, s jedním a se dvěma ultrazvukovými harmonickými budícími signály. Analyzovány byly amplitudově závislé změny harmonických složek odezvy v poškozených blocích. Pro verifikaci výsledků byly vzorky paralelně proměřeny metodou impact-echo [17].

Prezentovány jsou výsledky měření pískovcového hranolu (vzorek č. 2, obr. 20) s vizuálně neporušenou strukturou, o rozměrech 73 cm × 36 cm × 25 cm.



**Obr. 20** Vzorek č. 2 se schematickým znázorněním konfigurací budiče B a snímače S na horní ploše vzorku: a) pro jeden budící signál; b) pro dva budící signály

Měření metodou s jedním budícím signálem odpovídá schematicky znázorněná konfigurace budiče B a snímače S (obr. 20a). Budič B harmonického ultrazvukového signálu o kmitočtu 29 kHz byl umístěn uprostřed horní plochy, odezva byla snímána snímačem na dvou pozicích, označených S1 a S2. Normalizované hodnoty vyšších harmonických vzhledem k první harmonické (budící frekvenci) jsou pro obě pozice snímače (S1, S2) vzájemně porovnány na obr. 21-vlevo. Ze vzájemného porovnání poklesu amplitud vyšších harmonických z hlediska linearity, lze jako kvalitnější hodnotit pravou polovinu bloku, snímanou snímačem na pozici S1.



**Obr. 21** Přenosové charakteristiky vzorku č. 2: vlevo – normalizované hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí, S1 – první pozice snímače, S2 – druhá pozice snímače; vpravo – buzení dvěma signály ( $f_1 = 29$  kHz;  $f_2 = 27$  kHz)

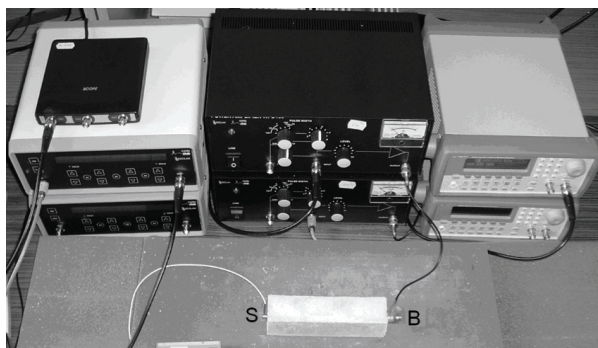
Výsledek měření při buzení dvěma signály blízkých kmitočtů ( $f_1 = 29$  kHz;  $f_2 = 27$  kHz) je zobrazen na obr. 21 – vpravo. Ve frekvenčním spektru byla detekována rozdílová složka dvou

budících kmitočtů na hodnotě 2 kHz a druhá harmonická rozdílové frekvence na hodnotě 4 kHz. Na základě výsledků měření pomocí obou metod lze hodnotit celistvost struktury jako částečně poškozenou.

## 5.5 VZORKY Z JEMNÉ BETONOVÉ SMĚSI

Beton je díky svému složení silně hysteretzní materiál, který vykazuje i v nepoškozeném stavu určitou míru nelinearity [33]. Jsou-li však ve zkoušeném tělese přítomny defektní zóny, stávají se dalším zdrojem nelinearity, která řádově převyšuje vlastní nelinearitu tělesa. Nelineární chování materiálu se pak při ultrazvukovém zkoušení projevuje především deformací ultrazvukových vln procházejících tělesem, což vede ke vzniku nelineárních efektů ve frekvenčním spektru zaznamenaného signálu.

Předmětem experimentu bylo dvacet jedna vzorků zhotovených z jemné betonové směsi dle č. receptury 400921, konzistence V1, o rozměrech 4 cm × 4 cm × 16 cm. První fáze měření byla zaměřena na zkoumání vlivu odlišných podmínek zrání betonu na integritu vnitřní struktury vzorků [16]. Druhá fáze experimentu byla zaměřena na sledování poškození struktury vzorků po jejich teplotním zatěžování. Uspořádání experimentu, s vyznačenou pozicí budiče B a snímače S na vzorku je zobrazeno na obr. 22.

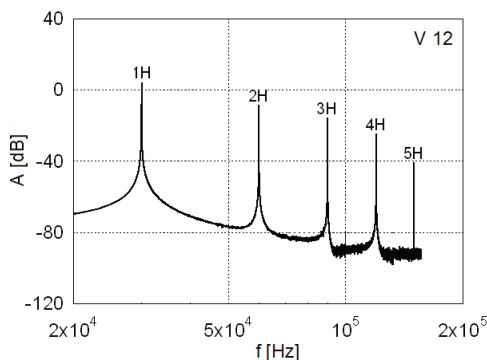


*Obr. 22 Vzorek z jemné betonové směsi – uspořádání experimentu*

### 5.5.1 První fáze experimentu

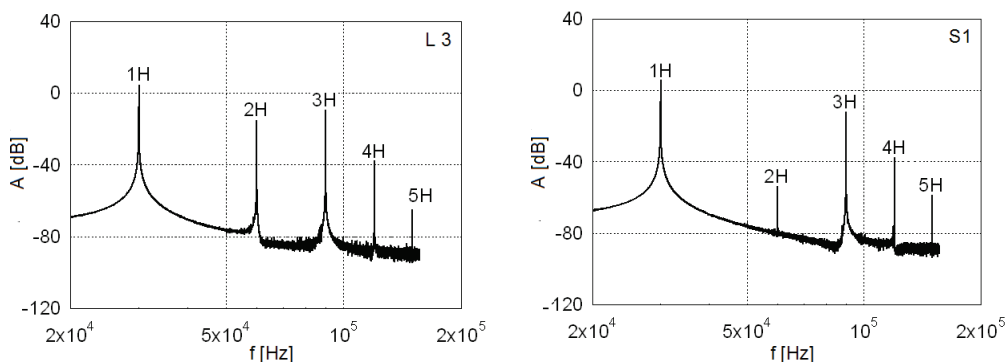
Vzorky byly po zatvrdnutí betonu rozděleny do tří skupin. Jednotlivé skupiny vzorků se vzájemně lišily podmínkami uložení v průběhu zrání betonu. První skupina vzorků byla po dobu zrání betonu (dvacet osmi dnů) uložena dle standardních podmínek ve vodě (označení V), nedocházelo k úbytku vlhkosti po zatvrdnutí betonu. Druhá skupina vzorků (označení L) byla po dobu zrání uložena na vzduchu při laboratorní teplotě. Třetí skupina vzorků (označení S) byla po dobu dvanácti dnů v procesu zrání uložena v sušičce, při teplotě vzduchu 60°C, za účelem dosažení silnějšího porušení celistvosti struktury.

Aplikována byla metoda s jedním budícím ultrazvukovým signálem o kmitočtu 30 kHz. Graf na obr. 23 odpovídá vzorku V12, který reprezentuje skupinu vzorků zrajících dle standardních podmínek pod vodou. Ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky je patrný postupný pokles amplitud vyšších harmonických složek s jejich rostoucím pořadovým číslem bez nelineárních efektů, což informuje o neporušené integritě struktury vzorku.



**Obr. 23** Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku V12 – zrání betonu pod vodou

Následující obr. 24 zobrazuje výsledky měření vzorků zrajících v nestandardních podmínkách.



**Obr. 24** Frekvenční spektra přenosových charakteristik: vlevo – vzorek L3, zrání betonu v laboratorním prostředí; vpravo – vzorek S1 – v procesu zrání uložený po dobu dvanácti dnů v sušičce

Frekvenční spektrum uvedené vlevo (obr. 24) odpovídá vzorku L3, který reprezentuje vzorky namáhané smršťováním v důsledku nedostatku vlhkosti v procesu zrání betonu. Z grafu je patrné, že vznik mikrotrhlin je zdrojem nelineárních efektů ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky. Třetí 3H harmonická, dosahuje vyšší hodnoty oproti druhé 2H harmonické.

Výsledky měření třetí skupiny vzorků, které byly v procesu zrání uloženy po dobu dvanácti dnů v sušičce při teplotě 60°C, reprezentuje vzorek S1 uvedený vpravo (obr. 24). Ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky je v tomto případě výraznější projev nelinearity. Prudký pokles amplitudy druhé 2H harmonické frekvence, téměř o 60 dB vzhledem k amplitudě první 1H harmonické, je zřejmě projevem masivnějšího poškození struktury vzorku. Z důvodu ověření korelace nelineárních efektů se vznikem mikrotrhlin ve struktuře vzorků byla realizována verifikační měření: aplikace metody impakt-echo a ultrazvukové impulsové metody.

Výsledné hodnoty verifikačních fyzikálních veličin odpovídající prezentovaným vzorkům (V12, L3, S1) jsou uvedeny v Tab. 1. Porovnány jsou rychlosti šíření UZ vlnění  $c_l$ , vypočtené hodnoty frekvencí podélných kmitů  $f_l$  a pro porovnání jsou doplněny hodnoty dominantních frekvencí odečtené z grafů frekvenčních spekter odezvy vzorků z aplikace metody impakt-echo. V posledních dvou sloupcích jsou uvedeny průměrné hodnoty těchto veličin pro jednotlivé skupiny vzorků. Z přehledu hodnot verifikačních veličin je rovněž patrný negativní důsledek nestandardních podmínek zrání betonu na integritu struktury vzorků.



