



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÁ SPEKTROSKOPIE
STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ**

MONITORING OF BUILDING STRUCTURES BY NONLINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MONIKA MANYCHOVÁ, Ph.D.

BRNO 2021

Abstrakt

Habilitační práce ukazuje možnosti využití nedestruktivního testování pro lokalizaci strukturních 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).

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 strukturními defekty. Závěry o přítomnosti defektů typu trhlin a nespojitostí jsou podepřeny porovnáním statistických výsledků laboratorních testů intaktních a poškozených vzorků a rovněž konkurenčními metodami.

Klíčová slova:

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

Abstract:

The habilitation thesis 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.

Key words:

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

BIBLIOGRAFICKÁ citace VŠKP

MANYCHOVÁ, Monika. *Nelineární ultrazvuková spektroskopie stavebních konstrukcí*. Brno, 2021. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství.

© **Monika Manychová, 2021**

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Veveří 331/95, 602 00 Brno

Poděkování:

Na tomto místě bych ráda poděkovala kolegům z Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně, kteří mě podporovali v sepsání habilitační práce. Děkuji kolegům z Ústavu fyziky a Centra dopravního výzkumu, v.v.i. za spolupráci při přípravě a realizaci laboratorních experimentů.

OBSAH

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ÚVOD..... | 10 |
| 2 | NELINEÁRNÍ MATERIÁLOVÉ MODELÝ | 12 |
| 2.1 | Klasická nelineární elasticita | 12 |
| 2.2 | Neklasická nelineární elasticita | 16 |
| 2.2.1 | Bimodulární model..... | 17 |
| 2.2.2 | Hysterezní model..... | 21 |
| 3 | NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN | 26 |
| 3.1 | Nelineární spektroskopické metody | 27 |
| 3.2 | Výhody a omezení metod ve stavebnictví..... | 31 |
| 3.2.1 | Výhody | 31 |
| 3.2.2 | Nevýhody a omezení | 32 |
| 3.3 | Shrnutí | 34 |
| 4 | MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE | 35 |
| 4.1 | Měřicí zařízení s jedním budícím signálem..... | 35 |
| 4.2 | Měřicí zařízení se dvěma budícími signály | 39 |
| 5 | APLIKACE METOD NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE..... | 41 |
| 5.1 | Obkladové prvky z druhotných surovin | 41 |
| 5.1.1 | Popis vzorků | 41 |
| 5.1.2 | Výsledky měření..... | 42 |
| 5.1.3 | Diskuze výsledků..... | 45 |
| 5.2 | Keramické dlaždice | 45 |
| 5.2.1 | Příprava experimentu..... | 46 |
| 5.2.2 | Výsledky měření..... | 46 |
| 5.2.3 | Diskuze výsledků..... | 50 |
| 5.3 | Stropní desky Hurdis | 50 |
| 5.3.1 | Příprava experimentu..... | 51 |
| 5.3.2 | Výsledky měření..... | 52 |
| 5.3.3 | Diskuze výsledků..... | 54 |
| 5.4 | Stropní desky upravené jako sendviče. | 55 |
| 5.4.1 | Popis experimentu | 55 |
| 5.4.2 | Výsledky měření | 55 |

| | | |
|---------|-------------------------------------|-----|
| 5.4.3 | Diskuze výsledků..... | 57 |
| 5.5 | Kamenné bloky..... | 57 |
| 5.5.1 | Popis experimentu. | 58 |
| 5.5.2 | Výsledky měření..... | 58 |
| 5.5.3 | Diskuze výsledků..... | 64 |
| 5.6 | Vzorky z jemné betonové směsi..... | 65 |
| 5.6.1 | První fáze experimentu..... | 65 |
| 5.6.1.1 | <i>Výsledky měření.....</i> | 66 |
| 5.6.1.2 | <i>Verifikační měření</i> | 69 |
| 5.6.1.3 | <i>Diskuze výsledků</i> | 72 |
| 5.6.2 | Druhá fáze experimentu | 73 |
| 5.6.2.1 | <i>Výsledky měření.....</i> | 74 |
| 5.6.2.2 | <i>Verifikační měření</i> | 77 |
| 5.6.2.3 | <i>Diskuze výsledků</i> | 79 |
| 5.7 | Železobetonové prvky | 80 |
| 5.7.1 | Železobetonové trámce..... | 80 |
| 5.7.1.1 | <i>Výsledky měření.....</i> | 82 |
| 5.7.1.2 | <i>Diskuze výsledků.....</i> | 85 |
| 5.7.2 | Železobetonový nosník..... | 86 |
| 5.7.2.1 | <i>Uspořádání experimentu</i> | 86 |
| 5.7.2.2 | <i>Výsledky měření</i> | 88 |
| 5.7.2.3 | <i>Diskuze výsledků.....</i> | 93 |
| 5.8 | Předpínací ocelová lana | 93 |
| 5.8.1 | Nepředpjaté ocelové lano | 94 |
| 5.8.1.2 | <i>Lineární měření</i> | 95 |
| 5.8.1.3 | <i>Nelineární měření</i> | 96 |
| 5.8.1.4 | <i>Diskuze výsledků.....</i> | 100 |
| 5.8.2 | Předpjaté ocelové lano | 100 |
| 5.8.2.1 | <i>Výsledky měření.....</i> | 101 |
| 5.8.2.2 | <i>Diskuze výsledků.....</i> | 107 |
| 6 | ZÁVĚR..... | 108 |
| 7 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 113 |
| 8 | SEZNAM OBRÁZKŮ | 123 |
| 9 | SEZNAM TABULEK..... | 129 |

| | | |
|----|--------------------------------|-----|
| 10 | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ | 131 |
| 11 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 133 |

1 ÚVOD

Nedestruktivní testování (NDT) je široký obor s mnoha metodami, který dokáže zjistit poruchy dříve, než mohou způsobit problém. Definice charakterizuje NDT jako použití neinvazivních technik k určení integrity materiálu, komponent nebo celé konstrukce, nebo pro kvantitativní měření některých charakteristik sledovaného objektu. 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 a 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. Pro lokalizaci a hodnocení velikosti defektů a poškození využívají především odraz a rozptyl ultrazvukových vln na nehomogenitách ve zkoušeném tělese. Tyto efekty jsou primárně způsobeny rozdílem v akustické impedanci nepoškozeného materiálu a defektních oblastí (trhlin, delaminací a dutin). Kombinací měřených parametrů jako jsou velikost echa, doba příchodu nebo amplituda prošlého ultrazvukového signálu je pak možné defekty v tělese zobrazovat. V některých případech však tyto konvenční metody naráží na svoje fyzikální možnosti a stávají se nepoužitelnými. Jedná se např. o materiálově složitá tělesa nebo defekty vzhledem k vlnové délce použitého ultrazvuku nezjistitelné. V této oblasti jsou vyvíjeny nové metody založené na nelineární ultrazvukové spektroskopii (NUS). Jsou uvažovány jako jedny z nejperspektivnějších a věnuje se jim posledních deset až patnáct let značná pozornost. Žádná z uvedených lineárních vlnových charakteristik není tak citlivá k detekci strukturních poruch jako nelineární odezva materiálu. Nelineární vlnové metody tak poskytují nové možnosti akustického nedestruktivního testování, nabízejí možnosti použití ultrazvukového testování i do oblastí, které jsou klasickým metodám nedostupné [29]. Stavební materiály jsou klasickým příkladem, kde je použití konvenčních ultrazvukových metod velice komplikované. Proto představují ideální prostředí pro nasazení nelineárních ultrazvukových metod.

Tato habilitační práce předkládá výsledky dosažené ve studiu metod nelineární ultrazvukové spektroskopie z hlediska možnosti jejich využití ve stavebnictví. 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. Byla jsem řešitelkou projektu „Diagnostika stropních konstrukcí z desek HURDIS metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie“ (103/06/P401) a členkou řešitelských týmů projektů „Defektoskopie železobetonových dílců a konstrukcí metodami nelineární akustické spektroskopie“ (103/06/1711) a projektu „Nelineární ultrazvuková defektoskopie stavebních prvků a konstrukcí“ (P104/10/1430). Členy týmu, vedeného doc. Ing. Martou Kořenskou, CSc., byli pracovníci Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně, Ústavu termomechaniky AV ČR a Centra dopravního výzkumu. Běžná potřebná měřicí technika dostupná na pracovišti Ústavu fyziky (generátory, osciloskopy, spektrální analyzátoři apod.) byla doplněna specifickými díly s využitím finančních prostředků poskytnutých GA ČR a sestavena pro diagnostiku stavebních prvků [34, 53]. Získané poznatky byly využity k plnění dílčích úkolů výzkumného záměru MŠM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“. V současnosti v uvedeném výzkumu pokračuji v rámci řešení projektu TAČR CK01000108 „Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků“, doba řešení 04/2020 až 12/2022. Hlavním řešitelem je Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., další řešitelé: ČVUT, VUT a Preditest, s. r. o. Jsem spoluřešitelkou částí zaměřené na využití nelineární ultrazvukové spektroskopie pro diagnostiku koroze zabudovaných předpjatých lan. Laboratorní experimenty jsou realizovány v Centru dopravního výzkumu, v.v.i.

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.

2 NELINEÁRNÍ MATERIÁLOVÉ MODELY

Pozornost je věnována především modelům, které jsou vhodné pro fenomenologický popis jevů vznikajících při nelineárním ultrazvukovém testování. Umožňují nám 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 projevovat až po aplikaci dostatečně vysokých amplitud buzení.

2.1 Klasická nelineární elasticita

První analytický popis nelineárně elastického chování publikovali autoři Landau s Lifshitzem [50] a Murnagham [67]. Použili postup založený na mocninném rozvoji hustoty elastické deformační energie W , za předpokladu analytičnosti funkce W . Využitím této vlastnosti je možné rozvinout W v mocninnou řadu. Využití tohoto předpokladu a Hookova zákona ve tvaru

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (2.1)$$

umožňuje zapsat W ve formě [4, 13, 20]

$$W = W_0 + C_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{1}{2!} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{3!} C_{ijklmn} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{mn} + \dots \quad (2.2)$$

Hustota elastické deformační energie může být vyjádřena obecněji podle De Limy a Hamiltona [10] pomocí invariantů tenzoru deformace

$$I_1 = \varepsilon_{ii} \quad I_2 = \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \quad I_3 = \varepsilon_{ij} \varepsilon_{jk} \varepsilon_{ki} \quad (2.3)$$

jako

$$W = \frac{1}{2} \lambda I_1^2 + G I_2 + \frac{1}{3} C I_1^3 + B I_1 I_2 + \frac{1}{3} A I_3 + O(\varepsilon_{ij}^4) \quad (2.4)$$

kde λ značí Lamého konstantu, G je modul pružnosti ve smyku a A , B , C jsou Landauovy moduly.

Detailní postup odvození uvádí např. Hamiel et al. [16]. V dalším textu je dodrženo značení z rovnice (2.2). Za předpokladu, že počáteční hustota elastické deformační energie a objemová deformace jsou nulové, první dva členy rovnice (2.2) mohou být zanedbány [18] a dostaneme rovnici ve tvaru

$$W = \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{6} C_{ijklmn} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{mn} . \quad (2.5)$$

Pouze třetí a čtvrtý člen rozvoje v rovnici (2.2) mají tedy ve studovaném případě relevantní fyzikální smysl. Pokud použijeme tyto dva členy s uplatněním následující rovnice

$$\tau_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} , \quad (2.6)$$

dostaneme obecný klasický (slabě) nelineární vztah mezi napětím a deformací

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijklmn} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{mn} , \quad (2.7)$$

kde C_{ijkl} a C_{ijklmn} jsou tenzory elastických konstant druhého a třetího řádu. Oba tyto tenzory vyjadřují elastické chování.

První tenzor je klasický a popisuje lineární elasticitu, druhý tenzor zodpovídá za nelineární efekty při deformaci materiálu. Tenzor C_{ijklmn} se skládá v případě obecně anizotropního prostředí z padesáti šesti složek. V případě izotropního prostředí se počet nezávislých složek redukuje na tři. Využitím předchozího předpokladu můžeme podle De Pascalise [13] zjednodušit rovnici (2.5) do tvaru

$$W = \frac{\lambda}{2} (\varepsilon_{kk})^2 + G \varepsilon_{ij}^2 + \frac{A}{3} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{jk} \varepsilon_{ki} + B (\varepsilon_{kk}) (\varepsilon_{ij}^2) + \frac{C}{3} (\varepsilon_{kk})^3 , \quad (2.8)$$

nebo použitím invariantů deformace

$$W = \frac{1}{2} \lambda I_1^2 + G I_2 + \frac{1}{3} C I_1^3 + B I_1 I_2 + \frac{1}{3} A I_3 . \quad (2.9)$$

Postup určení konkrétních hodnot konstant A , B , C je pro některé vybrané materiály rozebrán např. v [5]. Výraz pro τ_{ij} dostaneme dosazením rovnice (2.8) do rovnice (2.6). Pro

případ jednoosého prostého zatěžování, s použitím značení z literatury věnující se nelineárnímu ultrazvukovému testování, lze problém dále zjednodušeně vyjádřit ve tvaru

$$\sigma = [E_0(1 - \beta\varepsilon)]\varepsilon, \quad (2.10)$$

kde β je obecně funkcí elastických konstant 2. a 3. řádu složek C_{ijkl} a C_{ijklmn} a E_0 je konstantní modul pružnosti v tahu.

Ve studovaném případě, podle Johnsona a Ostrovského [25, 68], lze β vyjádřit pomocí Lamého konstanty λ , modulu pružnosti ve smyku G a konstant A, B, C vztahem

$$\beta = \frac{3}{2} + \frac{A + 3B + C}{\lambda + 2G}. \quad (2.11)$$

Pro účely nelineární spektroskopie elastických vln se v některých případech pracuje i s elastickými konstantami 4. řádu. Pro tyto případy byla do rovnice (2.10) zavedena odpovídající konstanta δ . Po shrnutí všech publikovaných poznatků v pracích [66, 80, 89, 91, 92] lze rovnici (2.10) napsat ve tvaru

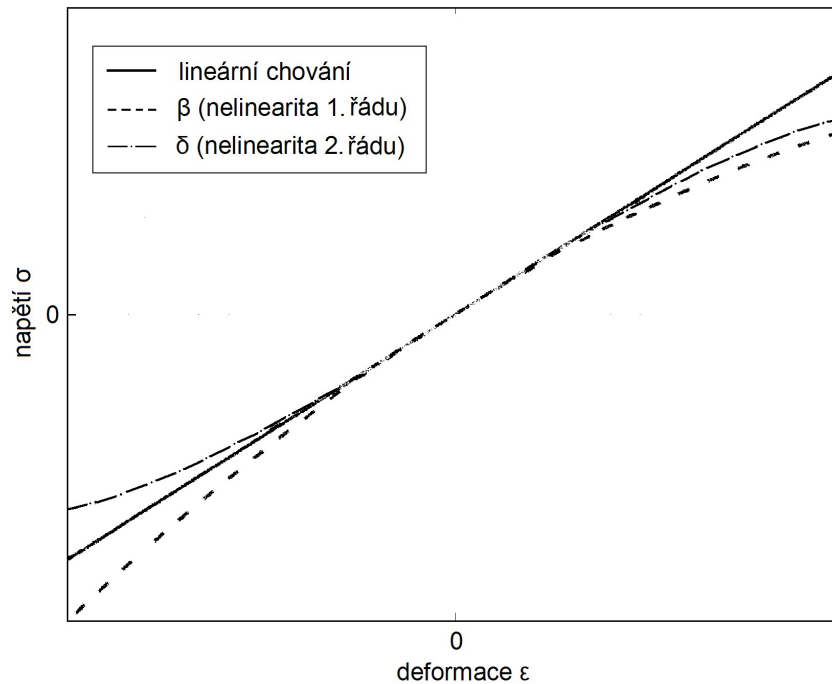
$$\sigma = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2)\varepsilon, \quad (2.12)$$

kde $\beta\varepsilon$ a $\delta\varepsilon^2$ jsou členy o hodnotách obvykle výrazně menších než 1, které určují typ nelinearity.

Z fyzikálního hlediska konstanty β a δ rozhodují o změkčující nebo zpevňující charakteristice materiálu nebo jeho částí, kterými mohou být např. defektní oblasti nebo trhliny. Pro ilustraci je tento jev graficky znázorněn na obr. 2.1, upraveném podle Van Damma [86]. Vlastní modul pružnosti může být vyjádřen z rovnice (2.12) vztahem

$$E = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2). \quad (2.13)$$

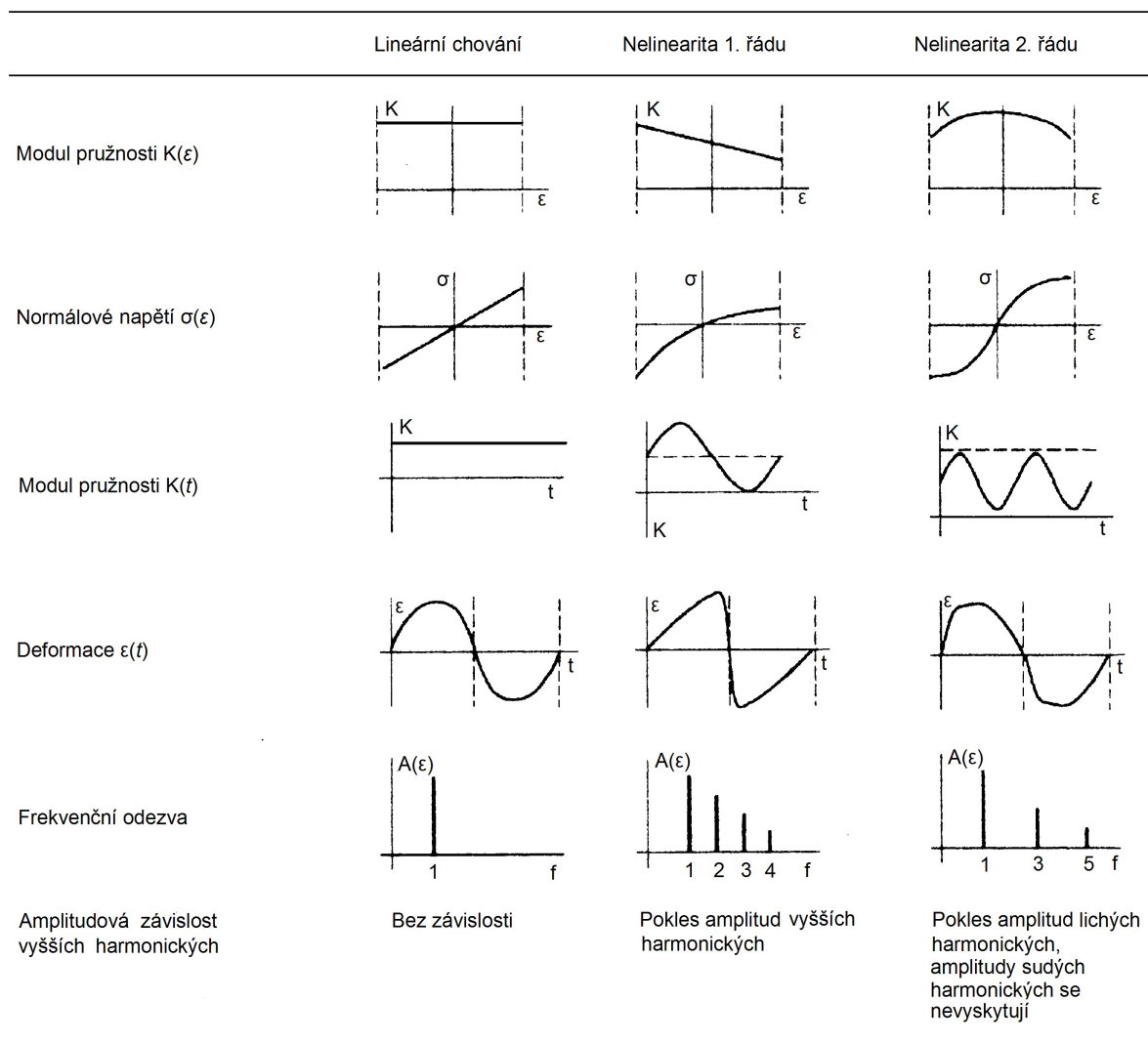
Křivky závislosti napětí σ na deformaci ε pro oba typy chování jsou uvedeny na obr. 2.1. Jestliže $\delta = 0$ a $\beta \neq 0$, jedná se o nelinearitu prvního řádu. Jestliže $\beta = 0$ a $\delta \neq 0$ jedná se o nelinearitu druhého řádu. V souladu s typem nelinearity nazýváme β konstantou klasické nelinearity prvního řádu a δ konstantou klasické nelinearity druhého řádu.



Obr. 2.1. Závislost napětí σ na deformaci ε pro lineární a dva typy slabě nelineárního chování.

Klasická nelinearita homogenních materiálů má svůj fyzikální původ na atomární úrovni. Nelinearita vzniká ze slabé anharmonicity meziatomových potenciálů, jak uvádí např. Landau s Lifshitzem [50] a Stobbe [81]. Někteří autoři, jako Johnson a Ostrovsky [25], 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. Navíc vykazují další zajímavé efekty jako jsou např. hysterese, relaxace a efekty pomalé dynamiky.

Pro ilustraci jsou na obr. 2.2 uvedeny oba typy nelinearity a jejich vliv na modul pružnosti, změnu tvaru sinusové vlny a frekvenční odezvu na monofrekvenční buzení, jak uvádí Van Den Abeele et al. [89]. Z obr. 2.2 (2. a 3. sloupec) je patrné, že klasická nelinearita jednoduše vysvětluje generování vyšších harmonických ve spektru. 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. 2.2. Schematické znázornění dvou typů nelinearity a jejich vlivu na modul pružnosti, změnu tvaru sinusové vlny a frekvenční odezvu na monofrekvenční buzení [89].

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. U poškozených těles jsou jediným zdrojem výrazné neklasické nelinearity pouze defektní oblasti. Naproti tomu u materiálů silně nehomogenních, jako jsou horniny a beton, jsou nelineární efekty patrné i v nepoškozeném stavu. Typickým projevem neklasické nelinearity je rozdílnost chování při střídavém tlakovém a tahovém zatěžování, kdy se projevuje asymetrie deformační křivky. Tento efekt je připisován uzavírání a otevírání systémů nehomogenit (pórů, příměsí) a trhlin.

Z matematického hlediska modely neklasické nelinearity nepožadují analytičnost hustoty elastické deformační energie W . Ta je určitou funkcí invariantů tenzoru deformace, nebo je vyjádřena přidáním nepolynomálních členů v ε ke klasické nelineární teorii. Tyto doplňující členy byly většinou navrženy empiricky vzhledem ke skutečnosti, že přesný analytický popis některých jevů neklasické nelinearity nebyl podán. První práce směřující k fyzikálnímu odvození těchto jevů byly zpracovány v publikacích [12, 16, 31].

2.2.1 Bimodulární model

Prvním a nejjednodušším modelem neklasické nelinearity je bimodulární model. Někdy bývá také označován zjednodušeně jako „*crack clapping*“ – *tleskání trhliny* nebo kontaktní akustická nelinearita (CAN). Přestože jde o velice jednoduchý model, poskytuje názorný příklad pro porozumění vzniku vyšších harmonických složek ve spektru při interakci elastických vln s trhlinou [78, 79].

Model vychází z předpokladu lineárního tělesa s jednou centrální trhlinou. Jestliže je těleso cyklicky namáháno v módu I, je trhlina opakovaně zavírána a otevírána. Pokud je amplituda zatěžování dostatečně vysoká, objeví se asymetrie mezi tlakovou a tahovou částí cyklu. Tato asymetrie je způsobena kontaktem stěn trhliny. 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. [79], jako

$$E = E_0 \left[1 - H(\varepsilon - \varepsilon_c) \left(\frac{\Delta E}{E_0} \right) \right], \quad (2.14)$$

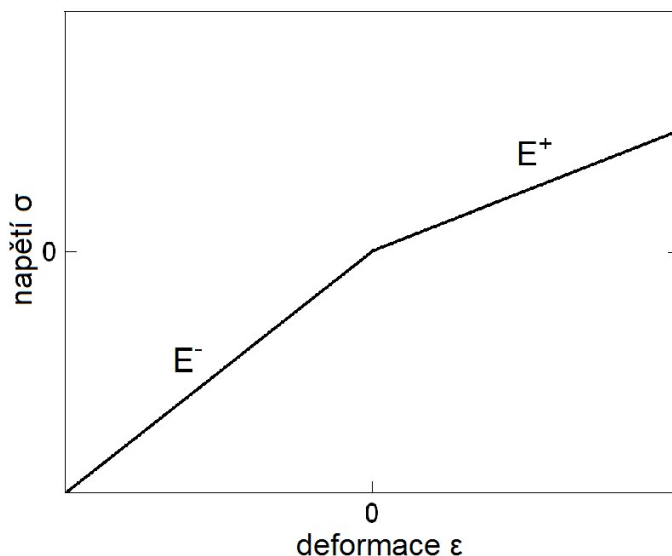
kde E_0 je modul pružnosti, ΔE je jeho změna způsobená dotekem stěn trhliny, ε je aktuální deformace a ε_c je hodnota deformace odpovídající počátečnímu dotyku stěn.

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

$$E = \begin{cases} E^+ & \text{pro } \varepsilon_c > 0 \\ E^- & \text{pro } \varepsilon_c < 0 \end{cases}, \quad (2.15)$$

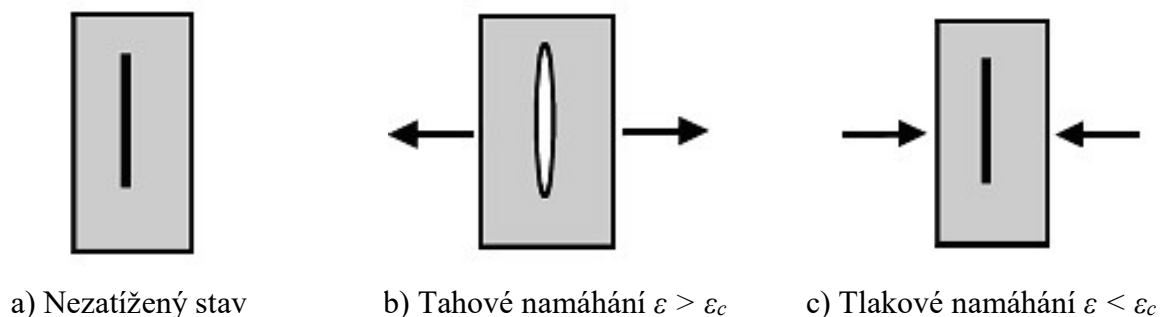
kde E^+ znamená modul pružnosti v tahu a E^- modul pružnosti v tlaku.

Z grafického znázornění tohoto vztahu (obr. 2.3) je patrné, že E^- je větší než E^+ , což odpovídá většímu odporu proti deformaci po doteku stěn. Hodnota ΔE vyjadřuje rozdíl mezi modulem pružnosti v tlaku a v tahu.



Obr. 2.3. Závislost napětí σ na deformaci ε pro bimodulární model. Varianta pro $\varepsilon_c = 0$.

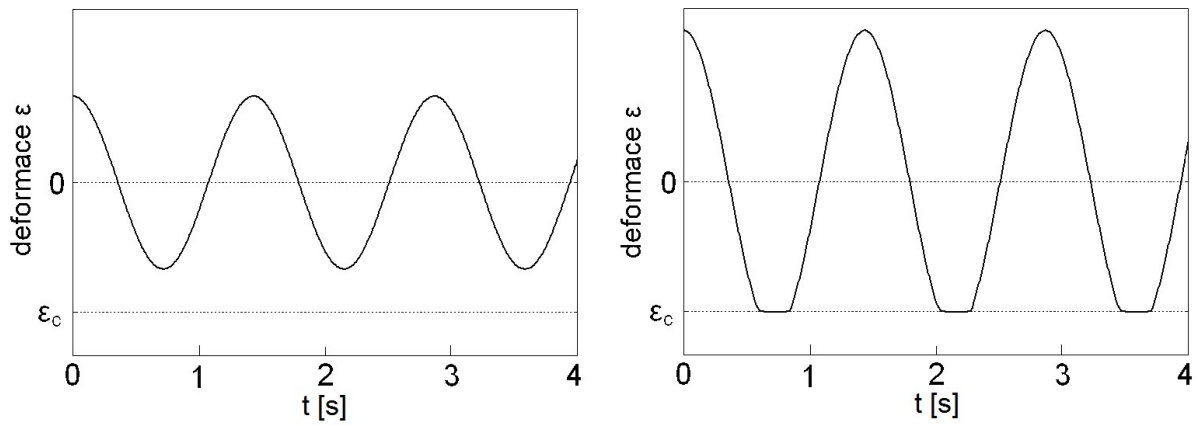
Jedním ze způsobů, jak vyvolat chování odpovídající bimodulárnímu modelu, je průchod ultrazvukového vlnění odpovídající amplitudy tělesem s vhodně orientovanou trhlinou (obr. 2.4), případně systémem trhlin.



Obr. 2.4. Schematické zobrazení bimodulárního modelu pro $\varepsilon_c = 0$.

Tento model byl experimentálně ověřen několika autorskými kolektivy např. [6, 49, 77, 93]. Přestože je bimodulární model poměrně jednoduchý, plynou z něj velice zajímavé důsledky. Jako první aproximace popisuje tvorbu vyšších harmonických při monofrekvenčním buzení. Jestliže se původně monofrekvenční sinusové vlnění pohybuje oblastí, která se dá popsat bimodulárním modelem (2.14), 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. 2.5).



a) Harmonický signál $\varepsilon(t)$ pro $\varepsilon < \varepsilon_c$

b) Deformovaný signál $\varepsilon(t)$ pro $\varepsilon > \varepsilon_c$

Obr. 2.5. Deformace signálu vlivem doteku stěn trhliny.

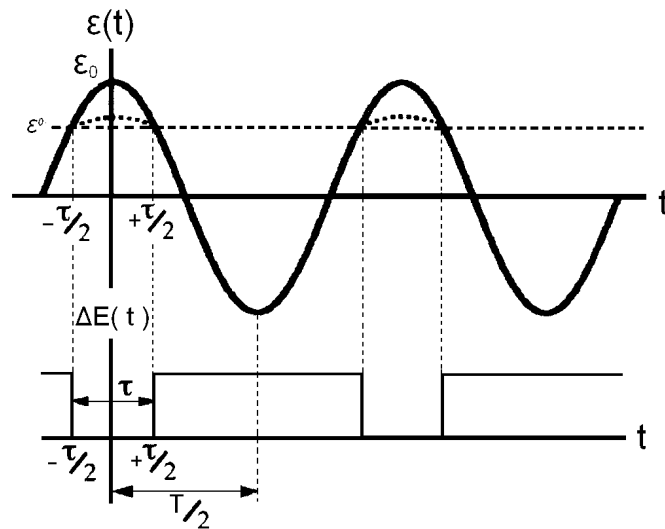
Guyer a Johnson [14] ukázali, že takový typ signálu může být jednoduše analyticky popsán vztahem

$$\sigma(t) = \Delta E(t)\varepsilon = 2\Delta E\left(\frac{\tau}{T}\right)(\varepsilon \cos(2\pi f t) - \varepsilon_c) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left[\frac{n\tau}{T}\right] \cos(2\pi n f t), \quad (2.16)$$

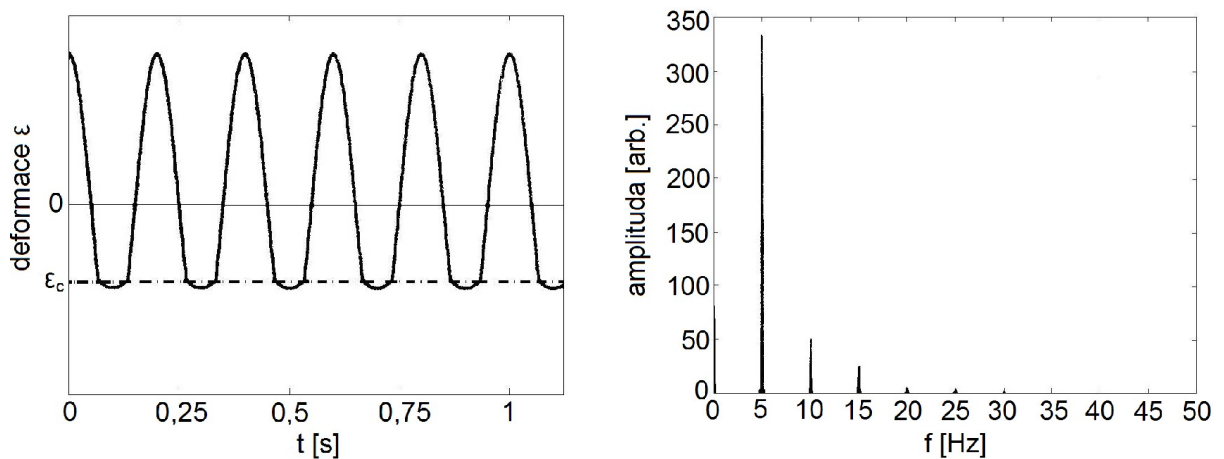
kde τ je šířka pulsu a T je perioda.

Je patrné, že z hlediska analýzy signálu představuje rovnice (2.16) pulsní modulaci původně sinusového signálu.

Modulace je realizována pomocí periodických obdélníkových pulsů představujících změnu modulu pružnosti. Oblasti mezi jednotlivými pulsy představují časové úseky, kdy se stěny nedotýkají a naopak. Grafické zobrazení modulace dle rovnice (2.16) je uvedeno na obr. 2.6. Míru deformace původně sinusového signálu určuje změna modulu pružnosti ΔE a výška CAN prahu. Tato modulace způsobuje nárůst podílu harmonických ve frekvenčním spektru vypočteném pomocí Fourierovy transformace (obr. 2.7). Podíl harmonických spektrálních složek a jejich konkrétních amplitud závisí opět na rozdílu modulů pružnosti ΔE , výšce CAN prahu a amplitudě deformace způsobené průchodem elastických vln.



Obr. 2.6. Pulsní modulace a ΔE jako funkce času [14].

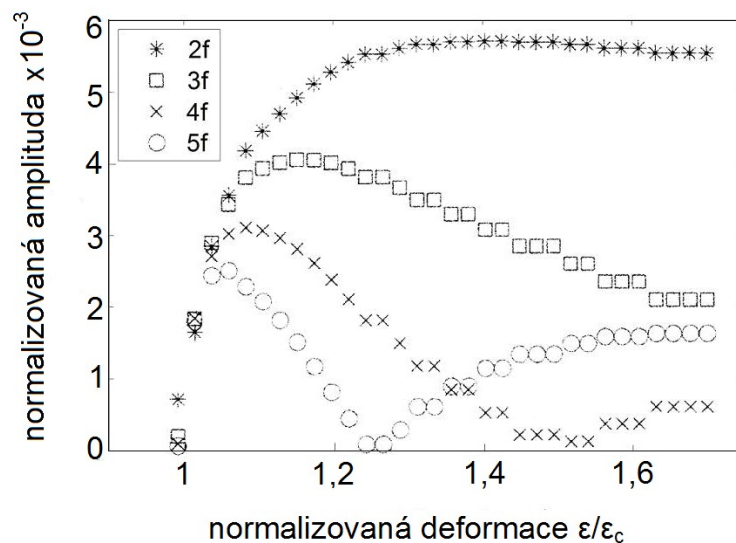


a) Deformovaný signál

b) Spektrum signálu – generování harmonických

Obr. 2.7. Změna tvaru signálu a spektrum signálu – bimodulární model, $f = 5$ Hz.

Na obr. 2.8 je zobrazena závislost normalizované amplitudy harmonických spektrálních složek na amplitudě deformace, CAN prahu a ΔE . Z obr. 2.8 je patrné, že po překročení hodnoty ε_c se stává dominantní složkou druhá harmonická, zatímco amplitudy zbylých harmonických postupně procházejí inflexními body a klesají. Po dosažení lokálních minim, pak opět amplitudy začínají pomalu růst. Toto chování je jedním z výrazných rozdílů mezi klasickou a neklasickou nelinearitou. V klasické nelinearitě platí pro druhou harmonickou úměrnost ($a_{2f} \sim \varepsilon^2$) a pro třetí harmonickou úměrnost ($a_{3f} \sim \varepsilon^3$). Amplituda podílu $3f/2f$ je tedy lineární funkcí buzení ($a_{3f}/a_{2f} \sim \varepsilon$).



Obr. 2.8. Numericky vypočtené závislosti normalizované amplitudy harmonických složek na normalizované amplitudě deformace. $\Delta E/E = 0,6$; $\epsilon_c = 0,1$.

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 trhliny. Objevily se již první teoretické práce zabývající se touto problematikou, jako např. [1, 31]. Tohoto modelu se rovněž využívá pro hodnocení vlastností povrchů pomocí ultrazvuku [30] nebo při analýzách bimodulárních stavebních konstrukcí [94].

2.2.2 Hysterezní model

Klasická nelineární teorie a bimodulární model jsou velice přínosné pro první přiblížení nelineárního chování těles s porušenou strukturou. Třebaže jsou tyto modely názorné, nedokáží celkově popsat nelineární odezvu reálných zkoušených těles. Většina přirozeně vysoce nelineárních a poškozených těles vykazuje mnohem složitější odezvu, kterou nelze postihnout pouze kombinací dvou nelineárních modelů, klasického a bimodulárního. U těchto materiálů se uplatňují další a významnější efekty jako jsou: hystereze, efekty pomalé dynamiky nebo tzv. „end point memory“ (EPM). Vyskytují se jednak při kvazistatickém namáhání a jednak u dynamických ultrazvukových experimentů, kde se uplatňují pouze malé amplitudy deformace [89]. Vliv těchto efektů, především hystereze, na nelineární odezvu

zkoušeného tělesa je obvykle řádově větší než klasická atomární elasticita. V případě přirozeně nelineárních materiálů jsou tyto efekty dominující.

Pro popis hysterezních systémů je třeba použít obecnější konstitutivní vztahy. Typickou vlastností pro hysterezní systémy je závislost na směru deformace ($\text{sgn}(\dot{\varepsilon})$). Pro popis systému je třeba znát, kromě současného stavu, také jeho historii. Aktuální stav systému je tedy funkcí nejen aktuálního zatížení, ale i zatěžovací historie. S přijetím této skutečnosti a omezením na jednorozměrný problém, lze zapsat základní obecný konstitutivní vztah pro nelineární hysterezní systém jako

$$\sigma = \int E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) d\varepsilon, \quad (2.17)$$

kde $E(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ značí modul pružnosti, který je závislý jak na aktuální amplitudě deformace ε , tak i na rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}$.

V nejobecnějším případě se předpokládá, že $E(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ se skládá z klasicky nelineární části a z části, která v sobě zahrnuje neklasické členy reprezentující hysterezi a ostatní výše zmíněné efekty. Tato neklasická část konstitutivního vztahu bývá zpravidla označována $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ a její strukturu popisuje několik teorií.