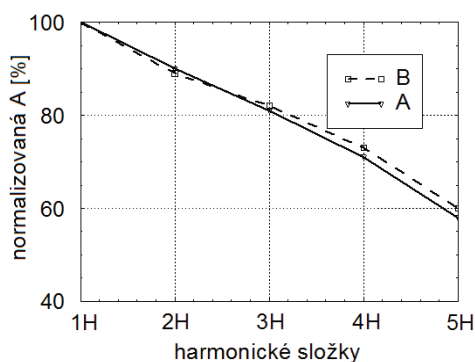
Vzorek	$c_1$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]	$f_1$ z grafu [Hz]	Skupina vzorků	$c_1$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]
V12	3 268	10 270	9 700	V – zrání pod vodou	3 410	10 650
L3	3 041	9 520	8 800	L – zrání na vzduchu	3 060	9 670
S1	2 822	8 860	8 000	S – v sušičce	2 860	8 970

Tab. 1 Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin vzorků reprezentujících skupiny V, L, S

### 5.5.2 Druhá fáze experimentu

Vzorky všech tří skupin byly po proměření uloženy po dobu osmi měsíců v laboratorních podmínkách a poté byly podrobeny dvaceti pěti zmrazovacím cyklům dle normy ČSN 73 1380. Během každého cyklu byly vzorky po dobu čtyř a půl hodiny zmrazovány při teplotě  $-24^{\circ}\text{C}$  a následně po dobu dvou hodin ohřívány při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ .

Po aplikaci zmrazovacích cyklů byly vzorky opakovaně proměřeny výše uvedenými metodami. Cílem měření bylo posoudit důsledky teplotní degradace na strukturu vzorků, vzájemně se lišící kvalitou vlivem různých podmínek zrání betonu. Shodně byla aplikována metoda s jedním harmonickým ultrazvukovým budícím signálem o kmitočtu 30 kHz při stejné orientaci budiče B a snímače S dle obr. 22. Z důvodu porovnání přenosových charakteristik před degradací a po degradaci jsou výsledky měření prezentovány formou relativních hodnot vyšších harmonických, normalizovaných na hodnotu první harmonické (budící) frekvence. Grafické porovnání výsledků měření na obr. 25 odpovídá vzorku V12, který reprezentuje skupinu vzorků zrajících dle standardních podmínek. Obě přenosové charakteristiky (A, B) vykazují obdobný lineární pokles s rostoucím pořadím harmonických složek.

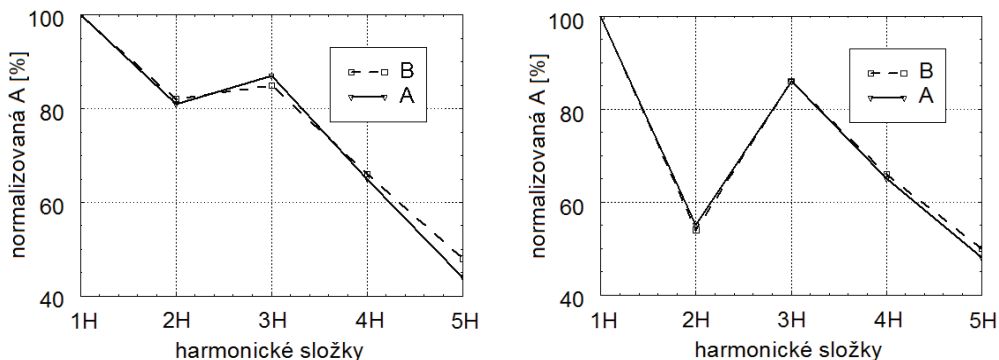


Obr. 25 Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí nepoškozeného vzorku V12: A – před degradací; B – po degradaci

Pro posouzení linearitu poklesu byla stanovena hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu  $r^2$ . Hodnota  $r^2$  se blíží k jedné, pokud je pokles amplitud lineární (jak je tomu u nepoškozených vzorků). Čím méně je pokles amplitud lineární tím více se hodnota  $r^2$  blíží k nule. V případě vzorku V12 byly vypočtené hodnoty pro obě křivky téměř shodné:  $r^2 = 0,994$  (pro křivku A),  $r^2 = 0,990$  (pro křivku B). Z porovnání výsledků lze konstatovat, že po aplikaci dvaceti pěti zmrazovacích cyklů nedošlo k porušení struktury vzorku V12.

Následující obr. 26 analogicky porovnává výsledky měření vzorků zrajících v nestandardních podmínkách. Frekvenční spektrum uvedené vlevo (obr. 26) odpovídá vzorku L3. Obě křivky (A, B) vykazují obdobný průběh s výskytem nelineárních efektů. Hodnoty druhé mocniny korelačního

koeficientu  $r^2$  jsou z hlediska linearity poklesu harmonických, příznivější pro měření vzorku po degradaci zmrazovacími cykly. Před degradací činila hodnota  $r^2 = 0,878$  (křivka A), po degradaci vykazovala zvýšenou hodnotu  $r^2 = 0,912$  (křivka B). Z porovnání obou hodnot lze tedy konstatovat mírné zlepšení integrity struktury vzorku po degradaci. Výsledky měření vzorků skupiny S, které byly v průběhu zrání betonu vysušovány v sušičce, reprezentuje vzorek S1, uvedený na obr. 26 vpravo. Obě křivky (A, B) vykazují opět obdobný průběh s výskytem nelineárních efektů jako v případě vzorku L3, před degradací činila hodnota  $r^2 = 0,476$  (křivka A), po degradaci vykazovala vyšší hodnotu  $r^2 = 0,507$  (křivka B). Z hlediska linearity poklesu amplitud vyšších harmonických lze rovněž usuzovat na mírné zlepšení strukturní celistvosti vzorku po teplotní degradaci.



Obr. 26 Grafické porovnání normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických (A – před degradací; B – po degradaci): vlevo – vzorek L3; vpravo – vzorek S1

V Tab. 2 jsou porovnány hodnotící parametry jednotlivých skupin vzorků.

Skupina vzorků	A					B				
	$f_2 / f_1$	$f_3 / f_1$	$f_4 / f_1$	$f_5 / f_1$	$r^2$	$f_2 / f_1$	$f_3 / f_1$	$f_4 / f_1$	$f_5 / f_1$	$r^2$
V – pod vodou	90 %	81 %	71 %	58 %	0,995	89 %	82 %	73 %	60 %	0,991
L – v laboratoři	81 %	87 %	65 %	44 %	0,878	82 %	85 %	66 %	48 %	0,912
S – v sušičce	55 %	86 %	65 %	48 %	0,476	54 %	86 %	66 %	50 %	0,507

Tab. 2 Relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu ( $r^2$ ): A – před degradací; B – po degradaci

V následující Tab. 3 jsou analogicky uvedeny hodnoty dalších verifikačních veličin po teplotní degradaci vzorků: rychlosti šíření UZ vlnění  $c_1$ , vypočtené hodnoty frekvencí podélných kmitů  $f_1$  a hodnoty dominantních frekvencí odečtené z grafů frekvenčních spekter odezvy vzorků V12, L3 a S1. V posledních dvou sloupcích jsou uvedeny průměrné hodnoty uvedených veličin všech proměřených vzorků v jednotlivých skupinách.

Vzorek	$c_1$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]	$f_1$ z grafu [Hz]	Skupina vzorků	$c_1$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]
V12	3 275	10 290	9 700	V – zrání pod vodou	3 420	10 680
L3	3 105	9 720	8 980	L – zrání na vzduchu	3 125	9 875
S1	2 920	9 190	8 320	S – v sušičce	2 970	9 345

*Tab. 3 Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin po teplotní degradaci vzorků*

Z porovnání uvedených hodnot s hodnotami v Tab. 1 je opět patrné zvýšení hodnot verifikačních veličin v případě nestandardně zrajících vzorků (skupin L a S), které rovněž informuje o zlepšení jejich strukturní integrity po teplotní degradaci.

Analýza výsledků měření vede k závěru, že ke zlepšení integrity struktury vzorků zrajících v nestandardních podmínkách zřejmě došlo dodatečnou hydratací cementových zrn (použit byl směsný cement) v důsledku máčení vzorků vodou v průběhu zmrazovacích cyklů.

## 5.6 ŽELEZOBETONOVÝ NOSNÍK

Koroze ocelové výztuže významně znehodnocuje technické vlastnosti a následně zkracuje spolehlivost a životnost železobetonových konstrukcí [37]. Dosud není známá spolehlivá NDT metoda pro průkaznou detekci korozního stavu výztuže přímo v konstrukci. Autorka se uvedenou problematikou zabývala v rámci své disertační práce, která byla zaměřena na detekci koroze ocelové výztuže a jejich důsledků pomocí metody akustické emise [22]. Spolupracovala na řešení grantového projektu, jehož cílem řešení bylo experimentální studium potenciálu nelineární ultrazvukové spektroskopie pro testování železobetonových konstrukcí z hlediska koroze ocelové výztuže a jejich důsledků [12,45].