Vynecháním klasicky nelineární části přejdeme na čistě hysterezní model. To znamená, že všechny členy kromě $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ můžeme vynechat a rovnici (2.17) lze zredukovat do tvaru

$$\sigma = E[\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})], \quad (2.18)$$

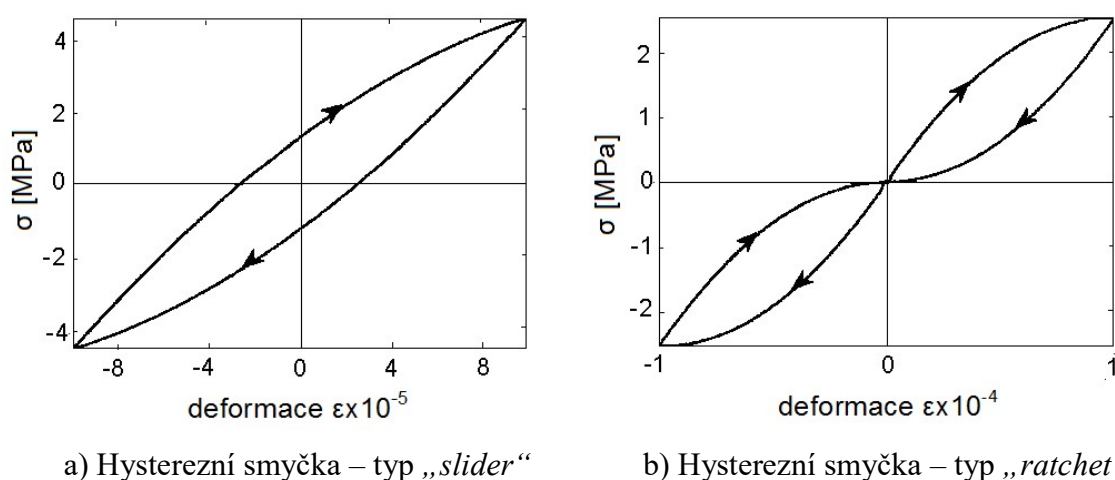
kde $|f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})| \ll 1$.

První model, který popisuje tvar $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, byl navržen Daviděnkovem [9] a je často nazýván *inelastický* nebo tzv. „*slider*“ typ [25]. Podle Nazarova [69] má hysterezní člen $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ v tomto modelu tvar

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \alpha \varepsilon_m \varepsilon + \begin{cases} \frac{\beta_1}{2} \varepsilon^2 - \frac{\beta_1 + \beta_2}{4} \varepsilon_m^2 & \dot{\varepsilon} > 0 \\ -\frac{\beta_2}{2} \varepsilon^2 + \frac{\beta_1 + \beta_2}{4} \varepsilon_m^2 & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (2.19)$$

kde $|\alpha| \varepsilon_m \ll 1$, $|\beta_{1,2}| \varepsilon_m \ll 1$ a $|\beta_{1,2}| \gg 1$. Proměnná ε_m je amplituda lokální deformace, α , β_1 a β_2 jsou nezávislé parametry, které charakterizují hysterezní chování tělesa.

Speciální případy vztahu (2.19) jsou zajímavé vzhledem k předchozím modelům nelinearity. Zvolíme-li $\alpha = 0$ a $\beta_1 + \beta_2 = 0$ a dosadíme zjednodušený vztah (2.19) do rovnice (2.18), ta se zredukuje do tvaru prosté kvadratické nelinearity, jak je popsána v rovnici (2.10). Hystereze je v tomto případě potlačena. V případě, že $\beta_1 + \beta_2 \neq 0$, hysterezní chování je zachováno. Tvar hysterezní smyčky pro tento případ znázorňuje graf a) na obr. 2.9. Z uvedeného grafu i z rovnice (2.19) je zřejmé, že hysterezní smyčka neprochází počátkem souřadné soustavy. Nulová deformace tedy odpovídá nenulovému napětí v průběhu zatěžování a naopak. Proto je označena jako *inelastická* hystereze. Tento typ chování byl v přírodě pozorován např. u australského pískovce, křemene a v krystalech LiF a NaCl [7].



Obr. 2.9. Porovnání dvou základních modelů hystereze – *inelastické* a *elastické*.

Druhý model hystereze je založen na teorii Granato-Lücke o amplitudově závislém dislokačním útlumu (vnitřním tření) v polokrystalech. Tento typ hystereze je často označován jako *elastický* nebo podle tvaru smyčky jako tzv. „ratchet“ typ (obr. 2.9 b). Tvar hysterezního členu je u tohoto modelu složitější a podle [69] může být vyjádřen tvarem

$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} \frac{\gamma_1}{2} \varepsilon^2 & \dot{\varepsilon} > 0 \wedge \varepsilon > 0 \\ -\frac{\gamma_2}{2} \varepsilon^2 + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \varepsilon_m^+ \varepsilon & \dot{\varepsilon} < 0 \wedge \varepsilon > 0 \\ \frac{\gamma_3}{2} \varepsilon^2 & \dot{\varepsilon} < 0 \wedge \varepsilon < 0 \\ -\frac{\gamma_4}{2} \varepsilon^2 + \frac{\gamma_3 + \gamma_4}{4} \varepsilon_m^- \varepsilon & \dot{\varepsilon} > 0 \wedge \varepsilon < 0, \end{cases} \quad (2.20)$$

kde $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ jsou konstanty a $\varepsilon_m^+, \varepsilon_m^-$ jsou lokální amplitudy kladné a záporné části zatěžovacího cyklu (vlny). Ve většině případů platí, že $\varepsilon_m^+ = \varepsilon_m^-$. Ve zcela obecném případě se však mohou ε_m^+ a ε_m^- lišit. Hysterezní smyčka odpovídající tomuto modelu (obr. 2.9 b), na rozdíl od předchozího modelu obr. 2.9 a), prochází nulovým bodem $[\varepsilon, \sigma] = [0, 0]$. Tento model je často aplikován pro popis experimentů s tyčovými rezonátory, kovy a horninami vápencového typu [70]. V této práci je také uvedeno zobecnění rovnice (2.20) pro n -tý řád hystereze.

Dalším krokem modelování hysterezního chování je přidání klasické nelinearity do konstitutivního vztahu (2.17). Klasická nelinearita je vyjádřena pomocí vztahu (2.13) a je zřejmé, že je nezávislá na rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}$. To umožňuje vyjádřit integrál v rovnici (2.17) po částech, protože $E(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ lze rozdělit následovně

$$E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2) + f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (2.21)$$

kde $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ reprezentuje jeden z popsaných hysterezích modelů nebo jiný vhodný hysterezní model.

Jeden z velice často používaných modelů v nelineárním ultrazvukovém nedestruktivním testování je vyjádřen rovnicí

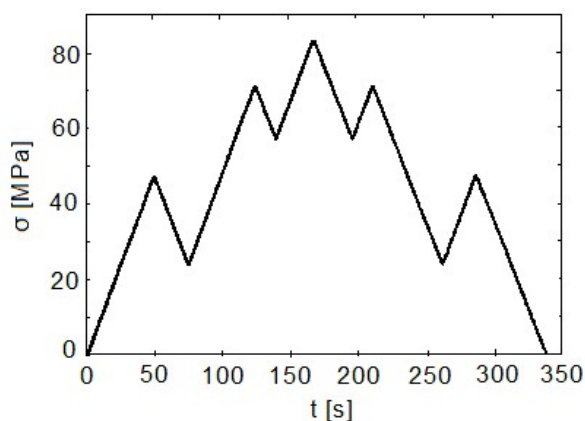
$$E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \alpha[\varepsilon_m + \varepsilon \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}) + \dots]), \quad (2.22)$$

kde ε_m značí lokální amplitudu deformace v posledním cyklu (periodě) a α je *hysterezní nelineární konstanta prvního řádu* [3,73].

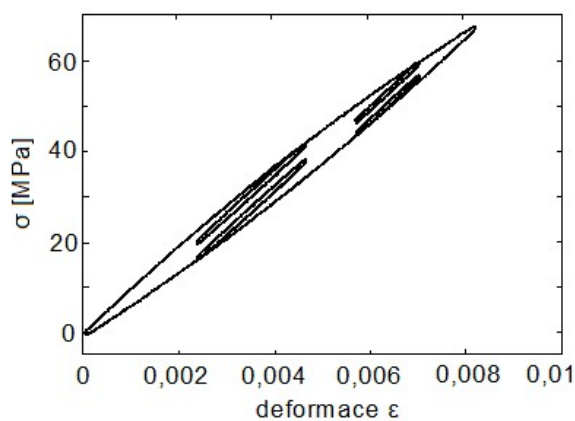
Uvážíme-li pouze první člen v hysterezní části a další členy zanedbáme, můžeme tuto rovnici přepsat do tvaru

$$E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \alpha[\varepsilon_m + \varepsilon \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon})]). \quad (2.23)$$

Tento tvar je jedním z nejpoužívanějších v nelineární ultrazvukové defektoskopii pro interpretaci výsledků metod nelineární ultrazvukové spektroskopie a nelineární vlnově modulační spektroskopie. Grafické zobrazení numerické simulace nelineárního hysterezního chování dle rovnice (2.23) je uvedeno na obr. 2.10.



a) Zatěžovací křivka



b) Hystereze – hlavní a vedlejší smyčky

Obr. 2.10. Numerická simulace nelineárního hysterezního chování podle rovnice (2.23).

Z grafu je zřejmé, že hysterezní člen je pouze speciálním případem inelastického hysterezního modelu (2.19). Rovnice (2.23) může být pro základní jednoduché typy zatěžování řešena analyticky. Příklad sinusového zatěžování vede na vztah

$$\sigma = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \alpha[\varepsilon_m + \varepsilon \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon})])\varepsilon, \quad (2.24)$$

kde $\varepsilon_m = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$ je amplituda sinusového zatěžování [17].

Rovnice (2.23) je základním vztahem pro numerické simulace nelineárního hysterezního chování, jak je uvedeno např. v [66]. Z jednoduchého příkladu takové základní simulace na obr. 2.10b) je patrné, že všechny důležité hysterezní efekty (především EPM) platí. Existují i další modely a postupy pro simulaci hysterezního chování materiálů a těles. Pozornost však byla zaměřena pouze na výše uvedené, které jsou pro využití v nelineární ultrazvukové defektoskopii nejdůležitější.

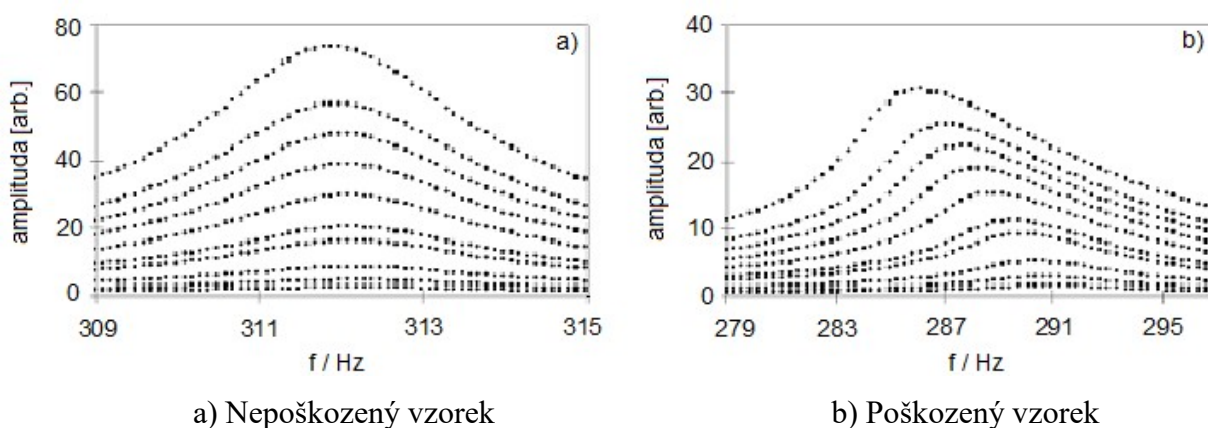
3 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN

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 pojátkem mezi metodami NEWS je využití spektrální analýzy. Signály získané při zkoušení jednotlivými metodami jsou hodnoceny ve frekvenční oblasti na rozdíl od konvenčních ultrazvukových metod, které jsou hodnoceny v časové oblasti. Hlavním nástrojem pro analýzu výsledků měření je především Fourierova transformace (FFT). Mezi nejčastěji používané metody NEWS náleží *nelineární ultrazvuková spektroskopie* (NRUS), která se zabývá posunem rezonanční frekvence v závislosti na amplitudě buzení a *nelineární vlnově modulační spektroskopie* (NWMS), která využívá efektu nelineárního směšování elastických vln. Další skupinu tvoří nelineární metody, které nevyužívají spektrální analýzy pro hodnocení získaných signálů, proto se svým charakterem nedají zařadit do skupiny NEWS a nejsou náplní této práce.

S teoretickým a experimentálním výzkumem metod NEWS započala na konci osmdesátých let geofyzikální skupina v Los Alamos National Laboratory pod vedením Paula A. Johnsona. Jednou z prvních publikací byl článek z roku 1987 [21] a následně bylo vyvinuto a popsáno několik nových metod, např. [22-24, 26, 65]. Druhé významné centrum, které se zabývá metodami NEWS a souvisejícími problémy je pracoviště vedené Koen Van Den Abeelem na Katolické universitě v Leuvenu [85]. Dále je třeba zmínit Turínskou polytechniku, konkrétně P. P. Delsanta, který se věnuje převážně teoretickému výzkumu v této oblasti [11]. V České republice patří mezi přední pracoviště a průkopníky v tomto oboru Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i. [32], se kterým jsem navázala spolupráci v rámci řešení grantových projektů.

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. 3.1). 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) [90]. 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. 3.1a), v poškozeném vzorku se s amplitudou mění tvar rezonanční křivky a posouvá se vrchol rezonančního maxima (obr. 3.1b).



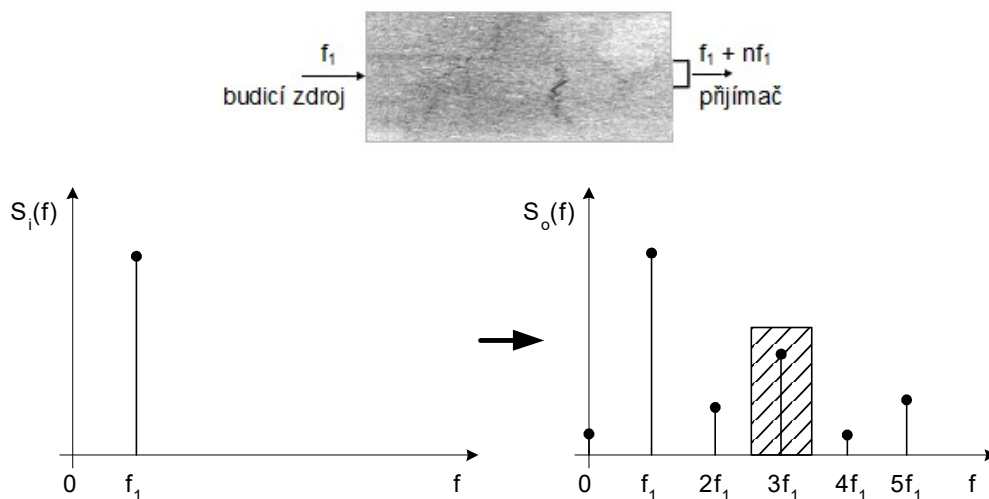
Obr. 3.1. Příklad posunu rezonančního kmitočtu tělesa na intenzitě vybuzení [87].

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. 3.2) způsobuje nelinearita vznik dalších harmonických signálů f_n s kmitočty dle Fourierova rozvoje

$$f_n = n f_1 \mid n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (3.1)$$



Obr. 3.2. 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. 3.2. 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. 3.3). V důsledku nelinearity materiálu vzniknou další harmonické signály f_v podle vztahu

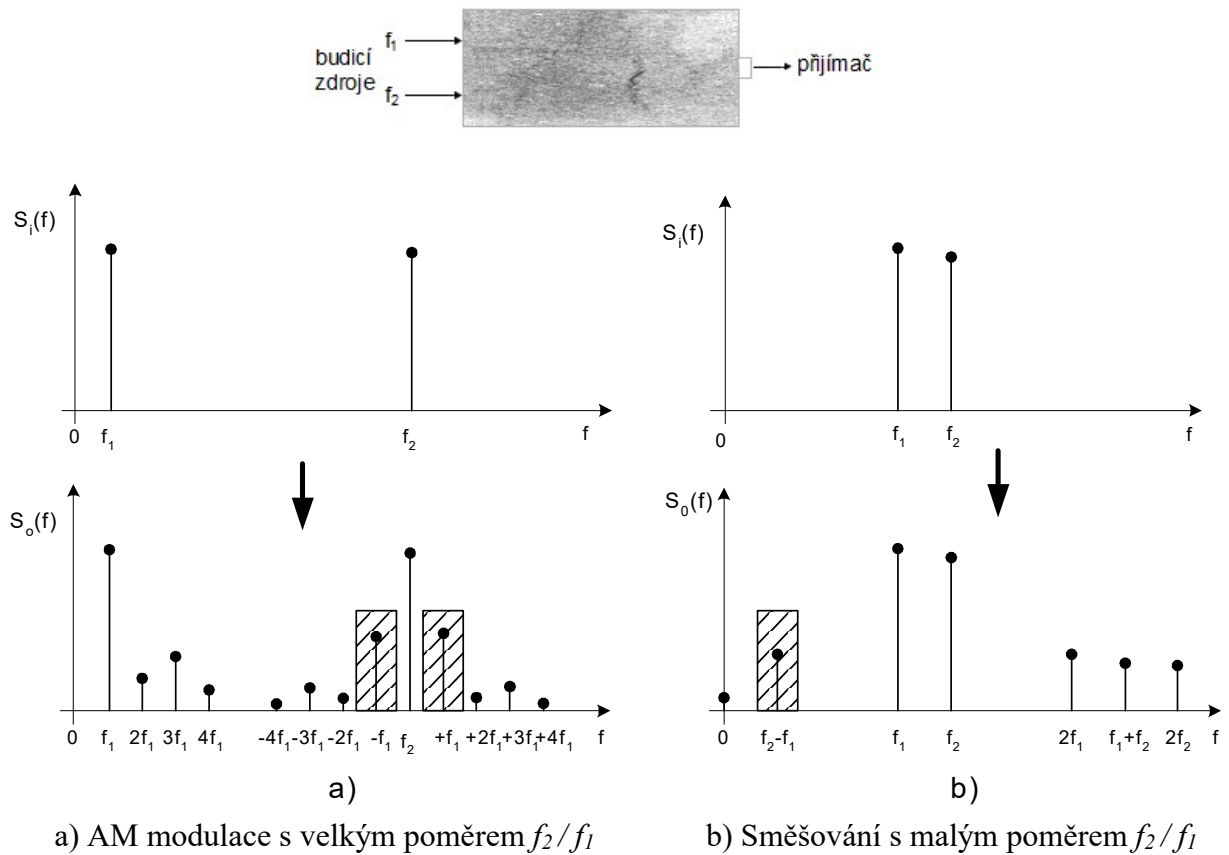
$$f_v = | \pm m f_1 \pm n f_2 | \quad | m, n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (3.2)$$

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

$$f_v = | \pm f_1 \pm f_2 |. \quad (3.3)$$

Tyto metody se nazývají Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy – NWMS (modulační ultrazvuková spektroskopie). Mají také dvě základní varianty (obr. 3.3), které se liší dle

relativního poměru hodnoty kmitočtů f_1 a f_2 . Metody lze přirovnat k radiotechnickým principům AM modulační a směšování.



Obr. 3.3. Kmitočtové spektrum při průchodu dvou signálů nelineárním prostředím.

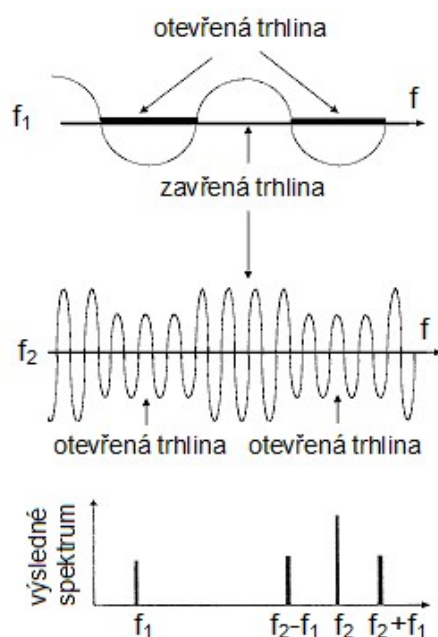
V prvním případě mají dva harmonické kmitočty řádově odlišnou hodnotu, jeden je nízkofrekvenční a druhý vysokofrekvenční. Při interakci těchto signálů s defektem vznikne úzkopásmový AM signál a kromě původního kmitočtu f_2 se objeví postranní složky $f_2 \pm n f_1$, (obr. 3.3a). Pro detekci a měření součtové a rozdílové složky lze použít buď spektrální analýzu (velmi jemné rozlišení složek spektra), anebo synchronní demodulaci s následnou analýzou nízkofrekvenčního signálu. Oba způsoby mají omezenou dynamiku měření přibližně na 60–80 dB.