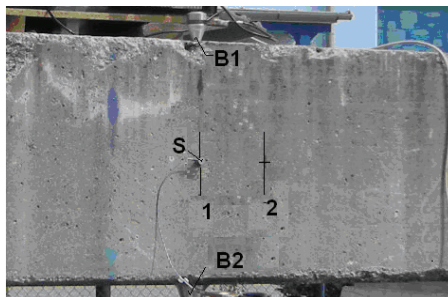
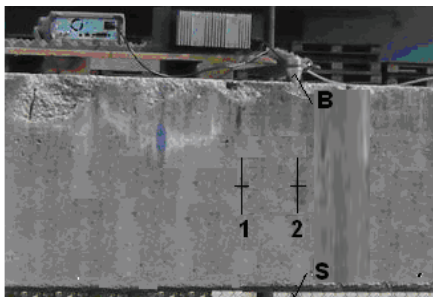
Předmětem experimentu byl železobetonový nosník vyjmutý z mostní konstrukce v průběhu rekonstrukce mostu (obr.27). Konkrétně se jednalo o nosník KA o rozměrech 0,5 m × 0,6 m × 11,5 m. Nosník byl převezen do areálu výzkumných laboratoří Centra dopravního výzkumu v Tišnově, kde byl přes pružnou podložku uložen na dvě betonová svodidla a osazen speciálním rámem pro zatěžování nosníku.



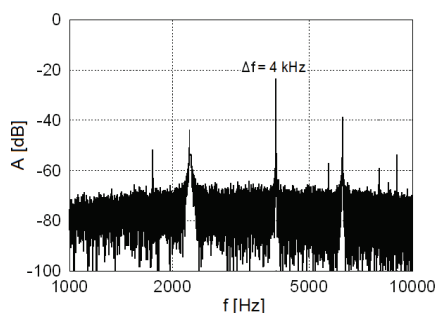
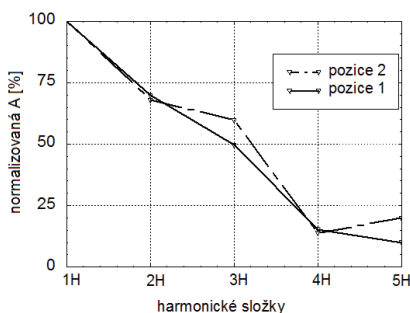
*Obr. 27 Železobetonový nosník s osazeným zatěžovacím rámem*

Měření nosníku probíhalo ve dvou fázích: před jeho zatěžováním a následně po jeho dynamickém zatěžování. Na obou stranách nosníku (pravé a levé) byla stanovena dvě místa (pozice) měření, vzájemně se lišící skladbou ocelové výztuže [15]. Schéma zobrazující místa měření (1;2) včetně konfigurací budičů B a snímače S na pravé straně nosníku je zobrazeno na obr. 28.

První pozice měření (1) byla stanovena ve vzdálenosti 309 cm od konce nosníku, druhá pozice měření (2) ve vzdálenosti 291 cm od konce nosníku. V první fázi byl aplikován harmonický ultrazvukový signál o frekvenci  $f = 29$  kHz, konfigurace budiče B a snímače S (obr. 28–vlevo). Prezentovány jsou výsledky měření na obou pozicích, které se vzájemně lišily skladbou ocelové výztuže (obr. 29).



**Obr. 28** Schéma konfigurací budiče B a snímače S na pravé části nosníku: vlevo – metoda s jedním budícím signálem (B); vpravo – metoda se dvěma budícími signály (B1, B2)



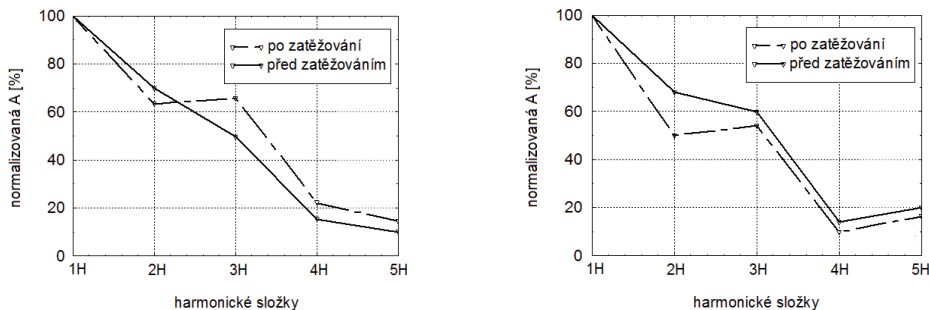
**Obr. 29** Frekvenční spektra přenosových charakteristik: vlevo – grafické porovnání normalizovaných hodnot amplitud harmonických frekvencí; vpravo – měření na pozici 2, kmitočty  $f_1 = 29$  kHz,  $f_2 = 25$  kHz

V grafu (obr. 29–vlevo) jsou porovnány relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci pro obě pozice měření. Z porovnání obou křivek je patrná vyšší kvalita struktury na první pozici měření (1). V tomto případě relativní hodnoty amplitud klesají postupně s rostoucím pořadím harmonických složek bez nelineárních efektů. Linearita poklesu amplitud harmonických frekvencí byla posuzována rovněž hodnotou druhé mocniny korelačního koeficientu  $r^2$ . Měření na první pozici odpovídala hodnota  $r^2 = 0,9728$ , měření na druhé pozici odpovídala hodnota nižší,  $r^2 = 0,9216$ . Rovněž tento hodnotící parametr poskytl informaci o kvalitnější struktuře v místě měření na první pozici. Ve druhé fázi byly aplikovány dva harmonické ultrazvukové signály o kmitočtech  $f_1 = 29$  kHz,  $f_2 = 25$  kHz (dle obr. 28 – vpravo). Frekvenční spektrum odpovídající měření na druhé pozici měření (P2) zobrazuje graf na obr. 29 – vpravo. Mezi parazitními složkami, přesahujícími hodnoty šumového pozadí, byla detekována rozdílová složka kmitočtů budících signálů  $\Delta f = 4$  kHz. V případě měření na první pozici (1) se tato rozdílová složka ve frekvenčním spektru nevyskytovala.

Následně byl nosník dynamicky zatěžován dopadem ocelových desek o hmotnosti 320 kg. Výsledky měření po odlehčení nosníku zobrazují grafy na obr. 30.

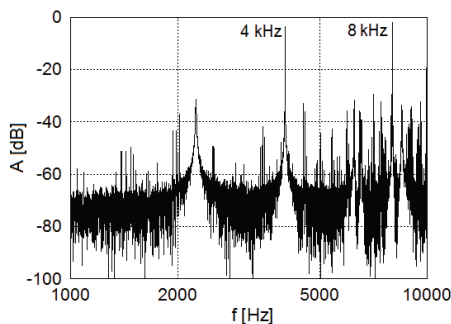
Graf uvedený vlevo (obr. 30) odpovídá měření na pozici snímače (1). V přenosové charakteristice po mechanickém zatěžování jsou patrné změny: amplituda třetí 3H harmonické dosahuje vyšší hodnoty a mírný pokles hodnoty vykazuje amplituda druhé 2H harmonické. Vypočtená hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu ( $r^2 = 0,9216$ ) pro tuto charakteristiku odpovídá poklesu o 5,3 % oproti přenosové charakteristice z měření před zatěžováním

( $r^2 = 0,9728$ ). Graf uvedený vpravo zobrazuje analogicky výsledky měření na druhé pozici (2). Na obou křivkách jsou opět patrné nelineární efekty. Přičemž silnější projev nelinearity vykazuje přenosová charakteristika po zatěžování. Rovněž druhá mocnina korelačního koeficientu poklesu přenosové charakteristiky dosahuje nižší hodnoty po zatěžování ( $r^2 = 0,8396$ ), která odpovídá poklesu o 4,7 % v porovnání s hodnotou vypočtenou z měření před zatěžováním ( $r^2 = 0,8807$ ), což opět informuje o zesíleném projevu nelinearity.



**Obr. 30** Grafické porovnání normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí před zatěžováním a po zatěžování nosníku: vlevo – první pozice měření (1); vpravo – druhá pozice měření (2)

Výsledky měření se dvěma budícími harmonickými signály zobrazuje graf na (obr.31).



**Obr. 31** Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na pozici (2)

Aplikovány byly kmitočty  $f_1 = 29$  kHz,  $f_2 = 25$  kHz. Na obou pozicích měření byly dosaženy téměř srovnatelné výsledky. Ve frekvenčních spektrech je patrný vyšší počet parazitních složek, které přesahují hodnoty šumového pozadí. Mezi nimi dominuje amplituda rozdílové složky budících kmitočtů na hodnotě  $\Delta f = 4$  kHz a srovnatelné hodnoty dosahuje i amplituda druhé harmonické rozdílové složky na hodnotě 8 kHz.

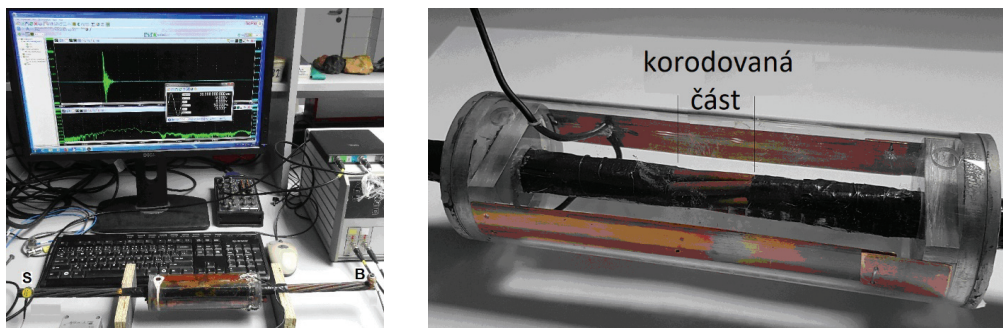
## 5.7 PŘEDPÍNACÍ OCELOVÁ LANA

Problematika koroze předpínacích lan je řešena v rámci CK01000108 „Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků“ (2020/2022). Experimenty jsou sestavovány a realizovány ve výzkumných laboratořích CDV, v. v. i. V první fázi návrhu a přípravy experimentů byla řešena simulace koroze výztuže v laboratorních podmínkách. Bylo

sestaveno zařízení pro realizaci elektrochemické koroze s možností regulace rychlosti korozního procesu.

### 5.7.1 Nepředpjaté ocelové lano

Předmětem prvního experimentu byl vzorek předpínacího ocelového lana, o průměru  $\Phi = 15,7$  mm a délce 610 mm, podrobené elektrochemické korozi. Lano sestávalo z centrálního přímého prutu obklopeného šesti vnějšími pruty. Korozní proces byl realizován v plexisklovém válci o průměru 16 mm a délce 160 mm, který byl opatřen dvěma víčky na obou stranách válce pro vstup a výstup lana. Korozi byla vystavena pouze střední část lana v délce 50 mm, zbývající část lana v korozním článku byla chráněna izolací (obr. 32) [42].

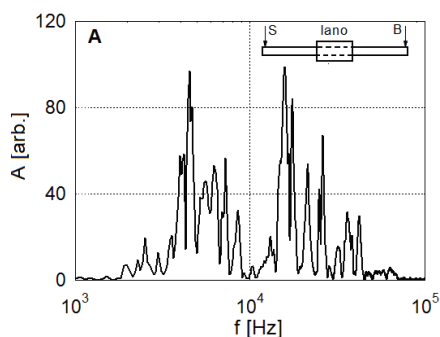


Obr. 32 Vlevo – uspořádání experimentu; vpravo – detail ocelového lana s osazeným korozním článkem

Proměřováno bylo lano osazené článkem naplněným korozním roztokem. Měření byla realizována ve čtyřech fázích: první měření před začátkem korozního procesu, následně ve třech čtrnáctidenních intervalech v průběhu působení korozního procesu. Při měření byl korozní proces přerušován. Použity byly nelineární ultrazvukové techniky, které zkoumají amplitudové závislosti rezonanční frekvence. V odezvě vzorků byly detailně vyšetřovány frekvenční posuny rezonančního maxima jednoho vlastního módu v závislosti na změnách amplitudy buzení (odstavec 3.1, obr. 6).

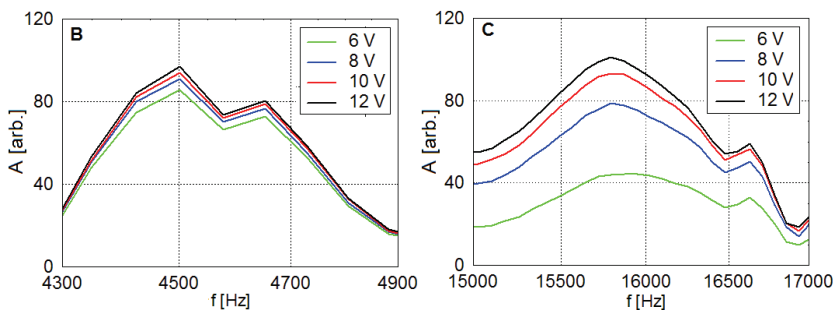
Budící signál byl realizován elektrickým harmonickým sinusovým signálem, odezva lana byla snímána piezoelektrickým snímačem. Pro monitorování posunu vrcholů rezonančních maxim, v závislosti na amplitudě buzení, byl aplikován budící signál se čtyřmi napěťovými hodnotami (12 V, 10 V, 8 V, 6 V) v každé fázi měření. Výsledkem měření byla frekvenční spektra odezvy lana na elektrický impuls. Obr. 33 odpovídá prvním výsledkům měření před zahájením korozního procesu, pro hodnotu budícího napětí 12 V. Dominantní frekvence se vyskytují ve dvou frekvenčních rozsazích, jak je patrné z uvedeného grafu A.





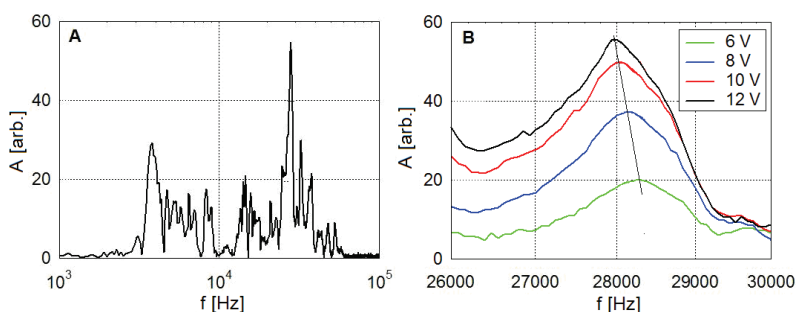
**Obr. 33** Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření před zahájením korozního procesu – celý frekvenční rozsah

Graf na obr. 34 zobrazuje detaily vrcholů frekvenčních maxim. První dominantní frekvence se nachází na stejné hodnotě 4 500 Hz pro všechny čtyři hodnoty budícího napětí, jak je patrné z grafu B. Druhá dominantní frekvence (graf C) na hodnotě 15 700 Hz je opět shodná pro všechny hodnoty budícího napětí.



**Obr. 34** Detail vrcholů dominantních frekvencí pro čtyři hodnoty budícího napětí

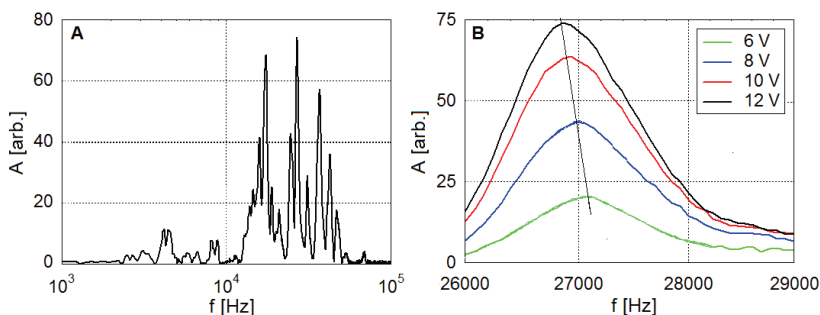
Výsledky měření lana, po čtrnácti dnech působení korozního procesu zobrazuje obr. 35.



**Obr. 35** Frekvenční spektrum odezvy lana po čtrnácti dnech působení zrychlené koroze: A – celý frekvenční rozsah, B – detail vrcholů frekvenčních maxim

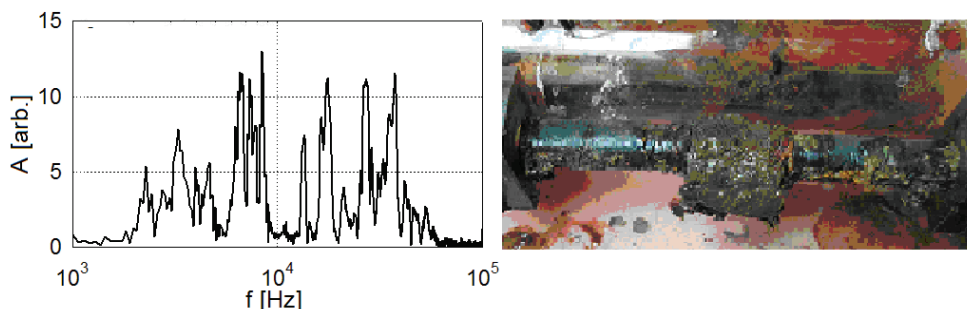
Z grafu A je patrné, že dominantní frekvence se vyskytuje pouze ve druhém frekvenčním rozsahu. Při nejvyšší hodnotě budícího napětí 12 V se vrchol maxima nachází na hodnotě 27 900 Hz. Tyto hodnoty se s klesající hodnotou budícího napětí postupně posouvají k vyšším frekvencím. Při nejnižší hodnotě budícího napětí 6 V se vrchol maxima nachází na hodnotě 28 300 Hz, což odpovídá posunu o 400 Hz v porovnání s hodnotou při nejvyšším budícím napětí 12 V.