Druhý případ využívá směšovacího principu, kdy oba budící signály mají relativně blízké hodnoty kmitočtů a první rozdílová složka má naopak poměrně nízkou hodnotu (obr. 3.3b). 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 s použitím analogové předfiltrace s vysokým dynamickým rozsahem (≈ 120 dB i více).

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 spojitém a) či impulsním b) režimu:

- a) Ve spojitém 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, kdy širokospektrální buzení získává charakter úzkopásmového až harmonického buzení. 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 [27] nelze touto metodou detekovat např. otvory v tělese.

Jednoduché vysvětlení pozorovaných nelineárních jevů vychází z modelu chování defektů typu trhlín [75]. Trhliny uvnitř tělesa se střídavě zavírají a otevírají při průchodu budící (nosné) vlny o nízké frekvenci f_1 (obr. 3.4). 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 clipping*“. U vznikajících malých, málo rozevřených defektů (rozevření řádově stovky nm) mohou být efekty nárazu stěn o sebe pozorovány již při relativně velmi malých amplitudách budícího signálu (malých posuvech).



Obr. 3.4. Fyzikální princip nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS).

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.

3.2.1 Výhody

Přehled výhod uvedených např. v [19]:

- rychlost
- extrémní citlivost, 10× až 1000× 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.

Z přehledu je zřejmé, že některé výhody se nabízejí pro stavebnictví. Důležitou výhodou je řádově vyšší citlivost v poměru k rozměrům poruch. Je to dáno mj. tím, že při klasickém ultrazvukovém NDT je nutno detekovat odražený signál širokopásmově (frekvenčně neselektivně) v krátkém a definovaném časovém intervalu, a tedy s menším dynamickým rozsahem. Oproti tomu, nelineární ultrazvuková spektroskopie může vzhledem

k jednoznačnosti vzniku detekovaného signálu (detekované frekvenční složky vznikají pouze v důsledku defektů) detekovat sledované harmonické složky velmi selektivně (po delší dobu) a tedy s podstatně větším dynamickým rozsahem a větší citlivostí. K tomu přispívá i možnost potlačení velkých budících signálů filtry na vstupu měřicího řetězce (zesilovače zpracovávají signály s menším dynamickým rozsahem) [15].

Další výhodou je necitlivost těchto metod na odrazy měřících signálů, protože okraje těles nemají nelineární vlastnosti a selektivně vybrané 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 [51, 71]. V případě nelineární ultrazvukové spektroskopie je vliv nehomogenity materiálu minimální, protože její nelineární projev je podstatně nižší než u běžných defektů.

S využitím kombinací obou uvedených výhod lze též provádět levné a rychlé jednorázové (integrální) testování celých těles (i tvarově složitých a rozměrných), což lze označit za třetí hlavní výhodu nelineární ultrazvukové spektroskopie v porovnání s klasickými ultrazvukovými metodami. Ve stavebnictví by mělo být toto jednorázové testování výhodné u sériové produkce méně rozměrných levných prvků (např. střešní krytina, keramické stropní desky apod.). Citlivý vztah mezi nelinearitou a materiálovou pevností umožňuje její využití k efektivnímu hodnocení poškození struktury betonu a železobetonu. Aplikace nelineárních metod v případě betonu mohou být použity nejen pro detekci poškození, nýbrž i k řízení výrobních technik, za účelem vývoje materiálů s konkrétní požadovanou kvalitou (např. zvýšená pevnost, chemická odolnost apod.).

3.2.2 Nevýhody a omezení

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 [15]:

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

Proto je potřebné použít výstupní filtr generátoru s dostatečným útlumem a vysokou linearitou, čímž lze dosáhnout odstupů až 140 dB. Je nutné minimalizovat další zdroje

parazitního vzniku třetí harmonické složky (vazba piezoelektrického snímače s testovaným předmětem, kontakt tělesa s podložkou apod.). Šum předzesilovače lze snížit omezením šířky pásma (úzkopásmovým filtrem), což není problém při integrálním měření s kontinuální vlnou (praktická mez doby trvání měření se jeví asi 0,01 až 0,1 s). Celkově se jeví, že při dodržení uvedených pravidel by měl být dosažitelný dynamický rozsah přes 120 dB.

Většina základních zásad a omezení u dalších metod je analogická s diskutovanou metodou, nicméně 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. Teoreticky se oba signály přenesou do všech míst měřicího zařízení, ale koeficient přenosu jednoho signálu do druhého měniče či dokonce do druhého výkonového zesilovače je velmi malý (geometrické rozložení sond a s tím spojený nutný útlum přenosu z jedné do druhé vysílací cesty). Z tohoto hlediska nejsou ani velké požadavky na čistotu generovaného signálu a výstupní kmitočtové filtry. Vyšší harmonické složky samostatných signálů neovlivňují přesnost měření.

V případě modulačního principu jsou vyhodnocovány harmonické složky v postranních pásmech nelinearitou vytvořeného AM signálu. Při přímém zpracování je obtížně realizovatelná analogová předfiltrace, proto rozhoduje dynamický rozsah převodníku AD a počet vzorků pro FFT, který musí být značně velký. S ohledem na rozlišitelnost FFT se tím i částečně zvyšuje rozlišitelnost nad dynamický rozsah převodníku AD. Lze tak dosáhnout dynamického rozsahu maximálně asi do 80 až 100 dB. Při nepřímém zpracování převodem AM z vysokofrekvenčního do nízkofrekvenčního pásma, pomocí synchronního demodulátoru, jsou dosažitelné hranice maximálního rozsahu přibližně stejné. Proto se jeví dosažitelná citlivost této metody poněkud menší než u předchozích metod. Na druhou stranu má tato metoda výhodu ve snadné vybuditelnosti i velkého tělesa nízkofrekvenčním signálem. Nejednoznačná je i výhodnost pro lokalizaci místa poruchy, protože i při použití radioimpulsního vysokofrekvenčního signálu je nutno detekovat poměrně dlouhou dobu signálu. Zde se jeví určitá cesta fázově synchronizovaného opakovaného vysílání radiových impulsů vysokofrekvenčního signálu s odpovídajícím vyhodnocením [28].

U rezonančních metod (SIMONRUS) lze meze měření a citlivost stanovit ještě obtížněji [87, 90], protože do měření vstupují další parametry jako citlivost změny rezonančního kmitočtu na velikosti defektu a intenzitě signálu. Důležitou roli bude hrát i poloha a poměr

velikosti defektu k rozměrům tělesa. Je ale zřejmé, že tyto metody asi nebudou moci detekovat malé defekty vzhledem k rozměrům tělesa, v případě těles s menším činitelem jakosti (větším tlumením). U těchto metod je částečným omezením, vedle již zmíněné pracnosti, také náročnost vyhodnocení. Výhodou je však možnost využití impulsního buzení s velkým výkonem a spektrální vyhodnocení spolu s lineární akustickou spektroskopií.

3.3 Shrnutí

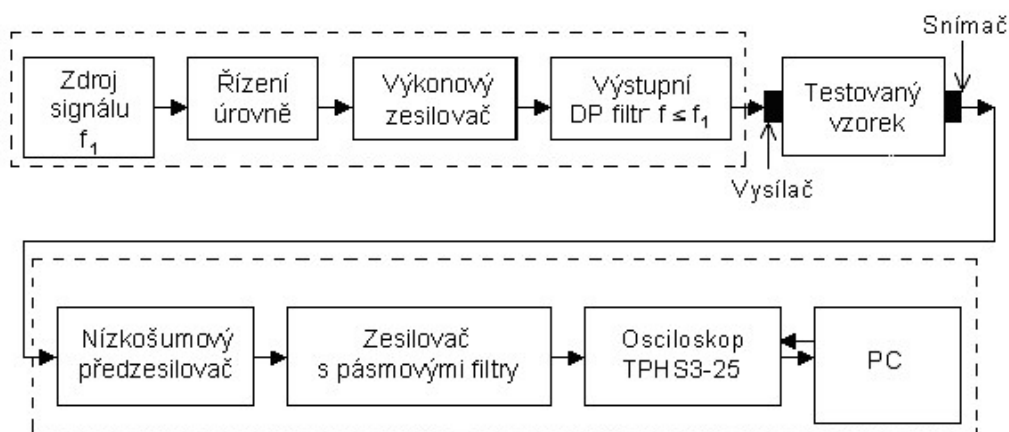
Významného pokroku ve vývoji metod nelineární akustické spektroskopie včetně teoretického modelování a zkoušení v reálných průmyslových podmínkách bylo dosaženo v rámci mezinárodního projektu Evropské vědecké Nadace (European Science Foundation), nazvaného NATEMIS (Nonlinear Acoustic Techniques for Microscale Damage Diagnostics), v letech 2000 až 2005. Základním cílem programu bylo zavedení nelineárních akusticko-ultrazvukových NDE technik pro diagnostiku mikro a mezoskopických poruch v materiálech jako jsou kovy, kompozity, beton, železobeton, stavební hmoty a horniny. Jedna z aplikací výzkumného programu byla zaměřena také na opravu a památkovou péči evropských historických monumentů a kamenných budov. Program NATEMIS byl financován v Belgii, České republice, Estonsku, Itálii, Německu, Španělsku a Švédsku. Od roku 1968 jsou organizována pravidelná zasedání výzkumných pracovníků v tomto oboru „International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA)“, v roce 2018 se bude konat v pořadí již dvacáté první. Symposium je zaměřené výhradně na diskuzi problematiky nelineární akustiky, prezentaci nových poznatků a výměnu zkušeností. V roce 2008 jsem se osobně zúčastnila 18. ISNA ve Švédsku jako spoluautorka příspěvku [36]. Druhou významnou příležitostí pro sdílení poznatků dosažených v zavádění nelineárních technik jsou od roku 2005 každoročně konané konference „International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM)“. Konference jsou zaměřeny na základní výzkum a praktické aplikace a reprezentují aktuální stav a techniku v této oblasti. Osobně jsem se zúčastnila 15. ICNEM 2010 konané v Itálii jako spoluautorka příspěvku [39]. Tato setkání jsou organizována formou workshopů, prezentace příspěvků jsou relativně dlouhé a větší časový prostor je vymezen pro otázky a diskuzi. Konference poskytuje fórum pro výměnu poznatků a navázání spolupráce v mezinárodním výzkumném prostoru s cílem urychlení rozvoje této metodiky.

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 [54], 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 [57].

4.1 Měřicí zařízení s jedním budícím signálem

Měřicí zařízení se sestává ze dvou hlavních částí, vysílací a přijímací (obr. 4.1). Hlavní větev vysílací části obsahuje čtyři bloky.



Obr. 4.1. Blokové schéma měřicího zařízení s jedním budícím signálem.

První blok tvoří generátor harmonického signálu Agilent 33220A s řízením úrovně (obr. 4.2).



Obr. 4.2. Generátor harmonického signálu Agilent 33220A.

Frekvenční rozsah generátoru, funkcí sinus a obdélík, je od 1 μ Hz do 20 MHz. Vynikající je i harmonické zkreslení generovaných signálů. Maximální délka naprogramovaného signálu může být až 64 000 bodů, vertikální rozlišení je 14 bitů.

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. Výkonový zesilovač (obr. 4.3.) byl koncipován pro aplikace, kde je zapotřebí výkonové lineární buzení ultrazvukových měničů harmonickým signálem. Jde především o použití pro metody nelineární ultrazvukové spektroskopie. Pro tyto metody je potřebný výkon v rozsahu od 10 do 100 W (v závislosti na velikosti testovaného vzorku). V důsledku požadavku vysoké linearitě zesílení byla použita pracovní třída B s frekvenčním rozsahem od 1 kHz do 1 MHz. Používá se napájení výstupního zesilovače 120 V, které umožňuje dosáhnout efektivní hodnoty napětí výstupního harmonického signálu až 70 V. Vzhledem k rezonančnímu odporu našich vysílačů ultrazvukového signálu, který je v rozsahu od 100 do 300 Ω , lze tak přímo dosáhnout výkonu asi 50 W. Výkon 50 W lze dosáhnout trvale, vyšší okamžitý výkon je možno využívat v pulsním režimu. To plně vyhovuje praktickému použití, kdy pro uvedené metody není trvalé buzení vysílačů vhodné ani potřebné. Kmitočtový rozsah zesilovače byl navržen pro pásmo 1 kHz až 1 MHz pro plný výkon. Pro nižší výstupní napětí lze pak použít tento zesilovač až do frekvencí 5 Hz.



Obr. 4.3. Řízený výkonový zesilovač pro buzení ultrazvukových vysílačů.

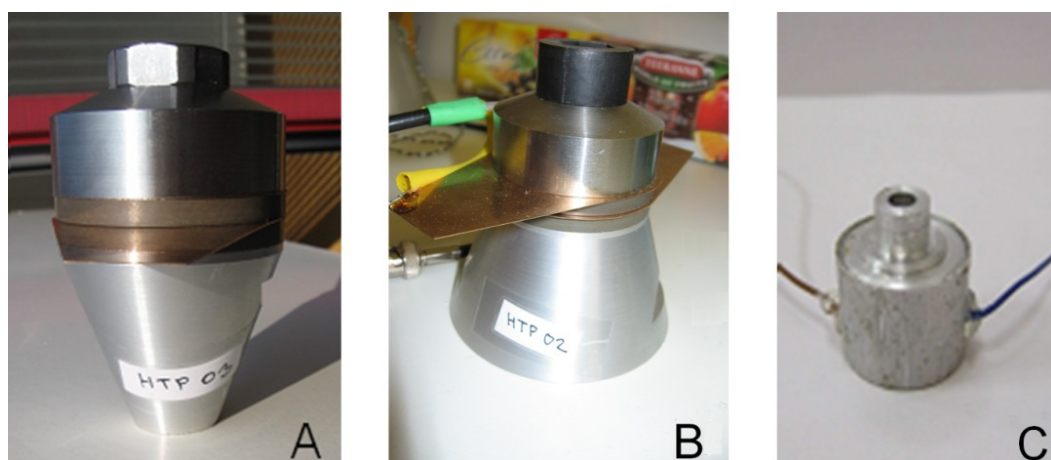
Pro potlačení vyšších harmonických složek a zabezpečení vysoké čistoty budícího harmonického signálu byl použit výstupní filtr typu dolní propust (obr. 4.4.). Má potlačení minimálně 50 dB pro kmitočty druhé a třetí harmonické složky. Součástí filtru je výstupní

transformátor, který umožňuje výkonové přizpůsobení ultrazvukového vysílače výstupu zesilovače.



Obr. 4.4. Výstupní filtr typu dolní propust.

Na základě empirických zkušeností byl firmou 3S Sedlák, s.r.o. navržen a zkonstruován výkonový piezokeramický vysílač ultrazvukového signálu. Zhotoveny a používány byly tři modifikace výkonových piezokeramických vysílačů (obr. 4.5): A – s koncentrátorem mechanického vlnění, B – pro buzení ultrazvuku na deskách, C – pro buzení o vyšších kmitočtech.

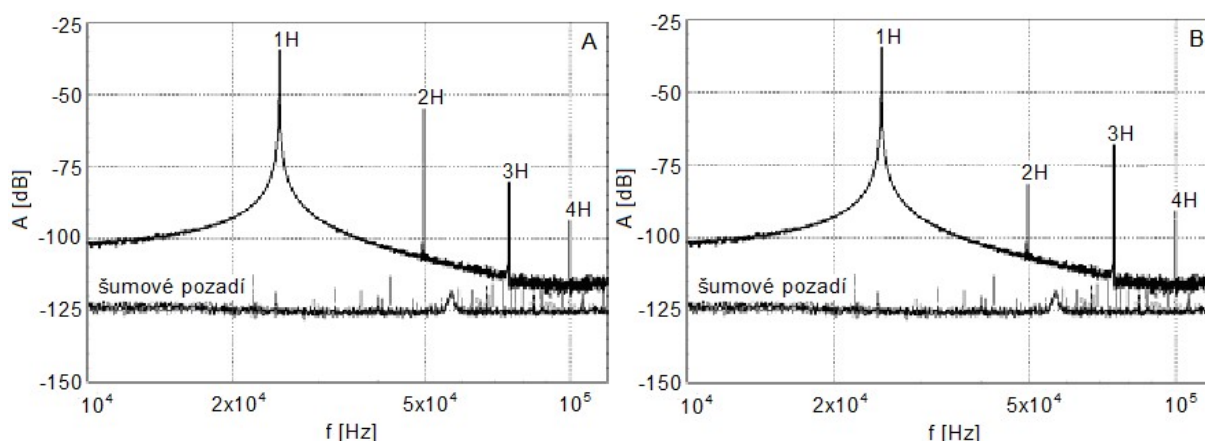


Obr. 4.5. Výkonové piezokeramické vysílače: A – s koncentrátorem mechanického vlnění; B – pro buzení ultrazvuku na deskách; C – pro buzení na vyšších kmitočtech.

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. Výsledky měření ve formě frekvenčních spekter jsou ukládány do paměti PC k dalšímu zpracování. Vzhledem k tomu, že předpokladem pro

správnou interpretaci zaznamenávaných signálů je vysoká kvalita všech měřicích přístrojů, byla věnována velká pozornost testování linearity měřicího řetězce [55].

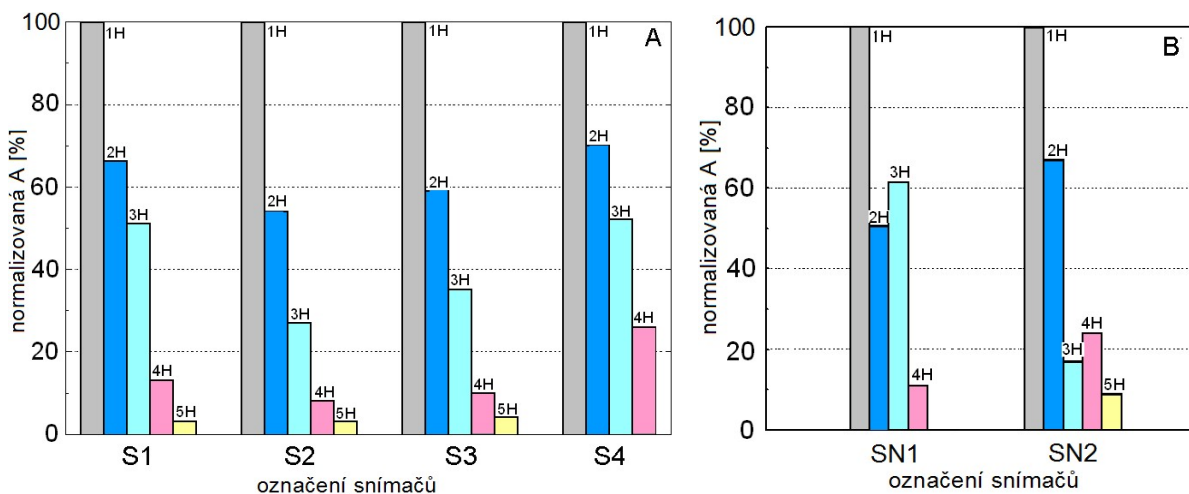
Předmětem testování byl výběr přenosového média a přenos mezi piezokeramickými výkonovými vysílači mechanického vlnění a piezokeramickými snímači. Proměřeno bylo šest kusů snímačů [57]. Odezva na harmonický ultrazvukový signál (o kmitočtu 25 kHz) byla snímána jednak při přímé vazbě snímače s budičem a jednak na neporušeném kovovém etalonu. Na následujících obrázcích jsou pro ilustraci uvedeny ukázky výsledků měření snímače vyhovujícího a snímače vykazujícího parazitní složky. Graf A (obr. 4.6.) zobrazuje frekvenční spektrum odezvy zaznamenané snímačem S4, který reprezentuje snímače vyhovující. Na přenosové charakteristice jsou zvýrazněny první čtyři harmonické složky s klesajícími hodnotami amplitud s rostoucím pořadím harmonických složek. Frekvenční spektrum není zkresleno nelineárními efekty, což vylučuje přítomnost parazitních složek vyvolaných přenosem snímače.