Na obr. 36 jsou analogicky porovnány výsledky měření po dvaceti osmi dnech působení korozního procesu. Dominantní frekvence se opět vyskytuje pouze ve druhém frekvenčním rozsahu (graf A). Vrchol dominantní frekvence při budícím napětí 12 V se nachází na hodnotě 26 800 Hz, opět dochází k nárůstu hodnot s klesající hodnotou budícího napětí. Při napětí 6 V se vrchol dominantní frekvence nachází na hodnotě 27 100 Hz, což odpovídá frekvenčnímu posunu 300 Hz (graf B).



*Obr. 36 Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po dvaceti osmi dnech působení zrychlené koroze: A – celý frekvenční rozsah, B – detail vrcholů frekvenčních maxim*

Následující obr. 37 odpovídá měření po čtyřiceti dvou dnech působení korozního procesu. Z frekvenčního spektra uvedeného vlevo je patrné, že z důvodu vysokého útlumu přenosu signálu v důsledku korozního procesu, se amplitudy frekvencí nacházejí na úrovni šumového pozadí. Následně byla provedena vizuální prohlídka korozního poškození lana (obr. 37 – vpravo). Část lana, která byla v délce 50 mm vystavena korozi, byla pokryta vrstvou rzi a korozních zplodin. Po odstranění zkorodované vrstvy bylo zjištěno šest zcela zkorodovaných vnějších prutů, oslabený a přetržený přímý centrální drát.

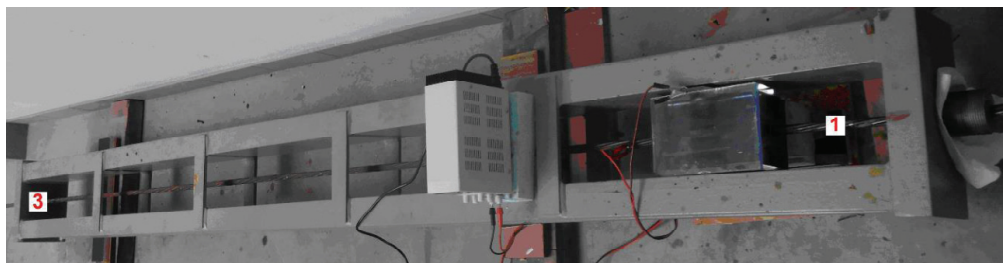


*Obr. 37 Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po čtyřiceti dvou dnech působení zrychlené koroze – vlevo; fotografie lana po vyjmutí z korozního článku – vpravo*



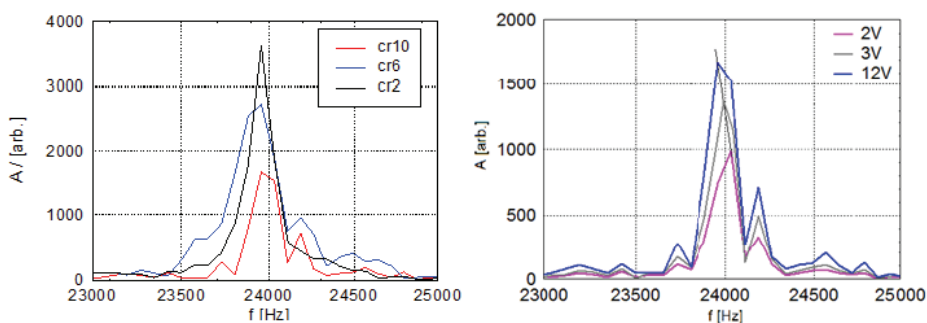
## 5.7.2 Předpjaté ocelové lano

Pro účely provádění zkoušek na samotných laněch a možnosti provádět zkoušky pro různé úrovně předpětí lan při různých stupních jejich nakorodování byl navržen a zhotoven vyztužený předpínací rám o délce 3,1 m, výztuhami rozdělen na pět sekcí (obr. 38). Korozní válec byl nahrazen boxem s odnímatelným horním víkem pro možnost vizuální kontroly lana a optimalizaci průběhu korozního procesu. Navrženy a zhotoveny byly prototypy vlnovodů pro přenos budícího signálu do testovaného objektu a pro záznam signálu jeho odezvy.



Obr. 38 Předpínací rám s předpjatým lanem osazeným korozním boxem a označením pozic měření (1,3)

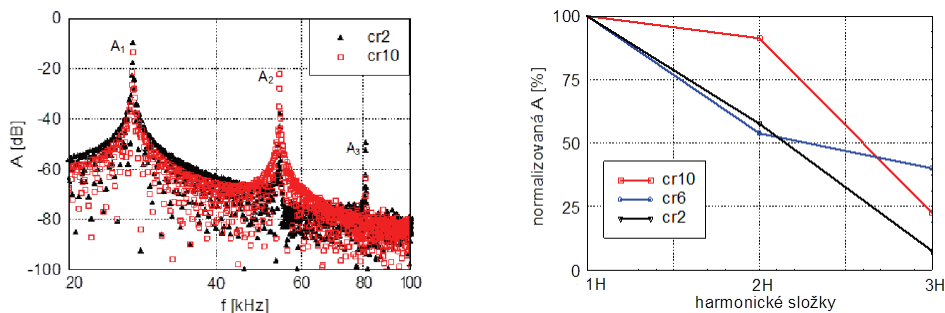
Při monitorování důsledků postupující koroze byly aplikovány obě varianty metody buzení, s jedním a se dvěma budícími signály [43]. Prezentovány jsou výsledky ze tří měření v průběhu působení korozního procesu. Důsledky působení korozního procesu při buzení jedním ultrazvukovým signálem prezentuje obr. 39. V grafech jsou porovnána frekvenční spektra ze tří fází korozního procesu: cr2 odpovídá měření po 48 h působení koroze, cr6 odpovídá měření po 408 h působení koroze a cr10 po 593 h působení koroze. V grafu na obr. 39 – vlevo je patrný postupný útlum signálu odezvy s postupující délkou koroze a od šestého měření byla na křivkách, kromě dominantní frekvence 23 955 Hz, zvýrazněna také frekvenční složka 24 185 Hz. Jako další hodnotící parametr byl vyhodnocován posun dominantní frekvence v závislosti na intenzitě budícího signálu. Ukázka posunu maxim frekvenčních vrcholů (pro cr10) je uvedena na obr. 39 – vpravo.



Obr. 39 Frekvenční spektra odezvy lana L5 ze tří měření: vlevo – při konstantní hodnotě budícího napětí; vpravo – při budícím napětí o hodnotách 2 V, 3 V a 12 V

Křivka odpovídající v pořadí desátému měření lana (po 593 h) vykazuje posun dominantní frekvence ( $\Delta f = 80$  Hz) z hodnoty 24 035 Hz (při budícím napětí 2 V) na hodnotu 23 955 Hz (při budícím napětí 12 V). V této fázi byly v důsledku koroze přetrženy tři vnější pruty lana.

Aplikován byl současně kontinuální budící signál o frekvenci 27 kHz (obr. 40). Z frekvenčních spekter odezvy lana byl vyhodnocován korelační koeficient  $r^2$  pro posouzení linearity poklesu vyšších harmonických v jednotlivých fázích korozního procesu. Na obr. 40 – vlevo jsou pro ilustraci zobrazena frekvenční spektra z druhého a posledního měření (cr2 a cr10). Grafické vyjádření normalizovaných amplitud ze tří měření (cr2, cr6 a cr10) je pro ilustraci uvedeno na obr. 40 – vpravo. Z grafu je patrná změna průběhu vyšších harmonických v závislosti na fázi korozního procesu, jak informuje i hodnota korelačního koeficientu  $r^2$  – Tab. 4.

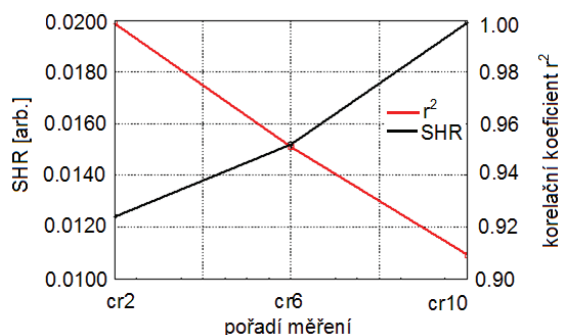


**Obr. 40** Odezva lana L5B1kS3 na kontinuální budící signál: vlevo – frekvenční spektra odezvy z druhého cr2 a desátého cr10 měření; vpravo – normalizované hodnoty vyšších harmonických ze tří prezentovaných měření

Jako další parametr charakterizující poškození byl použit „second harmonic ratio“ (SHR), vztah mezi první  $A_1$  a druhou harmonickou amplitudou  $A_2$ . Hodnota podílu  $A_2 / A_1^2$  charakterizuje nelinearitu struktury testovaného objektu, narůstá s růstem poruch (trhlin) ve struktuře testovaného objektu [35]. V Tab. 4 je uveden přehled numerických hodnot sledovaných parametrů ze tří fází korozního procesu (cr2, cr6 a cr10), jejich grafické vyjádření je zobrazeno na obr. 41. Hodnoty parametru SHR vykazují nárůst s délkou působení koroze a hodnoty druhé mocniny koeficientu  $r^2$  s postupující korozi vykazují pokles. Oba hodnotící parametry shodně informují o postupujícím poškození struktury lana v důsledku korozního procesu.