Obr. 4.6. Frekvenční spektra přenosových charakteristik testovaných snímačů: A – vyhovující snímač S4; B – nevyhovující snímač SN1.

Graf B zobrazuje frekvenční spektrum snímače označeného SN1, který reprezentuje snímače nevyhovující. Přenosová křivka vykazuje dvě dominantní frekvenční složky: první 1H – budící frekvenci a třetí 3H harmonickou. Hodnota amplitudy druhé 2H harmonické je nižší ve srovnání s třetí 3H harmonickou, což je zřejmě způsobeno výskytem parazitní složky při přenosu signálu. Výsledky měření všech šesti kusů snímačů jsou uvedeny na obr. 4.7. V grafech jsou porovnány relativní hodnoty amplitud harmonických frekvencí normalizované na amplitudu první harmonické frekvence. Graf A odpovídá snímačům vyhovujícím

s označením: S1, S2, S3, S4. Všechny čtyři snímače vykazují postupný pokles amplitud vyšších harmonických frekvencí bez nelineárních efektů.



Obr. 4.7. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí: A – snímače vyhovující; B – snímače nevhovující.

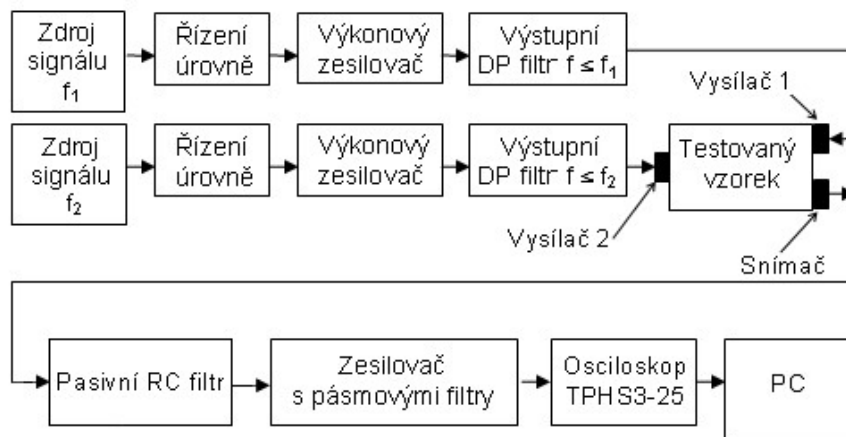
Graf B zobrazuje výsledky měření snímačů nevhovujících. Z grafu je patrné, že oba nevhovující snímače SN1, SN2 nespĺňují podmínku nezbytné linearit y při přenosu signálu. Ve spektru odezvy zaznamenané snímačem SN1 dosahuje amplituda třetí 3H harmonické vyšší hodnoty oproti druhé 2H harmonické. Ve spektru odezvy odpovídající snímači SN2 je hodnota amplitudy čtvrté 4H harmonické vyšší oproti třetí 3H harmonické. V obou případech se jedná o snímače nevhovující.

Uvedené výsledky měření potvrzují nutnost znalosti přenosové charakteristik y snímače pro interpretaci výsledků na konkrétních vzorcích, jen tak lze vyloučit možnost, aby zkreslení způsobené snímačem bylo přisuzováno strukturním vadám ve vzorku. Jako vhodné vazební medium pro připojení vysílače a snímače byl vybrán včelí vosk, který současně zajišťuje dostatečně pevný a snadno rozebíratelný spoj.

4.2 Měřicí zařízení se dvěma budícími signály

Schéma měřicího zařízení sestaveného pro metodu se dvěma budícími signály je zobrazeno na obr. 4.8. Vysílací část měřicího zařízení s jedním budícím signálem (obr. 4.1.) byla doplněna o druhou vysílací větev. Přijímací část byla doplněna pasivním filtrem s dolní propustí a byl použit nízkofrekvenční snímač. Oba tyto prvky byly speciálně zhotoveny v rámci řešení

grantového projektu. Měřicí zařízení zobrazené na obr. 4.8. lze alternativně využívat pro obě uvedené metody.



Obr. 4.8. Blokové schéma měřicího zařízení se dvěma budícími signály.

5 APLIKACE METOD NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE

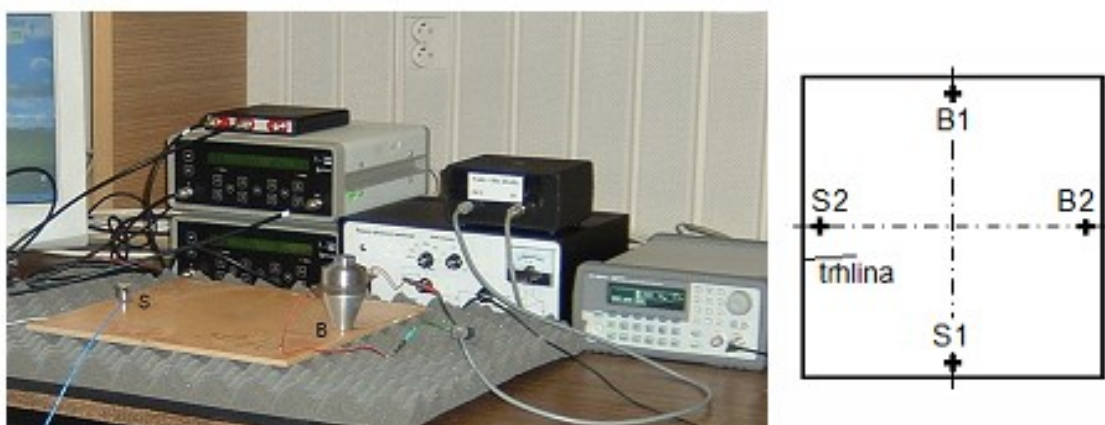
Rozsáhlé experimentální práce byly zaměřeny na statisticky podloženou analýzu naměřených dat a ověřování mezi pro vytvoření měřicích metodik pro aplikace ve stavebnictví. Předmětem experimentů byly stavební materiály: keramika, kámen, beton, železobeton a předpínací ocelová lana.

5.1 Obkladové prvky z druhotných surovin

Testován byl prototyp keramického obkladového prvku skupiny BIII podle ČSN EN 14411 na bázi popílkojílového střepu. Proměřovány byly dva typy těchto vzorků (označených A, C) o rozměrech 150 mm × 150 mm × 4 mm. Jednotlivé typy se vzájemně lišily obsahem popílkojílového střepu.

5.1.1 Popis vzorků

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. 5.1. [36, 56, 58].

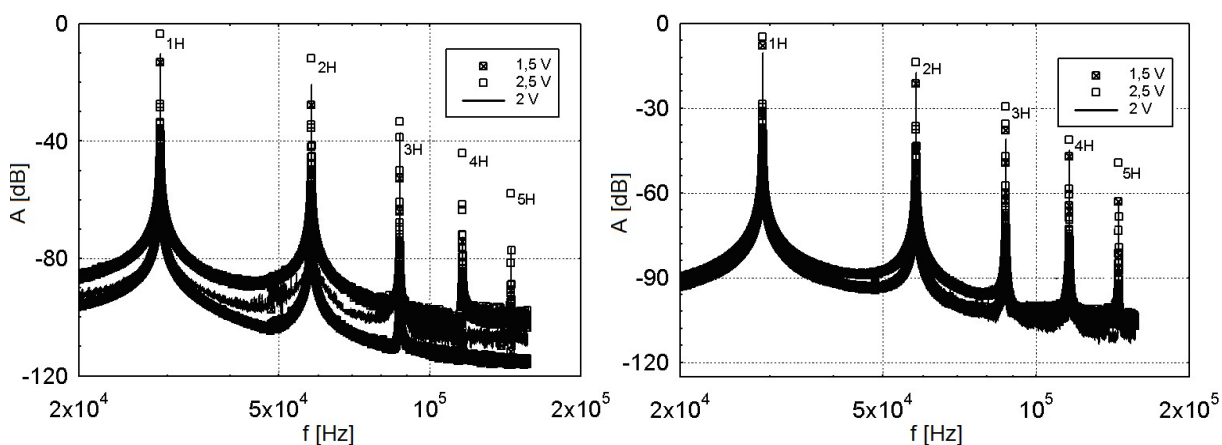


Obr. 5.1. Uspořádání experimentu: vlevo – měřicí zařízení s testovaným vzorkem; vpravo – schéma vzájemných konfigurací budiče B a snímače S na vzorku s trhlinou.

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. 5.1. – vpravo). Pro buzení byl použit vysílač B (budič) s koncentrátorem harmonického ultrazvukového signálu o kmitočtu $f_i = 29$ kHz, připojení budiče a snímače bylo provedeno pomocí včelího vosku. Na intaktních vzorcích obou typů (A, C1) bylo zkoumáno zda nehomogenní struktura materiálu obsahující popílkový stěp není zdrojem nelineárních jevů při přenosu signálu. Na vzorku C2 s viditelnou trhlinou byl sledován vliv trhliny na procházející signál. Z důvodu amplitudové závislosti nelineárních efektů byla v první fázi měření pozornost zaměřena na vliv budícího napětí na přenosové charakteristiky. Měření byla realizována pro tři různé hodnoty napětí budícího signálu: 1,5 V; 2 V a 2,5 V.

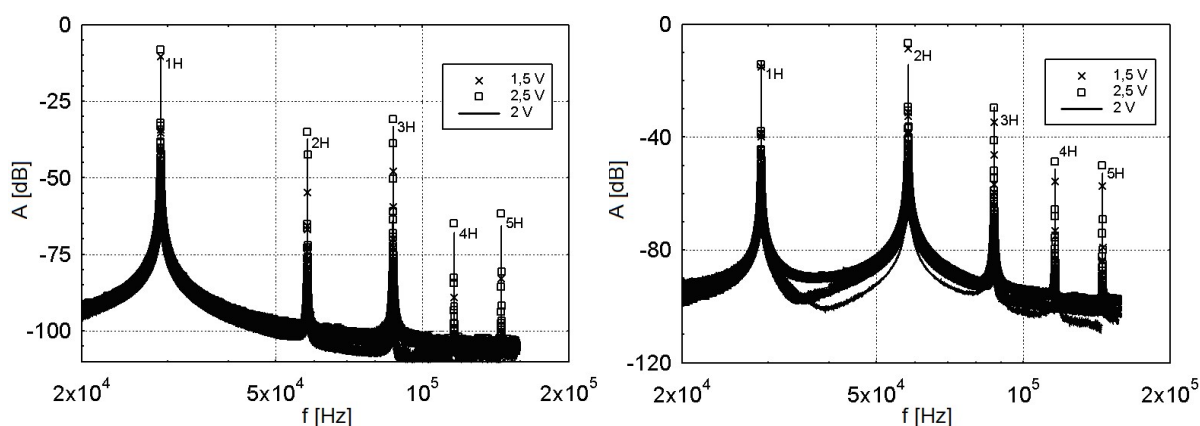
5.1.2 Výsledky měření

Výsledky měření jsou graficky zobrazeny na obr. 5.2. Frekvenční spektra (graf vlevo) odpovídají intaktnímu vzorku A při první konfiguraci budiče a snímače. Z grafu je patrný postupný pokles amplitud s rostoucím pořadovým číslem harmonických frekvencí pro všechny tři hodnoty napětí budícího signálu. Obdobné výsledky vykazovalo i měření při druhé konfiguraci budiče a snímače. Graf uvedený vpravo (obr. 5.2.) odpovídá výsledkům měření intaktního vzorku C1. Rovněž v tomto případě je z frekvenčních spekter patrné, že se v přenosových charakteristikách nevyskytují nelineární efekty. Srovnatelné výsledky byly dosaženy i při druhé konfiguraci budiče a snímače.



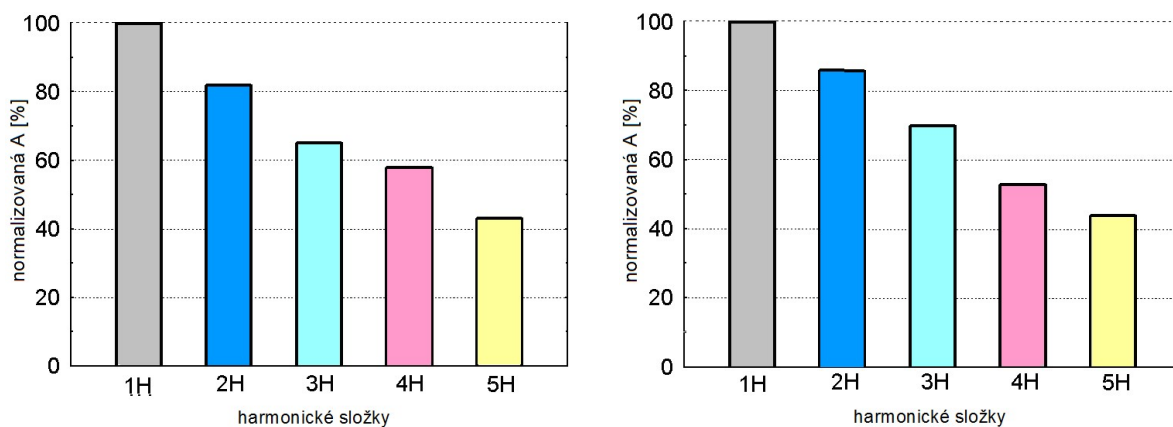
Obr. 5.2. Frekvenční spektra přenosových charakteristik intaktních vzorků v závislosti na hodnotě napětí budícího signálu: vlevo – vzorek A; vpravo – vzorek C1.

Obr. 5.3 zobrazuje analogicky výsledky měření vzorku C2 s viditelnou trhlinou. Graf vlevo odpovídá měření vzorku při první konfiguraci budiče a snímače. Ve frekvenčním spektru dominuje mezi vyššími harmonickými složkami amplituda třetí 3H harmonické a současně amplituda páté 5H harmonické řevyšuje amplitudu čtvrté 4H harmonické pro všechny tři hodnoty napětí budícího signálu. Graf uvedený vpravo reprezentuje výsledky měření vzorku C2 při druhé konfiguraci budiče a snímače (dle obr. 5.1.) – snímač byl umístěn v blízkosti trhliny. Ve frekvenčním spektru dominuje druhá 2H harmonická frekvence a srovnatelné hodnoty amplitud vykazují čtvrtá 4H a pátá 5H harmonická frekvence.



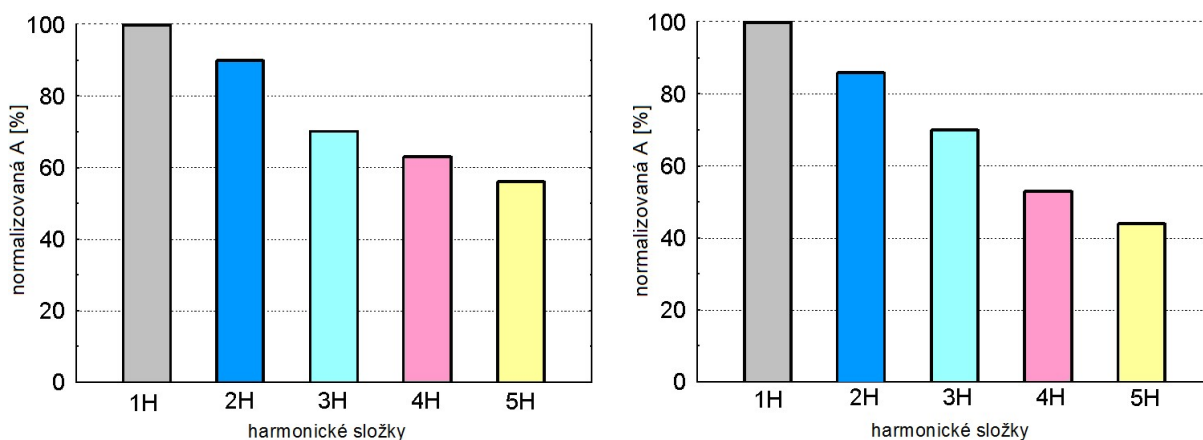
Obr. 5.3. Frekvenční spektra přenosových charakteristik poškozeného vzorku C2 v závislosti na hodnotě napětí budícího signálu: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Na následujících obrázcích jsou porovnány amplitudy vyšších harmonických frekvencí normalizované na hodnotu amplitudy první harmonické frekvence, při buzení signálem o hodnotě budícího napětí 2 V. Grafy na obr. 5.4. odpovídají intaktnímu vzorku typu A.



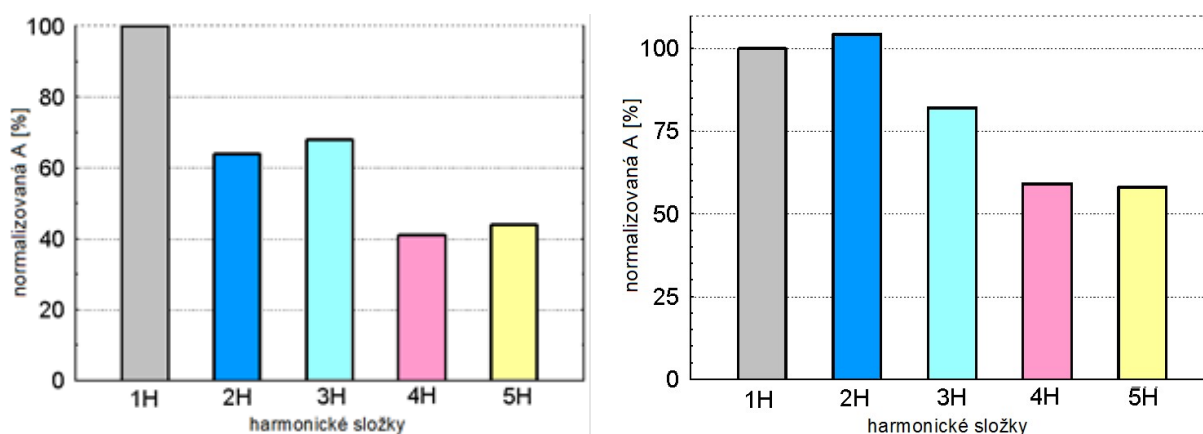
Obr. 5.4. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí intaktního vzorku A: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Grafy na obr. 5.5. analogicky zobrazují výsledky měření vzorku typu C s neporušenou strukturou označeného C1.



Obr. 5.5. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí intaktního vzorku C1: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Grafy odpovídající intaktním vzorkům A, C1 se vyznačují poklesem hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí s jejich rostoucím pořadovým číslem. Při obou variantách měření nejsou v grafech patrné projevy nelinearity. Následující obr. 5.6 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. 5.6. 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 intaktních vzorků (obr. 5.4. a 5.5.). Výsledky měření při druhé konfiguraci budiče a snímače (obr. 5.6. – 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.

5.1.3 Diskuze výsledků

Intaktní vzorky s neporušenou strukturou byly předmětem zkoumání, zda nehomogenní struktura vzorku není zdrojem nelineárních jevů při přenosu signálu. Výsledky měření prokázaly, že v případě nelineární ultrazvukové spektroskopie je vliv nehomogenity materiálu na bázi popílkovitého střepu minimální – jeho nelineární projev je podstatně nižší než u běžných defektů. Přenosová charakteristika intaktních vzorků neobsahovala nelineární efekty. Hodnoty amplitud vyšších harmonických složek vykazovaly postupný pokles s jejich rostoucím pořadovým číslem. Stejných výsledků bylo dosaženo ve dvou vzájemně kolmých konfiguracích budiče a snímače.

Vzorek s viditelnou trhlinou byl zdrojem nelinearity při přenosu signálu. V přenosových charakteristikách se vyskytovaly nelineární efekty v případě obou proměřovaných konfigurací budiče a snímače. Průběh přenosových křivek se vzájemně lišil podle polohy snímače vzhledem k trhlině. Při vzdálenější poloze snímače od trhliny – první konfiguraci budiče a snímače, vykazovaly liché harmonické frekvence, třetí 3H a pátá 5H, vyšší hodnoty amplitud oproti předcházejícím sudým, druhé 2H a čtvrté 4H harmonické frekvenci. V případě umístění snímače v blízkosti trhliny – druhé konfigurace budiče a snímače, byla patrná anomálie. Amplituda druhé 2H harmonické frekvence převyšovala hodnotu amplitudy první 1H harmonické – budící frekvence. Amplitudy čtvrté 4H a páté 5H harmonické vykazovaly srovnatelné hodnoty.

5.2 Keramické dlaždice

Další zkušební vzorky, ze skupiny keramických materiálů, byly za sucha lisované glazované keramické dlaždice o rozměrech 330 mm × 330 mm × 9 mm. Výrobce RAKO vedená plošná hmotnost činila 23 kg/m², otěruvzdornost IV. Metodou nelineární ultrazvukové

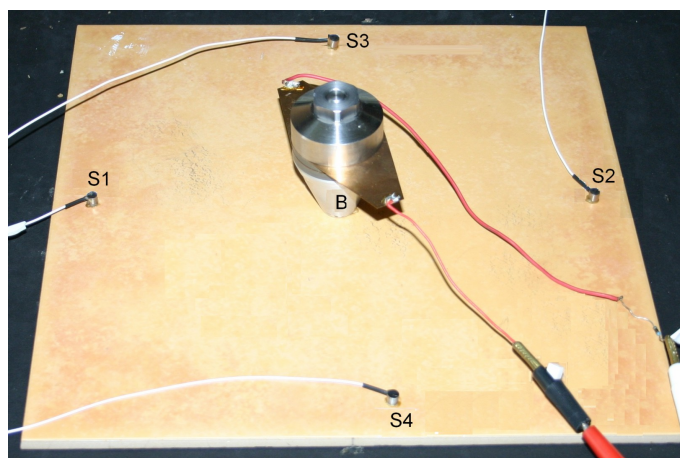
spektroskopie s jedním budícím signálem byly testovány keramické dlaždice dodané z výroby jako kvalitativně vyhovující [38, 56, 64].

5.2.1 Příprava experimentu

Keramické dlaždice byly rozděleny do tří skupin:

- v první skupině byly dlaždice zachovány v dodaném stavu – označení A
- druhá skupina dlaždic byla degradována třemi sty zmrazovacími cykly – označení B
- třetí skupina dlaždic byla vystavena čtyřem degradačním cyklům v parách tekutého dusíku – označení C.

V první fázi byla provedena měření pro optimalizaci vzájemné konfigurace budiče a snímače na glazovaném povrchu keramických dlaždic. Pozice budiče B byla stanovena uprostřed vzorku, pro umístění snímače S byly testovány čtyři pozice (obr. 5.7). Měření bylo realizováno na horním (glazovaném) i na spodním (neglazovaném) povrchu. Odezva na budící signál byla snímána na plochách i na hranách vzorků.

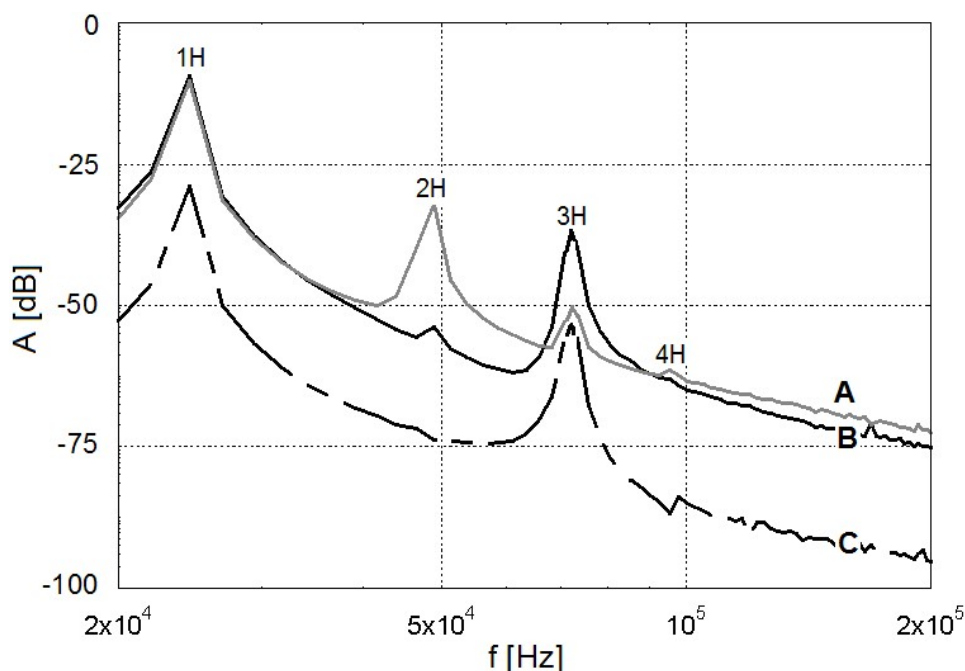


Obr. 5.7. Keramická dlaždice s vyznačenou polohou budiče B a čtyř pozic snímače (S1–S4) na glazovaném povrchu.

5.2.2 Výsledky měření

Prezentovány jsou výsledky měření při umístění snímače na pozici S1. V grafech na následujících obrázcích jsou porovnány vždy tři křivky zobrazující frekvenční spektra vzorků reprezentujících jednotlivé skupiny. Křivka A odpovídá vzorku intaktnímu (bez defektu), křivka B odpovídá vzorku poškozenému teplotním zatěžováním (třemi sty zmrazovacími

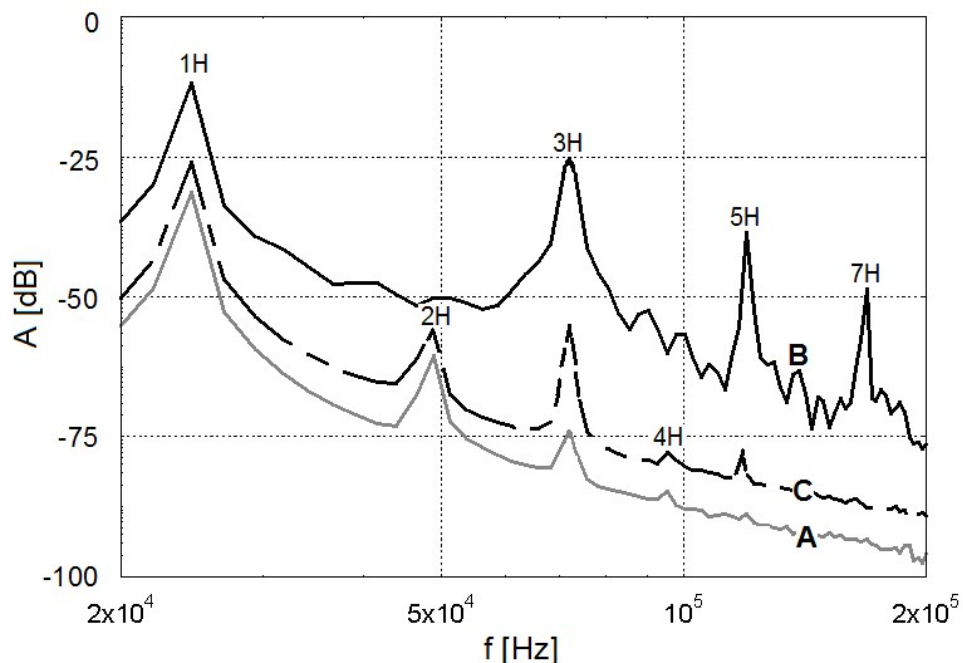
cykly) a křivka C odpovídá vzorku podrobenému čtyřem degradačním cyklům v parách tekutého dusíku. Obr. 5.8. zobrazuje frekvenční spektra z měření na glazovaném povrchu.



Obr. 5.8. Frekvenční spektra přenosových charakteristik z měření na glazovaném povrchu. Křivka A – intaktní vzorek; B – vzorek po teplotním namáhání; C – po aplikaci degradačních cyklů.

Na křivce A, vzorek nebyl teplotně zatěžován, jsou signifikantní první čtyři harmonické frekvenční složky. Jejich amplitudy vykazují lineární pokles s rostoucím pořadím vyšších harmonických. V případě křivky B, vzorek po teplotním zatěžování třemi sty zmrazovacími cykly, je ve frekvenčním spektru odezvy patrný projev nelinearity. Dominantní jsou dvě frekvenční složky – první 1H a třetí 3H harmonická, jejichž amplitudy dosahují srovnatelných hodnot. Mírně jsou zvýrazněny druhá 2H a sedmá 7H harmonická složka. Křivka C odpovídá vzorku dlaždice podrobené čtyřem degradačním cyklům v parách tekutého dusíku. Rovněž v tomto spektru dominují dvě frekvenční složky se srovnatelnými hodnotami amplitud – první 1H a třetí 3H harmonická frekvence. Potlačeny jsou sudé harmonické složky, nepatrně je zvýrazněna pouze čtvrtá harmonická 4H. Opět je ve frekvenčním spektru patrný projev nelinearity.

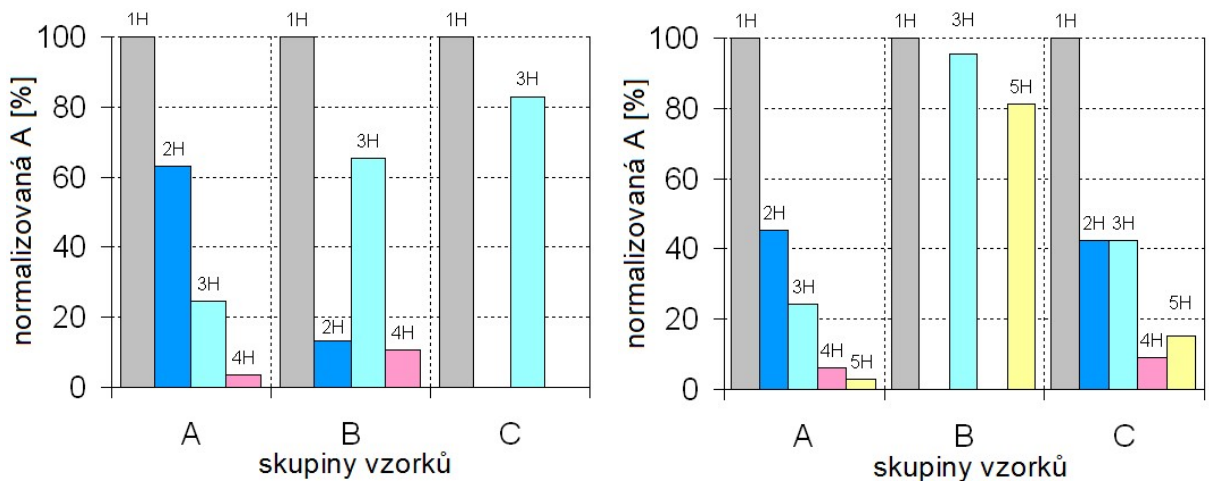
Frekvenční spektra přenosových charakteristik dlaždic při měření na neglazovaném povrchu jsou analogicky zobrazena na obr. 5.9.



Obr. 5.9. Frekvenční spektra přenosových charakteristik z měření na neglazovaném povrchu. Křivka A – intaktní vzorek; B – vzorek po teplotním namáhání; C – po aplikaci degračních cyklů.

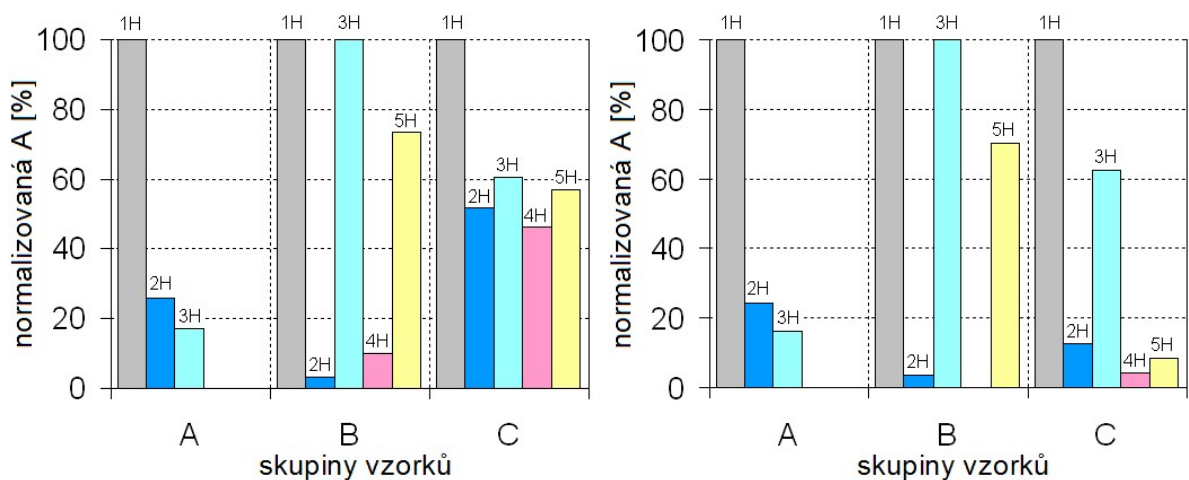
Frekvenční spektrum A, odpovídající dlaždici nezatěžované, opět vykazuje postupný pokles amplitud s rostoucím pořadím harmonických složek. Křivka B (po třech stech zmrazovacích cyklech) obsahuje čtyři dominantní srovnatelné hodnoty na lichých harmonických složkách první 1H, třetí 3H, páté 5H a sedmé 7H harmonické. Sudé harmonické složky jsou zcela potlačeny. Ve frekvenčním spektru C, odpovídajícím vzorku po čtyřech degračních cyklech v parách dusíku, se uplatňuje pět harmonických složek. Vyšší hodnoty amplitud jsou patrné opět na lichých frekvenčních složkách. Hodnota amplitudy třetí 3H harmonické dosahuje vyšší hodnoty v porovnání s druhou 2H harmonickou. Rovněž amplituda páté 5H harmonické převyšuje hodnotu amplitudy čtvrté 4H harmonické. V obou frekvenčních spektrech B i C se projeví nelineární efekty generované poškozenou integritou struktury v důsledku teplotního namáhání vzorků.

Vzájemné porovnání výsledků měření jednotlivých souborů vzorků (A, B, C) je zobrazeno na obr. 5.10. Každý soubor je reprezentován třemi vzorky. V grafech jsou zobrazeny zprůměrované hodnoty amplitud vyšších harmonických normalizované na hodnotu amplitudy první harmonické frekvence, pro jednotlivé skupiny vzorků. Graf vlevo odpovídá měření dlaždic na glazovaném povrchu, graf vpravo odpovídá měření na neglazovaném povrchu.



Obr. 5.10. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí jednotlivých skupin vzorků: vlevo – měření na glazovaném povrchu; vpravo – měření na neglazovaném povrchu.

Zprůměrované hodnoty vykazují poznatky shodné s grafy na obr. 5.8. a 5.9. Skupina vzorků A, teplotně nezatežovaných, nevykazuje nelineární efekty v přenosových charakteristikách. Ve skupinách vzorků B a C jsou výrazně potlačeny, případně zcela vymizely, sudé harmonické frekvence. Porušená struktura vzorků v důsledku teplotního namáhání generovala nelineární efekty při přenosu budícího signálu. Na následujícím obr. 5.11 jsou pro ilustraci uvedeny přenosové charakteristiky zaznamenané snímačem umístěným na hraně dlaždice.



Obr. 5.11. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí jednotlivých skupin vzorků při snímání odezvy na hraně vzorku: vlevo – buzení na glazovaném povrchu; vpravo – buzení na neglazovaném povrchu.

Snímač byl umístěn na hraně dlaždice na souřadnici S1, budič byl umístěn uprostřed dlaždice na glazovaném i neglazovaném povrchu (dle obr. 5.7.). Graf zobrazený na obr. 5.11. vlevo odpovídá umístění budiče na glazovaném povrchu, graf zobrazený vpravo odpovídá umístění budiče na neglazovaném povrchu. V obou grafech je opět patrný postupný pokles normalizovaných hodnot amplitud harmonických v případě vzorků skupiny A (teplotně nezatěžovaných) a výskyt nelineárních efektů v případě vzorků skupin B a C (teplotně zatěžovaných).

5.2.3 Diskuze výsledků

Výsledky měření na vzorcích keramických dlaždic potvrdily, že nelineární techniky jsou vysoce citlivé metody pro detekci ranných stádií poškození. Vznik strukturních defektů v důsledku teplotního zatěžování vzorků se projevil nelineárním nárůstem amplitud lichých harmonických frekvencí, a to jak třetí 3H, tak páté 5H harmonické, přičemž výraznější byl nárůst amplitudy třetí 3H harmonické frekvence.

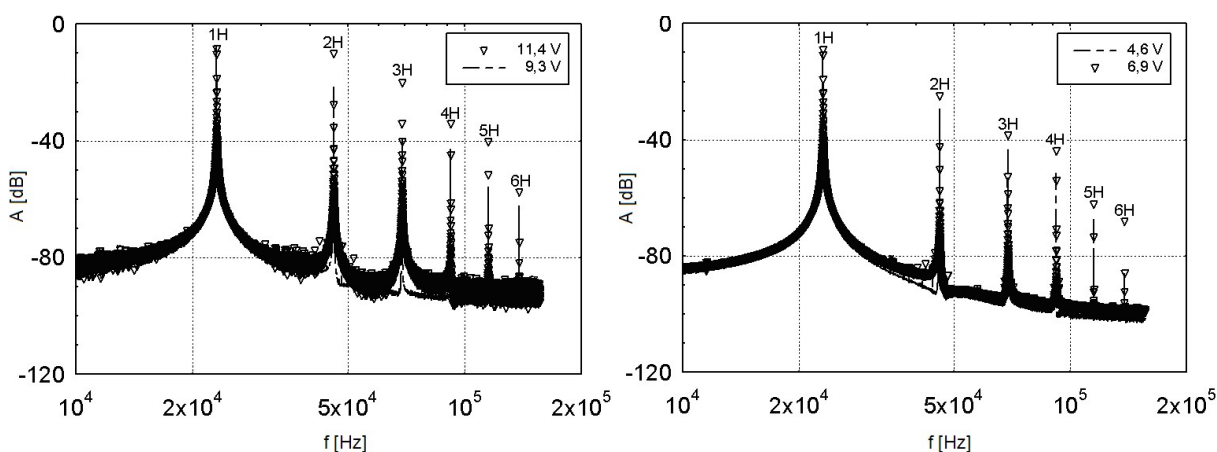
5.3 Stropní desky Hurdis

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 vyřadit vadné desky zavedením nedestruktivní metody do výstupní kontroly ve výrobě. Spolupracovala jsem na výzkumu metody impact-echo z hlediska možnosti jejího využití pro diagnostiku samostatných stropních desek a pro sledování důsledků objemových změn v deskách vlivem smršťování nadbetonovaného cementového potěru [33, 54]. Cílem navazujícího výzkumu bylo využít znalosti nelineárních efektů vznikajících při šíření ultrazvukového vlnění v pevných látkách a kombinací procedur nelineární ultrazvukové spektroskopie se stávajícími metodami dosáhnout zvýšení výtěžnosti a spolehlivosti dosavadních metod pro výše uvedené problematické stropní konstrukce s deskami Hurdis. Výzkumná práce byla finančně podpořena tříletým projektem GAČR č. 103/06/P401 „Diagnostika stropních konstrukcí z desek HURDIS metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie“ [41, 61].