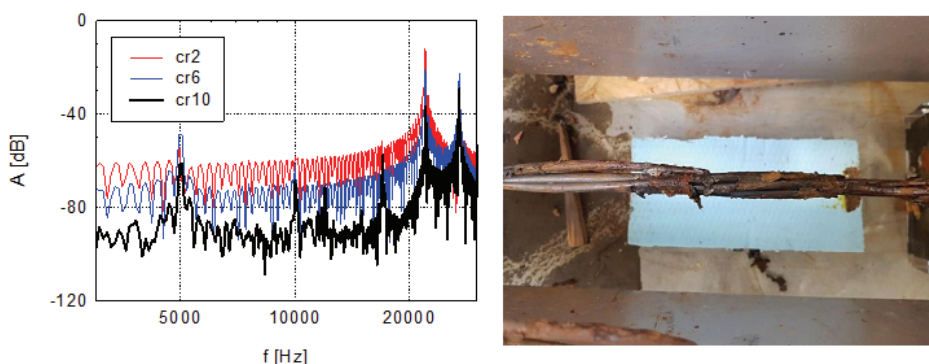
Měření – doba koroze	$A_1$ [dB]	$A_2$ [dB]	$A_3$ [dB]	$A_2 / A_1^2$ SHR	$f_2 / f_1$	$f_3 / f_1$	$r^2$
cr2 – 48 h	50,7	32,0	26,7	0,0124	63,1 %	52,6 %	0,9986
cr6 – 408 h	43,7	29,0	11,4	0,0152	66,4 %	26,1 %	0,9520
cr10 – 593 h	47,1	44,2	18,0	0,0199	93,8 %	38,2 %	0,9082

**Tab. 4** Hodnoty amplitud harmonických frekvencí ( $A$ ), jejich relativních hodnot vzhledem k první harmonické, parametru SHR a druhé mocniny korelačního koeficientu ( $r^2$ )



**Obr. 41** Grafické zobrazení závislosti parametru SHR a korelačního koeficientu  $r^2$  na postupující korozi

Jako další byla aplikována metoda se dvěma budícími signály s blízkými hodnotami kmitočtů (odstavec 3.1, obr. 8b). Lana byla buzena současně dvěma budiči (HTP02 – B a HTP03 – A) umístěnými na pozici 1 a 3 (dle obr. 38). Snímač pro detekci rozdílové složky byl umístěn ve střední části lana. Realizováno bylo buzení s několika variantami dvojice kmitočtů pro jednotlivé fáze korozního procesu. Detekované hodnoty amplitud rozdílových složek se zvyšovaly s rostoucím porušením struktury lana v závislosti na době působení korozního procesu. Prezentovány jsou výsledky měření při aplikaci dvojice budících kmitočtů  $f_1 = 22 \text{ kHz}$ ,  $f_2 = 27 \text{ kHz}$  (obr. 42). Z grafu je patrné, že v případě měření cr2 (po 48 h působení koroze) amplituda rozdílové frekvenční složky  $\Delta f = 5 \text{ kHz}$  jen mírně převyšuje úroveň šumového pozadí (převýšení  $\sim 5 \text{ dB}$ ). V případě měření cr6 (po 408 h) je hodnota amplitudy  $\Delta f = 5 \text{ kHz}$  výraznější (převýšení  $\sim 18 \text{ dB}$ ) a zvýrazněna je také amplituda na frekvenci 10 kHz – její druhé harmonické (převýšení  $\sim 10 \text{ dB}$ ). Ještě výrazněji se amplitudy rozdílových složek uplatňují ve frekvenčním spektru odpovídajícím měření cr10 (po 593 h působením koroze). Amplituda rozdílové složky 5 kHz se nachází  $\sim 25 \text{ dB}$  nad šumovým pozadím a převýšení její druhé harmonické činí  $\sim 18 \text{ dB}$ . Ve spektru jsou také zvýrazněny amplitudy neharmonických frekvenčních složek na hodnotách 12 kHz a 17 kHz. Z grafu je rovněž patrný útlum signálu s rostoucím poškozením lana. Stav lana po 593 h působení zrychleného korozního procesu je dokumentován na obr. 42–vpravo. V důsledku působení koroze došlo k přetržení tří vnějších prutů.



**Obr. 42** Vlevo – frekvenční spektra přenosových charakteristik lana L5 z měření se dvěma budícími kmitočty ( $f_1 = 22 \text{ kHz}$ ,  $f_2 = 27 \text{ kHz}$ ); vpravo – stav předpjatého lana L5 po 593 h působení korozního procesu

## 6 ZÁVĚR

Habilitační práce přináší poznatky ze studia nelineárních ultrazvukových metod z hlediska možnosti jejich využití k detekci trhlin – defektů ve stavebních konstrukcích. Analýza výsledků měření různě poškozených vzorků potvrdila korelaci nelineárních efektů v přenosových charakteristikách degradovaných vzorků s defekty ve struktuře materiálu.

**Obkladové prvky z druhotných surovin:** Testovány byly intaktní vzorky a vzorek s viditelnou trhlinou při dvou konfiguracích budiče a snímače. V přenosových charakteristikách se poškozená struktura vzorku projevovala výrazným nárůstem amplitud lichých harmonických frekvencí. V případě umístění snímače v blízkosti trhliny byla patrná anomálie – amplituda druhé harmonické frekvence dosáhla vyšší hodnoty než amplituda první harmonické (budící) frekvence. Výsledky měření intaktních vzorků prokázaly, že v případě nelineární ultrazvukové spektroskopie je vliv nehomogenity keramického materiálu na bázi popílkovitého střeptu minimální – jeho nelineární projev byl podstatně nižší než u běžných defektů.

**Stropní desky Hurdis:** Poškozená struktura stropních desek produkovala nelineární efekty při přenosu signálu. Při aplikaci metody s jedním budícím signálem byla ve frekvenčním spektru zvýrazněna amplituda třetí harmonické oproti druhé harmonické. Na přenosových křivkách byl patrný vyšší útlum signálu – absolutní hodnoty amplitud dosahovaly nižších hodnot, ve srovnání s nepoškozenou stropní deskou. Při použití metody se dvěma budícími signály byla v případě desek s porušenou strukturou ve frekvenčních spektrech detekována výrazná amplituda na první rozdílové složce dvou budících kmitočtů.

**Sendviče zhotovené z proměřených stropních desek:** Realizované experimenty potvrdily vznik trhlin ve stropních deskách, již po sedmi dnech po nadbetonování vrstvy (potěru), způsobené zřejmě v důsledku objemových změn vlivem smršťování betonové mazaniny. V případě sendvičů s malou přilnavostí stropní desky z betonovou vrstvou byla umožněna samostatná dilatace jak desky, tak i betonu a nedošlo ke vzniku trhlin ve stropních deskách. Kombinací nelineární ultrazvukové spektroskopie se stávajícími metodami lze dosáhnout zvýšení výtěžnosti a spolehlivosti dosavadních metod pro problematické stropní konstrukce s deskami Hurdis.

**Kamenné bloky vyjmuté z lícního zdiva Karlova mostu:** Testována byla integrita struktury kamenných bloků vzájemně se lišících rozměry i původem materiálu. Při analýze výsledků měření metodou s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem byl u vzorků s porušenou integritou struktury pozorován nárůst hodnoty amplitudy třetí harmonické se současným poklesem amplitudy druhé harmonické frekvence. Ve frekvenčních spektrech přenosových charakteristik získaných při měření se dvěma budícími signály byl indikátorem nelinearity a strukturního poškození vznik rozdílových složek dvou budících kmitočtů. Korelace nelineárních efektů s integritou struktury byla paralelně ověřována metodou impakt-echo. Opakovaným monitorováním v časových intervalech s následným vyhodnocováním změn vybraných parametrů lze získat informace o aktuálním stavu sledované stavby a přispět tak ke zkvalitnění péče o stavební památky.

**Vzorky z jemné betonové směsi:** První fáze měření byla zaměřena na testování kvality vnitřní struktury vzorků v závislosti na různých podmínkách zrání betonu. Vlivem nestandardních podmínek (nedostatek vlhkosti) v procesu zrání betonu došlo ke vzniku mikrotrhlin v celém objemu vnitřní struktury vzorků. V případě těchto vzorků se ve frekvenčních spektrech přenosových křivek projevovaly nelineární efekty potlačením sudých harmonických, zejména druhé harmonické a zvýrazněním třetí harmonické. Hodnotící parametry verifikačních měření potvrdily korelaci mezi výskytem nelineárních efektů a vznikem nespojitostí – mikrotrhlin ve struktuře vzorků.