5.3.1 Příprava experimentu

Testovány byly stropní desky o rozměrech 117 cm × 25 cm × 7,5 cm, poskytnuté stavební firmou. Dodány byly jak desky nepoškozené, tak i desky s viditelnými trhlinami. Aplikovány byly obě výše popsané 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. 4.2.), 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. Zkoumány byly přenosové charakteristiky nepoškozených stropních desek pro různé intenzity (hodnoty napětí) budícího signálu [43]. Výsledky měření nepoškozených stropních desek reprezentuje deska N1 (obr. 5.12.), V grafu vlevo je zobrazena frekvenční závislost přenosových charakteristik pro dvě hodnoty budícího napětí: 11,4 V a 9,3 V.



Obr. 5.12. Závislost přenosových charakteristik na hodnotě napětí budícího signálu – nepoškozená stropní deska N1.

Ve frekvenčním spektru odpovídajícím budícímu napětí o hodnotě 11,4 V dosahuje amplituda druhé 2H harmonické frekvence téměř srovnatelné hodnoty jako první 1H harmonická (budící) frekvence. Pokles amplitud s rostoucím pořadím vyšších harmonických nevykazuje v tomto případě lineární průběh. V případě budícího napětí o hodnotě 9,3 V je v grafu patrný postupný pokles amplitud vyšších harmonických s jejich rostoucím pořadovým číslem. Ve frekvenčním spektru jsou zastoupeny postupně klesající frekvenční složky až do šesté 6H harmonické frekvence. Graf (obr. 5.12. – vpravo) porovnává frekvenční spektra odezvy téhož vzorku při budícím signálu o hodnotách napětí 6,9 V a 4,6V. Obě frekvenční spektra vykazují

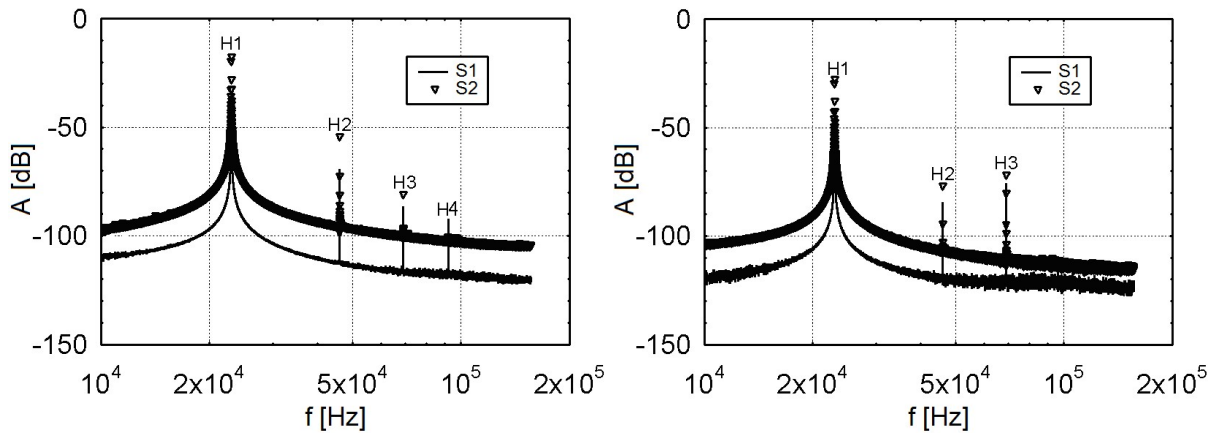
obdobný průběh, výrazně nižší hodnoty dosahuje pouze amplituda šesté 6H harmonické v případě budícího napětí o hodnotě 4,6 V. Z hlediska nelinearity tedy vyhovují budící signály o hodnotách napětí v rozsahu 4,6 V až 9,3 V. Při následujících měřeních bylo buzení realizováno harmonickým ultrazvukovým signálem o kmitočtu 23 kHz a hodnotě budícího napětí 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 nachází na protilehlém konci podélné osy vzhledem k budiči B, pozice snímače S2 uprostřed stropní desky (obr. 5.13.).



Obr. 5.13. Ukázka stropní desky s vyznačenou polohou budiče B a pozicemi snímače (S1, S2) při aplikaci metody s jedním budícím signálem.

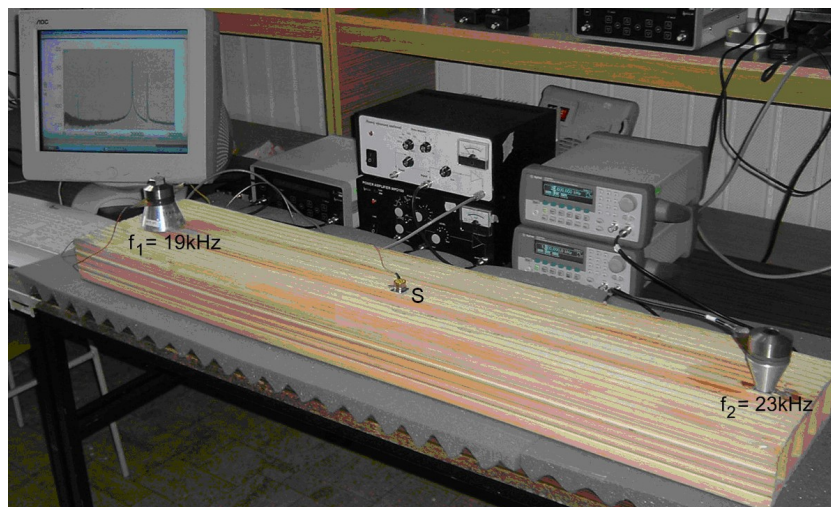
5.3.2 Výsledky měření

Výsledky měření intaktní stropní desky N1 pro obě pozice snímače zobrazuje graf uvedený vlevo na obr. 5.14. Z grafu je patrný pokles amplitud frekvenčních složek s rostoucím pořadím vyšších harmonických frekvencí. V přenosových charakteristikách se nevyskytují nelineární efekty. Graf, na tomtéž obrázku uvedený vpravo, 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.



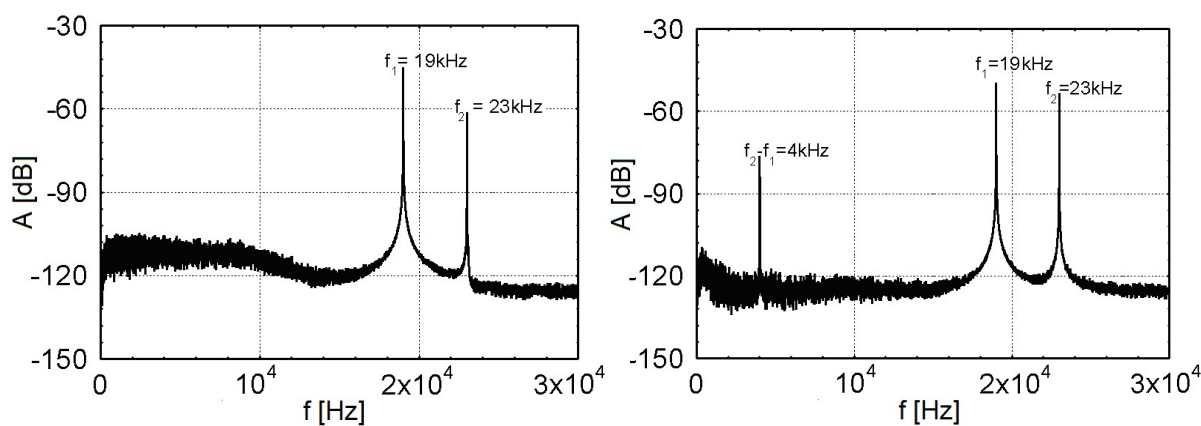
Obr. 5.14. Frekvenční spektra přenosových charakteristik stropních desek: vlevo – nepoškozená deska N1; vpravo – deska s trhlinou T1. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

Ve druhé fázi experimentu byly desky proměřeny metodou se dvěma budícími ultrazvukovými signály [60]. Budiče byly umístěny na protilehlých koncích desky, snímač uprostřed stropní desky (obr. 5.15.).



Obr. 5.15. Konfigurace budičů (B1, B2) a snímače S při buzení stropní desky dvěma harmonickými ultrazvukovými signály ($f_1 = 19 \text{ kHz}$, $f_2 = 23 \text{ kHz}$).

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. 5.16.



Obr. 5.16. 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 budících kmitočtů $\Delta f = 4$ 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 budících kmitočtů na hodnotě 4 kHz, generovaná v důsledku poškozené struktury desky.

5.3.3 Diskuze výsledků

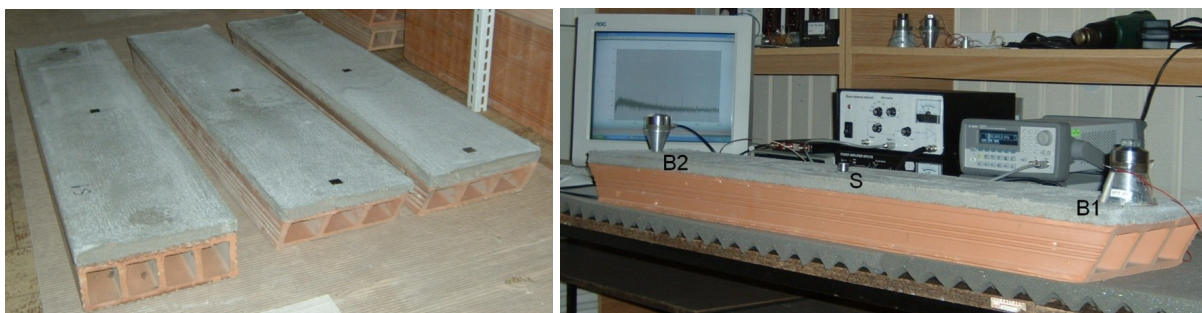
Poškozená struktura stropních desek Hurdis produkovala nelineární efekty při přenosu signálu. Při aplikaci metody s jedním budícím signálem byla ve frekvenčním spektru zvýrazněna třetí harmonická oproti druhé harmonické frekvenci. Na přenosových křivkách byl patrný vyšší útlum signálu, absolutní hodnoty amplitud harmonických frekvencí dosahovaly nižších hodnot, ve srovnání s nepoškozenou stropní deskou. Přičemž od čtvrtého pořadového čísla se vyšší harmonické složky ve frekvenčním spektru nevyskytovaly. Při použití metody se dvěma budícími signály se v případě intaktních desek ve frekvenčních spektrech nevyskytovaly rozdílové frekvenční složky budících kmitočtů. V případě desek s porušenou strukturou ve frekvenčních spektrech dominovala výrazná amplituda na první rozdílové složce dvou budících kmitočtů.

Při aplikaci obou metod, s jedním i se dvěma budícími harmonickými ultrazvukovými signály, byla prokázána korelace nelineárních efektů ve frekvenčních spektrech odezvy se strukturálními defekty v testovaných stropních deskách. Provedená měření ověřila vhodnost použití metody nelineární ultrazvukové spektroskopie pro diagnostiku strukturální celistvosti

stropních desek Hurdis. Na základě analýz výsledků byly optimalizovány hodnoty budících kmitočtů a budících napětí.

5.4 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. 5.17.).



Obr. 5.17. Ukázka testovaných sendvičů. Vpravo – konfigurace budičů a snímače při metodě se dvěma budícími ultrazvukovými signály.

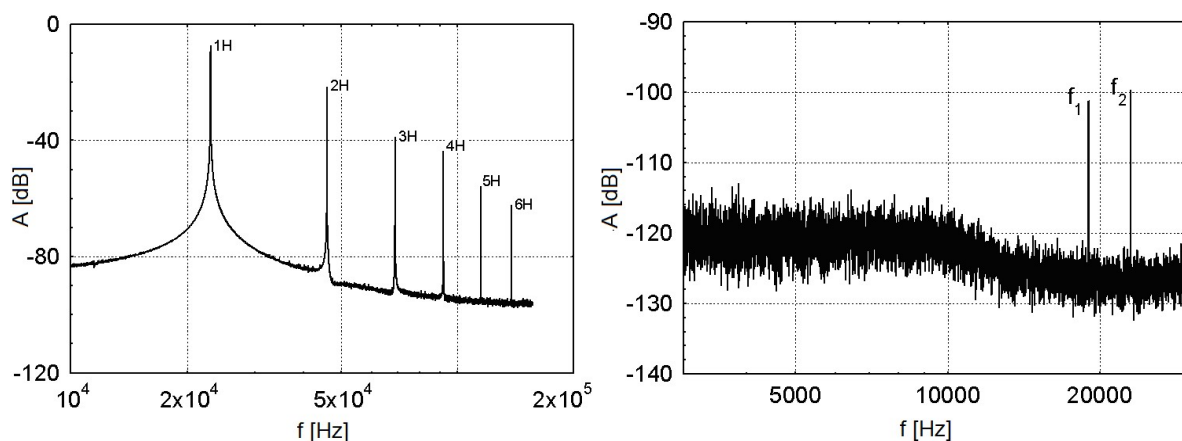
5.4.1 Popis experimentu

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 přitmeleny ocelové podložky [62]. 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 Hurdis 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.

5.4.2 Výsledky měření

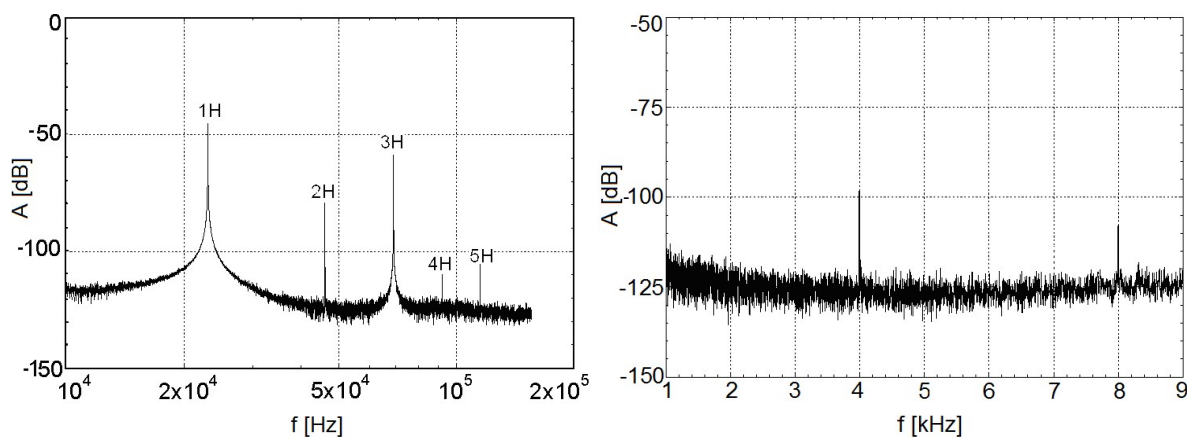
Na obr. 5.18. jsou pro porovnání uvedeny výsledky měření intaktní stropní desky N3 před vytvořením sendviče – nadbetonováním vrstvy. Graf uvedený vlevo odpovídá měření s jedním budícím signálem o kmitočtu 23 kHz při umístění snímače na pozici S2.

Z frekvenčního spektra odezvy je patrný postupný pokles vyšších harmonických bez nelineárních efektů. Graf na obr. 5.18., uvedený vpravo, odpovídá výsledkům měření se dvěma budícími signály ($f_1 = 19$ kHz; $f_2 = 23$ kHz). Z frekvenčního spektra odezvy je patrné, že první rozdílová složka budících kmitočtů na hodnotě 4 kHz nepřesáhla hodnotu šumového pozadí.



Obr. 5.18. Frekvenční spektra přenosových charakteristik intaktní desky N3: vlevo – buzení jedním signálem; vpravo – buzení dvěma signály ($f_1 = 19$ kHz; $f_2 = 23$ kHz).

Frekvenční spektra sendviče SN3 (z uvedené stropní desky N3) z měření po dvaceti osmi dnech od zhotovení vykazují podstatné změny (obr. 5.19.). Graf, zobrazený na obr. 5.19. vlevo, zobrazuje přenosovou charakteristiku z měření s jedním budícím signálem.



Obr. 5.19. Frekvenční spektra přenosových charakteristik sendviče SN3: 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 N3. 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. Opět byly aplikovány signály o kmitočtech blízkých hodnot, $f_1 = 19$ kHz; $f_2 = 23$ kHz. Ve frekvenčním spektru odpovídající samostatné desce N3 se rozdílové složky budících kmitočtů nevyskytovaly. V případě sendviče SN3, 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.

5.4.3 Diskuze výsledků

V přenosových charakteristikách sendvičů zhotovených z nepoškozených stropních desek se projevíly nelineární efekty vyvolané vznikem trhlin ve stojinách desek již po sedmi dnech od jejich zhotovení. Amplitudy lichých harmonických frekvencí, třetí a páté, dosahovaly vyšších hodnot oproti sudým, druhé a čtvrté harmonické. Při aplikaci metody se dvěma budícími signály blízkých kmitočtů, byla přímo detekována první rozdílová složka těchto kmitočtů, ve frekvenčním spektru byla zvýrazněna i její druhá harmonická frekvence.

Realizované experimenty potvrdily vznik trhlin ve stropní desce během prvních sedmi dnů po nadbetonování vrstev, způsobené zřejmě v důsledku objemových změn vlivem smršťování betonové mazaniny. V případě sendvičů s malou přídržností desky s betonovou vrstvou (potěrem) došlo k oddělení nadbetonované vrstvy, což umožnilo samostatnou dilataci jak desky, tak i potěru (betonu) a nedošlo ke vzniku trhlin ve stropních deskách.

5.5 Kamenné bloky

Testovány byly kamenné bloky vyjmuté z lícního zdiva Karlova mostu (obr. 5.20.), 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 [48].



Obr. 5.20. Pohled na Karlův most.

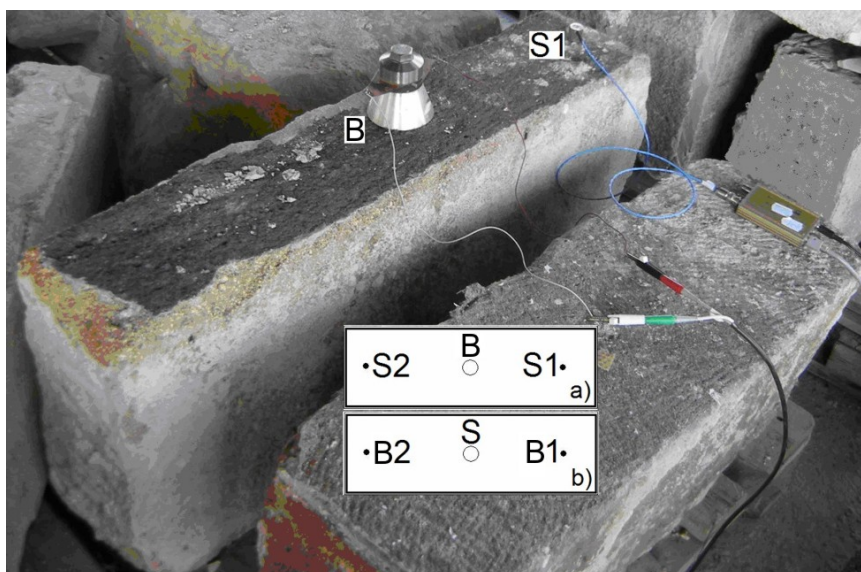
5.5.1 Popis experimentu

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 výše uvedené 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 [47].