Ve druhé fázi experimentu byly sledovány důsledky teplotního namáhání (aplikace zmrazovacích cyklů) na různou kvalitu struktury vzorků. V případě vzorků uložených po dobu

zrání betonu ve vodě, nebyly po teplotním namáhání pozorovány změny hodnotících parametrů. Přenosové charakteristiky před teplotní degradací i po degradaci vykazovaly lineární pokles bez výskytu nelineárních efektů. Rovněž výsledky měření verifikačními metodami prokázaly, že nedošlo v případě těchto vzorků k poškození celistvosti struktury v důsledku aplikace zmrazovacích cyklů. V případě obou skupin vzorků zrajících za nestandardních podmínek vykazovaly přenosové charakteristiky vyšší linearitu oproti přenosovým charakteristikám před teplotní degradací. Rovněž změna hodnot verifikačních parametrů vykazovala stejný trend – zlepšení integrity struktury vzorků zrajících v nestandardních podmínkách. V průběhu zmrazovacích cyklů byly vzorky máčeny vodou což zřejmě umožnilo dodatečnou hydrataci cementových zrn (použit byl směsný cement).

**Železobetonový nosník:** Testován byl nosník KA o rozměrech 0,5 m × 0,6 m × 11,5 m vyjmutý z mostní konstrukce při rekonstrukci mostu. Měření bylo realizováno před zatěžováním nosníku a po dynamickém zatěžování nosníku. Prezentovány byly výsledky ze dvou pozic měření vzájemně se lišících skladbou ocelové výztuže. Výsledky měření metodou s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem v případě porušené struktury vykazovaly zvýšené hodnoty amplitud lichých harmonických a poklesem hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu. Ve frekvenčních spektrech získaných při měření se dvěma budícími signály byl indikátorem nelinearity a strukturního poškození vznik rozdílových složek dvou budících kmitočtů. Uvedené projevy nelinearity byly pozorovány při měření před dynamickým zatěžováním nosníku na druhé pozici měření a po realizaci zatížení na obou pozicích měření.

**Předpínací ocelová lana:** Korozní proces byl v laboratorních podmínkách simulován zrychlenou elektrochemickou korozi. První experimenty byly realizovány na nepředpjatém ocelovém laně, proměřováno bylo po jednotlivých fázích působení korozního procesu. Aplikovány byly lineární a nelineární ultrazvukové metody. V případě nelineárních měření byl zkoumán posun rezonanční frekvence v závislosti na hodnotě budící amplitudy/budícího napětí. Narůstající poškození lana vedlo k posunu dominantních frekvencí v závislosti na intenzitě budící amplitudy. Proces zrychlené koroze byl ukončen, když se hodnoty amplitud dominantních frekvencí nacházely na úrovni šumového pozadí (poslední měření po čtyřiceti dvou dnech působení koroze). Vizualní kontrola ukázala úplné zkorodování všech šesti vnějších prutů a přetržení centrálního prutu. Aplikace nelineární ultrazvukové metody prokázala, že nárůst nelinearity je citlivějším indikátorem kumulativního mikro-poškození uvnitř materiálu v důsledku korozního napadení ve srovnání s použitými lineárními charakteristikami.

Předpjaté ocelové lano bylo testováno ve speciálně zhotoveném předpínacím rámu. Po předpětí byl na lano nainstalován korozní box s odnímatelným víkem pro možnost vizuální kontroly lana za účelem optimalizace elektrochemického korozního procesu. Součástí měření bylo odzkoušení prototypů vlnovodů pro přenos budícího signálu do testovaného objektu a záznam signálu jeho odezvy. Měření byla realizována v deseti fázích působení korozního procesu. Hodnotícím parametrem v případě pulsního buzení byl posun dominantní frekvence v závislosti na intenzitě budícího signálu. V případě kontinuálního budícího signálu byly vyhodnocovány: parametr SHR, korelační koeficient  $r^2$  pro posouzení linearitu poklesu vyšších harmonických a rozdílové složky kmitočtů při buzení dvěma kmitočty. Hodnoty všech parametrů vykazovaly nárůst nelineárních efektů s rostoucím poškozením struktury v důsledku postupující koroze.

Získané poznatky jsou aktuálně využívány při řešení projektu Technologické agentury ČR „Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků“. Výzkum je zaměřen na experimentální studium kombinace nelineární ultrazvukové spektroskopie a magnetické paměti kovových materiálů z hlediska možnosti vyhodnocení stavu zabudované výztuže po celé její délce.

## 7 REFERENCE

- [1] ALESHIN, V.; VAN DEN ABEELE, K. Microcontact-based theory for acoustics in microdamaged materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55, p. 366–390.
- [2] CHEN, J.; ZHANG, D.; MAO, Y.; CHEN, Q. Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface. *Ultrasonics*, 2006, 44, p. e1355–e1358.
- [3] GUYER, R. A.; JOHNSON, P. A. Nonlinear Mesoscopic Elasticity: The Complex Behaviour of Rocks, Soil.
- [4] HÁJEK, K.; HEFNER, Š. Possibility of the Use of a Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy for the Ultrasonic NDT in Civil Engineering. In: *Proceedings of Workshop NDT CMC 2003*, VUT Brno, 2003, p. 29–35.
- [5] HEDBERG, C. M. Nonlinear Acoustic Methods of Non-Destructive Testing. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics, Section 3 – Nonlinearity of Media and Structures, Nonlinear Testing*, Moscow, 19–23 August 2002.
- [6] JOHNSON, P. A.; OSTROVSKY, L. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *Rivista del Nuovo Cimento*, 2001, 24, p. 1–46.
- [7] KAZAKOV, V.; SUTIN, A. M.; JOHNSON, P. A. Crack Location Method Based on Modulation of an Ultrasonic Pulse by CW Vibration. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials*, Leuven (B), 2001, p. 18–22.
- [8] KERSCHEN, G.; WORDEN, K.; VAKAKIS, A. E.; GOLINVAL, C. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20, p. 505–592.
- [9] KIM, J. Y.; BALTAZAR, A.; ROHKLIN, S. I. Ultrasonic assessment of rough surface contact between solids from elastoplastic loading-unloading hysteresis cycle. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52, p. 1911–1934.
- [10] KIM, J. Y.; BALTAZAR, A.; HU, J. W.; ROHKLIN, S. I. Hysteretic linear and nonlinear acoustic responses from pressed interfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43, p. 6436–6452.
- [11] KOŘENSKÁ, M.; PAZDERA, L.; SMUTNÝ, J.; KOŘENSKÁ(MANYCHOVÁ), Mo. Detekce trhlin ve stropních deskách Hurdis pomocí analýzy odezvy na budící impuls. *NDT Welding Bulletin*, 2002, 12, p. 31–34.
- [12] KORENSKA, M.; MANYCHOVA, M. Non-destructive Testing Methods for Concrete Structures Inspection. In: *Proceedings of International Workshop Physical and Material Engineering 2006*, Slovak University of Technology in Bratislava, 2006, p. 66–69.
- [13] KORENSKA, M.; MANYCHOVA, M. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Used to Detection of Ceramic Structure Damage. In: *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics, Nonlinear Acoustics-Fundamentals and Application*, 1. USA, American Institute of Physics, 2008, p. 541–544.
- [14] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M. New Possibilities of Non-destructive Testing of Ceramic Specimen Integrity. *Ceramics-Silikáty*, 2010, 54, p. 72–77.
- [15] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M.; PAZDERA, L.; POSPÍŠIL, K. Monitoring of the Damage Evolution in Reinforced Concrete Girder by Means of Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy. *Transactions on Transport Science*, 2012, 5/4, p. 195–204.
- [16] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M.; PAZDERA, L. Experimental Study of the Nonlinear Effects Generated in a Concrete Structure with Damaged Integrity. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 2013, 49, p 530–537.
- [17] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M.; PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L. Monitoring of the damage in stone blocks by means of non-destructive methods. *Key Engineering Materials*, 2014, 592-593, p. 545–548.

- [18] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M.; PAZDERA, L.; POSPÍŠIL, K. Structural Integrity of Stone Blocks from Charles Bridge in Prague. *International Journal of Architectural Heritage*, 2016, 10/1, p. 1–8.
- [19] KORSHAK, B. A.; SOLODOV, I. Y.; BALLAD, E. M. DC effects, subharmonics, stochasticity and “memory” for contact acoustic non-linearity. *Ultrasonics*, 2002, 40, p. 707–713.
- [20] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Theory of elasticity. *The 2<sup>nd</sup> edition*, Pergamon Press, New York, 1970, 165 p.
- [21] MACECEK, M. Ultrasonic Concrete Testing. In: *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> International Conference Defektoskopie 2003*, Ostrava, 2003, p. 117–132.
- [22] MANYCHOVA, M. Aplikace akustické emise ve stavebnictví. *Disertační práce*, Brno: FAST VUT, 2004, 102 s.
- [23] MANYCHOVÁ, M. Možnosti využití nelineární ultrazvukové spektroskopie pro defektoskopii stavebních materiálů. In: *Sborník příspěvků z konference Konstrukce a progresivní materiály s využitím druhotných surovin 2006*, Brno, 2006, p. 48–53.
- [24] MANYCHOVA, M. Non-linear Ultrasonic Spectroscopy Method-Experiment Set up Testing. In: *Proceedings of International Workshop Physical and Material Engineering 2006*, Slovak University of Technology in Bratislava, 2006, p. 109–112.
- [25] MANYCHOVÁ, M. Využití rezonanční inspekce ve stavebnictví. In: *Sborník z konference Podlahy, stropy a pohledy 2006*, VUT v Brně, 2006, p. 59–63.
- [26] MANYCHOVÁ, M. Measuring Setup for the Non-linear Ultrasonic Spectroscopy Method. In: *Proceedings of the 37<sup>th</sup> International Conference Defektoskopie 2007*, Praha, 2007, p. 147–152. *NDT.net*, 2008, 13/3.
- [27] MANYCHOVÁ, M. Test of Cladding Elements Using a Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Metod. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Workshop NDT 2007, Non-destructive Testing in Engineering Practice*, Brno, 2007, p. 76–81.
- [28] MANYCHOVÁ, M. Study of Ceramic Structure Integrity by Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. In: *Proceedings of International Workshop Physical and Material Engineering 2008*, Praha, 2008, p. 74–79.
- [29] MANYCHOVÁ, M.; MATYSÍK, M.; KOŘENSKÁ, M.; HÁJEK, K. Theory of nonlinear acoustic spectroscopy from the point of view its utilization in civil engineering. In: *Proceedings of International Workshop, Research Activities of Physics Department of Civil Engineering Faculties in the Czech and Slovak Republics*, ČUVT Praha, 2005, p. 85–89.
- [30] MANYCHOVA, M. On the diagnosis of Hurdis ceiling slabs using non-linear ultrasonic spectroscopy methods. In: *Proceedings of the 38<sup>th</sup> International Conference Defektoskopie 2008*, Brno, 2008, p. 131–136. *NDT.net*, 2009, 14/3.
- [31] MANYCHOVA, M. Application of NDT Methods on Ceiling Slabs - Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. In: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Scientific Conference, Brno, Building Structures and Architecture*, Brno, 2009, p. 95–98.
- [32] MANYCHOVÁ, M. Nondestructive integrity testing of sandwiches made of Hurdis ceiling slabs. In: *Proceedings of the 40<sup>th</sup> International Conference Defektoskopie 2010 and NDE for Safety*, Plzeň, 2010, p. 167–174. *NDT.net*, 2011, 16/5.
- [33] NAZAROV, V. E.; RADOSTIN, A. V.; OSTROVSKY, L. A.; SOUSTOVA, I. A. Wave processes in Media with Hysteretic Nonlinearity, Part I. *Acoustical Physics*, 2003, 49, p. 344–353.
- [34] OBRAZ, J. Zkoušení materiálu ultrazvukem. SNTL Praha, 1989.
- [35] ONPENG, J. M. C.; ORETA, A.W.C.; HIROSE, S.: Characterization of Damage Using Ultrasonic Testing on Different Types of Concrete. *Materials Evaluation*, 2018, 10, p.1532-1541.

- [36] PŘEVOROVSKÝ, Z. Non-linear Acoustic Spectroscopy and New Methods of Flaw Detection. In: *Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2001*, Praha, 2001, p. 11–16.
- [37] SEOK, J. B.; HWAN, O.B. Effects of non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures. *Cement Concrete Research*, 2010, 40, p. 1441–1450.
- [38] SHUIA, G.; KIM, J. Y.; QU, J.; WANG, Y. S.; JACOBS, L. J. A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves. *NDT&E International*, 2008, 41, p. 326–329.
- [39] SOLODOV, I. Y. Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications. *Ultrasonics*, 1998, 36, p. 383–390.
- [40] SOLODOV, I. Y.; KROHN, N.; BUSSE, G. CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*, 2002, 40, p. 621–625.
- [41] STOBBE, D. M. Acoustoelasticity in 7075-T651 aluminium and dependence of the order elastic constants on fatigue damage. *A Thesis*, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, August 2005, 91p.
- [42] STRYK, J.; POSPISIL, K.; KORENSKA, M.; FRYBORT, A.; MANYCHOVA, M.: An Initial Investigation on the Potential Applicability of Ultrasonic Testing to Assess Effects of Corrosion on Linear and Nonlinear Elastic Behaviour of Pre-stressing Steel Strands. In: *Proceedings of X<sup>th</sup> Workshop “NDT in Progress” International Meeting of NDT Experts*, Prague, 2019, p. 75-84.
- [43] STRYK, J.: Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků. Nepublikovaná průběžná zpráva za rok 2020. Brno: CDV, 2021, 45 s.
- [44] VAN DEN ABEELE, K.; CARMELIET, J.; TenCATE; JOHNSON, J. P. Single Mode Nonlinear Resonant Acoustic Spectroscopy (SIMONRAS) for Damage Detection in Quasi-brittle Materials. In: *Proceedings of the first Conference in Emerging Technologies in NDT*, KU Leuven, 2000, p. 145–152.
- [45] VAN DEN ABEELE, K.; DE VISCHER, J. Damage Assessment in Reinforced Concrete Using Spectral and Temporal Nonlinear Vibration Techniques. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30, p. 1453–1464.
- [46] VAN DEN ABEELE, K.; JOHNSON, P. A.; SUTIN, A. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave modulation Spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12, p. 12–30.
- [47] VAN DEN ABEELE, K.; CARMELIET, J.; TEN CATE, J. A.; JOHNSON, P. A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12, p. 31–42.
- [48] YAN, D.; DRINKWATER, B. W.; NEILD, S. A. Measurement of the ultrasonic nonlinearity of kissing bonds in adhesive joints. *NDT&E International*, 2009, 42, p. 459–466.
- [49] ZHANG, H. W.; ZHANG, L.; GAO, Q. An efficient computational method for mechanical analysis of bimodular structures based on parametric variational principle. *Computers and Structures*, 2011, 89, p. 2352–2360.



## ABSTRAKT

Zkrácená verze habilitační práce ukazuje možnosti využití nedestruktivního testování pro lokalizaci strukturálních poruch (defektů) ve stavebních konstrukcích. Identifikace vadného dílu v konstrukci umožní jeho včasnou výměnu/opravu, čímž se prodlouží životnost konstrukce, případně se předejde havárii. V tomto směru zaznamenaly v posledních letech prudký vzrůst nedestruktivní metody využívající nelineární spektroskopii elastických vln (NEWS – Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy). Vychází především z poznatku, že nelinearita způsobená přítomností defektu je extrémně citlivý ukazatel poškození struktury. Tyto nové nedestruktivní metody se jeví jako perspektivní pro široké spektrum materiálů i s relativně velkou nehomogenitou, pro velké rozpětí rozměrů (od mikročipů až po stavební konstrukce).

Teze habilitační práce předkládá výsledky dosažené ve studiu a výzkumu nelineární ultrazvukové spektroskopie z hlediska možnosti jejího využití pro diagnostiku struktury stavebních konstrukcí. Soustředí se na základní modely uplatňované v metodách nelineárního ultrazvukového testování, rozbor metod NEWS a výsledky experimentálního studia. V práci jsou testovány vzorky a prvky z běžně používaných stavebních materiálů. Výsledky měření prokazují úzkou korelaci nelineárních efektů v přenosových charakteristikách poškozených objektů se strukturálními defekty. Závěry o přítomnosti defektů typu trhlin a nespojitosti jsou podepřeny porovnáním statistických výsledků laboratorních testů intaktních a poškozených vzorků a rovněž konkurenčními metodami.

## ABSTRACT

The habilitation thesis (shortened version) shows possibilities of the use of non-destructive testing for locating defects in building structures. Identification of a defective part in the structure provides for a timely repair/replacement of the defective part, thus improving the lifetime of the structure or avoiding a breakdown. In this respect, a sharp increase in the use of non-destructive methods employing the nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) has been recently recorded. They are based primarily on the recognition that nonlinearity caused by the presence of a defect makes an extraordinarily sensitive indicator of structural damage. These new non-destructive methods appear to be promising for application to a wide range of materials featuring relatively large non-homogeneities, and for a broad range of dimensions (from micro-chips to building structures).

The habilitation thesis presents the results obtained in the study and the research of nonlinear ultrasonic spectroscopy in terms of their possible usage for damage monitoring of building structures. It focuses on basic models which are applied in nonlinear ultrasonic testing methods, specification of NEWS methods and experimental study results. In the study, the most common building materials were tested. The measurement results prove a correlation of nonlinear effects in transmission characteristics with structural integrity defects in damaged objects. The presence of defects in forms of cracks and discontinuities is supported by comparing the intact and damaged specimen statistical results and also by competitive methods.