5.5.2 Výsledky měření

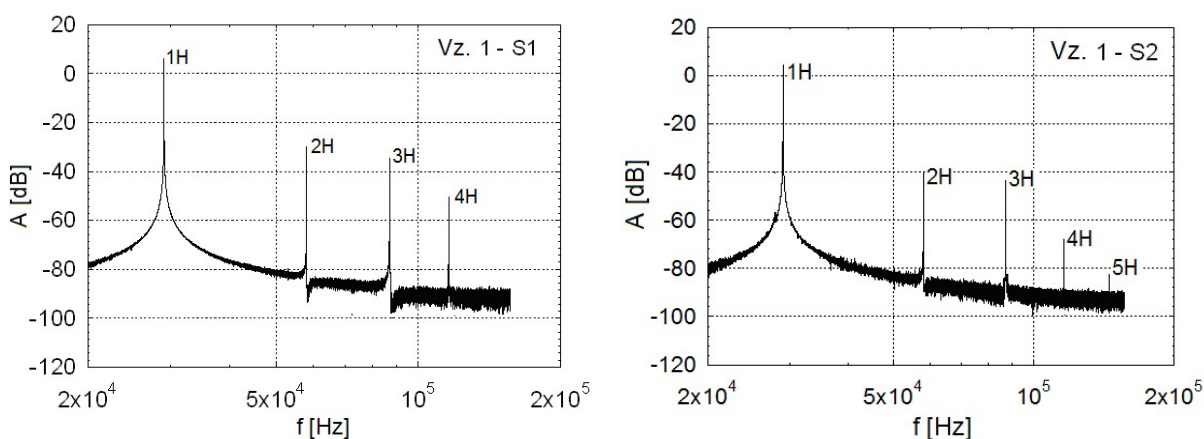
Jako první jsou prezentovány výsledky měření pískovcového hranolu (vzorek č.1) s neporušenou strukturou, o rozměrech 83 cm × 40 cm × 20 cm. Měření bylo realizováno na horní ploše vzorku, která byla součástí vnější (čelní) stěny mostní konstrukce (obr. 5.21.). Měření metodou s jedním budícím signálem odpovídá schematicky znázorněná konfigurace budiče B a snímače S (obr. 5.21a). 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.



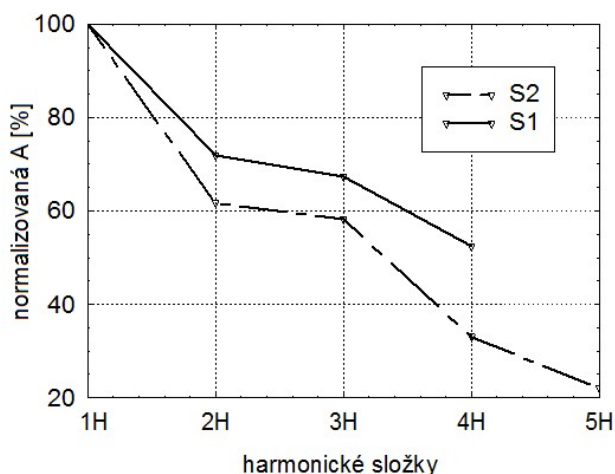
Obr. 5.21. Vzorek č. 1 se schematickým znázorněním konfigurací budiče B a snímače S na horní ploše vzorku: a) pro jeden budící signál; b) pro dva budící signály.

Výsledkem měření jsou frekvenční spektra přenosových charakteristik zaznamenaných snímačem na pozicích S1 a S2 (obr. 5.22). Graf uvedený vlevo odpovídá signálu zaznamenanému snímačem na pozici S1. Z grafu je patrný pokles amplitud vyšších harmonických s jejich rostoucím pořadím, bez nelineárních efektů.



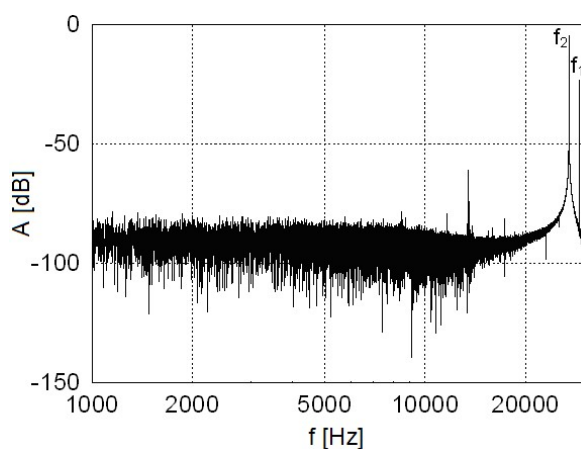
Obr. 5.22. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 1: vlevo – pozice snímače S1; vpravo – pozice snímače S2.

Graf, uvedený na obr. 5.22. vpravo, zobrazuje výsledky měření při snímání odezvy snímačem S2, umístěným vlevo od budiče. Rovněž toto frekvenční spektrum vykazuje obdobný charakter, postupný pokles vyšších harmonických s jejich rostoucím pořadovým číslem. Odpovídající relativní hodnoty vyšších harmonických vzhledem k první harmonické (budící frekvenci) jsou pro obě pozice snímače vzájemně porovnány na obr. 5.23. Obě křivky vykazují srovnatelný trend poklesu amplitud vyšších harmonických frekvencí.



Obr. 5.23. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku č.1. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

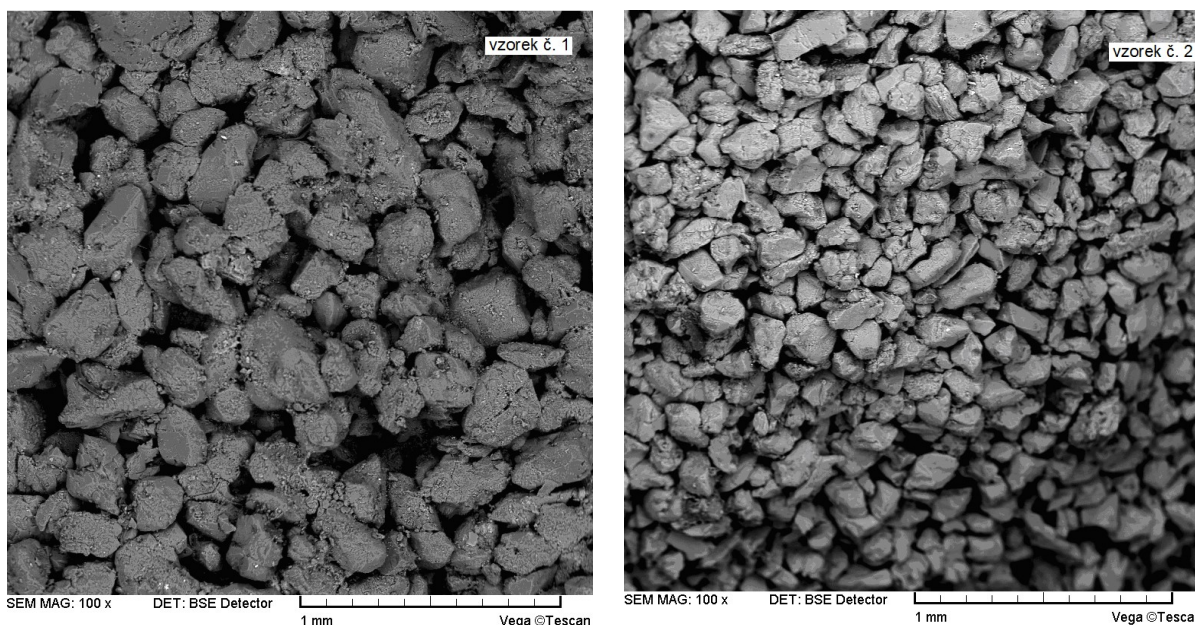
Následně byla aplikována metoda se dvěma harmonickými ultrazvukovými signály blízkých kmitočtů ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 27$ kHz) dle konfigurace (obr. 5.21b). Při analýze výsledného frekvenčního spektra jsme se zaměřili na detekci rozdílové složky kmitočtů budících signálů jako důsledku nelinearity (obr. 5.24.).



Obr. 5.24. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku č. 1 – buzení dvěma signály ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 27$ kHz).

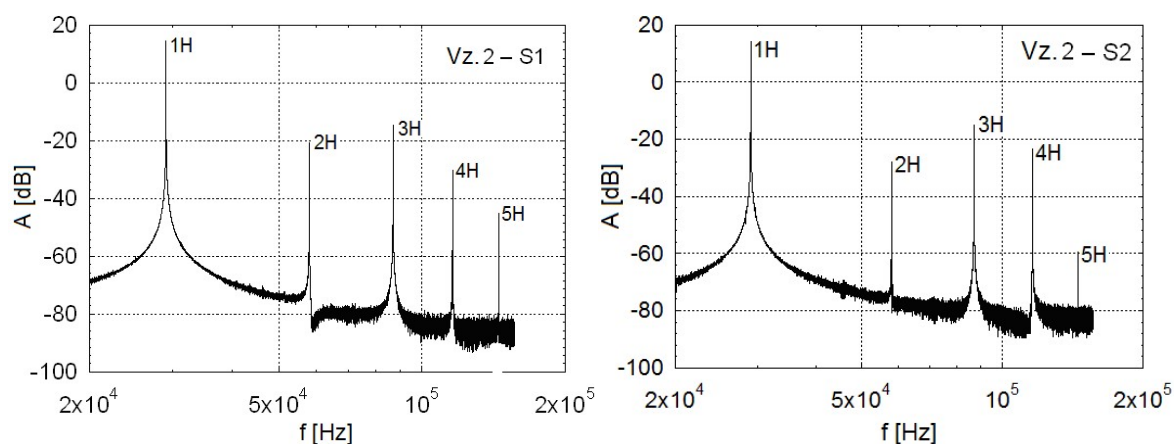
V zobrazeném frekvenčním rozsahu dominují obě budící frekvence (f_1 , f_2) a několik parazitních složek převyšujících šum. Rozdílová složka obou kmitočtů $\Delta f = 2$ kHz nebyla ve frekvenčním spektru zvýrazněna. Rovněž tato metoda informovala o neporušené integritě struktury vzorku.

Vzorek č. 2, o rozměrech 74 cm × 25 cm × 36 cm, byl opět pískovcový hranol. Jednalo se však o pískovec z jiné lokality – odlišné struktury (obr. 5.25.).



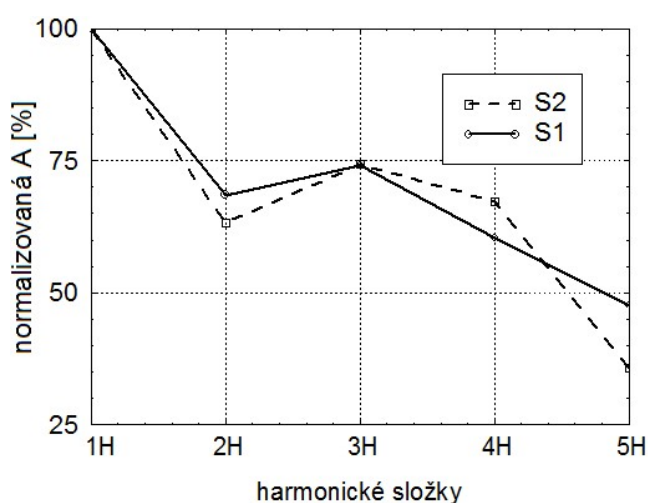
Obr. 5.25. Mikroskopická charakteristika struktury dvou pískovcových hranolů: vlevo – vzorek č. 1; vpravo – vzorek č. 2.

Rovněž tento pískovcový hranol byl proměřován na horní ploše dle schematického znázornění na obr. 5.21. Výsledky měření s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem o frekvenci 29 kHz zobrazují grafy na obr. 5.26. Graf vlevo odpovídá přenosové charakteristice signálu zaznamenané snímačem S1 dle konfigurace na obr. 5.21. a). Ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky jsou patrné nelineární efekty. Hodnota amplitudy třetí 3H harmonické mírně převyšuje hodnotu amplitudy druhé 2H harmonické, což poskytuje informaci o případných strukturních poruchách v pravé části vzorku. Graf, uvedený na obr. 5.26. vpravo, zobrazuje přenosovou charakteristiku signálu zaznamenanou snímačem na pozici S2. V tomto frekvenčním spektru je patrný výraznější projev nelineárních efektů, který zřejmě odpovídá silnějšímu poškození struktury levé části vzorku.



Obr. 5.26. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 2: vlevo – pozice snímače S1; vpravo – pozice snímače S2.

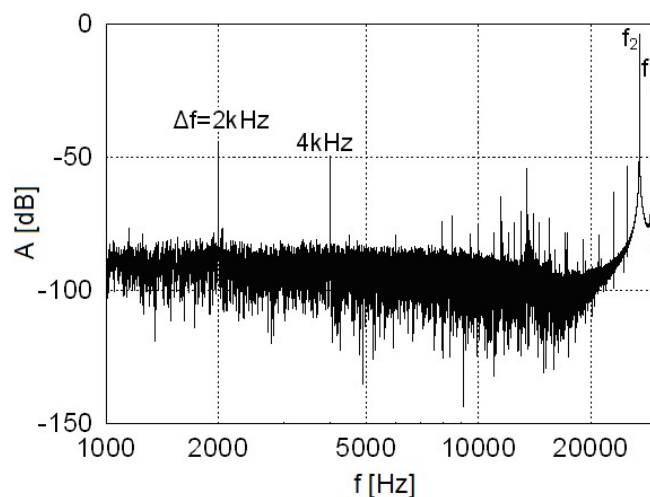
Odpovídající relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí z měření na obou pozicích snímače (S1, S2) jsou zobrazeny na obr. 5.27. Ze vzájemného porovnání poklesu amplitud vyšších harmonických z hlediska linearity, lze jako kvalitnější hodnotit opět pravou polovinu bloku, zaznamenanou snímačem na pozici S1.



Obr. 5.27. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku č. 2. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

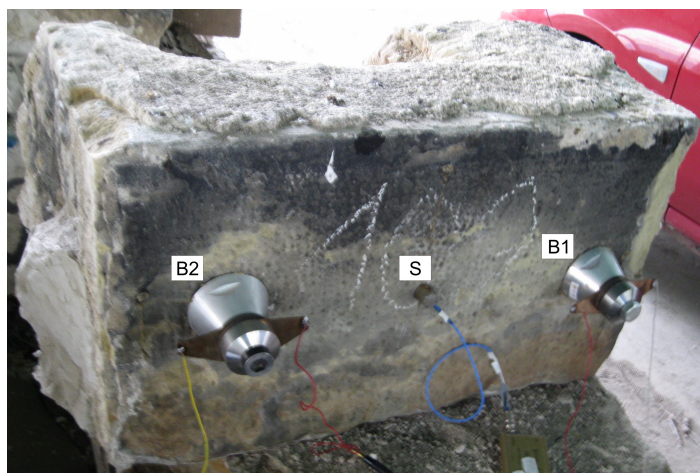
Výsledek měření při buzení dvěma signály blízkých kmitočtů ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 27$ kHz) je zobrazen na obr. 5.28. V tomto případě byla ve frekvenčním spektru detekována rozdílová složka dvou budících kmitočtů na hodnotě 2 kHz a druhá harmonická rozdílové frekvence na hodnotě 4 kHz. Porovnáme-li výsledná spektra těchto dvou vzorků pískovce z různých lokalit

lišících se strukturou, lze vzorek č.1 označit z hlediska strukturní integrity jako kvalitnější. Ve výsledných spektrech z měření vzorku č. 1 se nevyskytují výrazné nelineární efekty, z čehož lze usuzovat na dobrou kvalitu strukturní celistvosti vzorku. V případě vzorku č. 2, lze na základě výsledků měření pomocí obou metod hodnotit celistvost struktury jako částečně poškozenou.



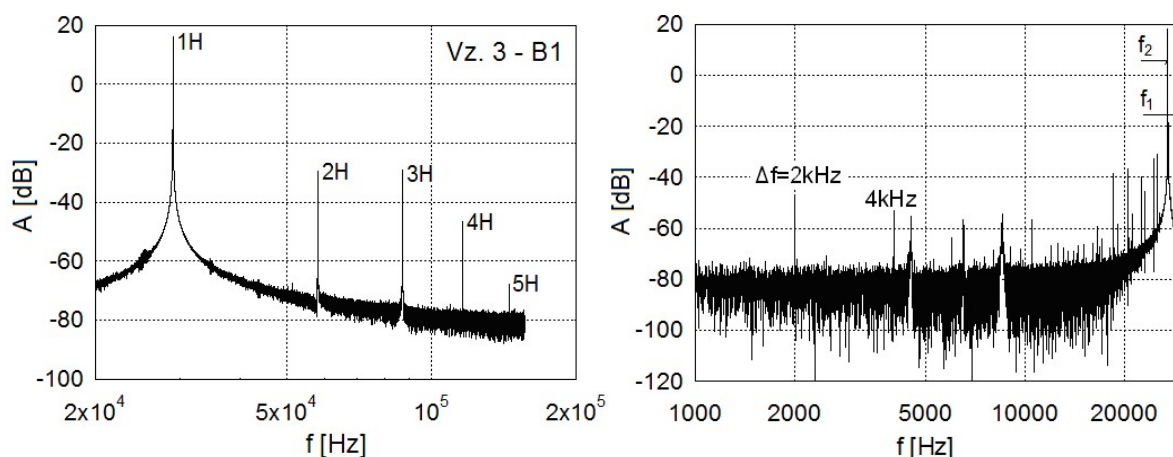
Obr. 5.28. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku č. 2 – buzení dvěma signály ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 27$ kHz).

Vzorek č. 3 byl atypický nepravidelný blok (obr. 5.29). Měření bylo realizováno opět na vnější stěně bloku, přístupné po zabudování do mostní konstrukce. Aplikovány byly opět obě měřicí metody, s jedním a se dvěma budícími signály. Na fotografii bloku jsou vyznačeny pozice budičů B1, B2 a snímače S při aplikaci metody se dvěma budícími signály.



Obr. 5.29. Vzorek č. 3 s vyznačenými pozicemi budičů B1, B2 a snímače S.

Výsledky měření oběma metodami zobrazují frekvenční spektra uvedená na obr. 5.30. Graf vlevo odpovídá aplikaci metody s jedním budícím signálem o frekvenci 29 kHz. Budící signál byl realizovaný budičem B1, signál odezvy byl zaznamenaný snímačem S, na pozici dle obr. 5.29. Ve frekvenčním spektru jsou patrné srovnatelné hodnoty amplitud druhé 2H a třetí 3H harmonické frekvence, které jsou zřejmě projevem nelinearity v důsledku porušené struktury vzorku. Výsledné spektrum z měření při buzení dvěma ultrazvukovými signály ($f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 27$ kHz) zobrazuje graf na obr. 5.30. vpravo. Ve frekvenčním spektru je zvýrazněna rozdílová složka dvou budících kmitočtů $\Delta f = 2$ kHz a rovněž její druhá harmonická na hodnotě 4 kHz. Ve spektru je rovněž patrný poměrně četný výskyt parazitních frekvenčních složek převyšujících hodnoty šumového pozadí.



Obr. 5.30. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 3: vlevo – buzení jedním signálem B1; vpravo – buzení dvěma signály ($f_1 = 29$ Hz, $f_2 = 27$ kHz).

5.5.3 Diskuze výsledků

Cílem uvedených experimentů bylo ověřit na kamenných blocích vyjmutých z historické mostní konstrukce použitelnost nelineární ultrazvukové spektroskopie pro posouzení kvality struktury bloků. Testovány byly vybrané typy bloků vzájemně se lišící rozměry i původem materiálu.

Při analýze výsledků měření metodou s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem byl u vzorků s více porušenou integritou struktury pozorován nárůst hodnoty amplitudy třetí harmonické se současným poklesem amplitudy druhé harmonické frekvence.

Ve frekvenčních spektrech získaných při měření se dvěma budícími signály byl indikátorem nelinearity a strukturního poškození vznik rozdílových složek dvou budících kmitočtů. Při měření byl respektován požadavek na umístění budiče na čelní stěny bloků po

jejich zabudování do mostní konstrukce, tzn. dostupné při měření in situ – na reálné mostní konstrukci. Korelace získaných výsledků s integritou struktury vzorků byla paralelně ověřována pomocí metody impact-echo [47].

V případě měření in situ bude hrát důležitou roli zejména dosažení dostatečné hloubky průniku budících signálů čili dostatečná intenzita budícího signálu. Je však třeba respektovat, že vyšší amplituda buzení může v materiálech jako jsou pískovec a horniny generovat nelineární jevy i v nepoškozených částech. Proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost zejména optimalizaci výkonu budičů. Na základě provedených analýz lze konstatovat, že monitorování historických staveb metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie se jeví jako perspektivní pro zkvalitnění péče o stavební památky.

5.6 Vzorky z jemné betonové směsi

Beton je díky svému složení silně hysterézní materiál, který vykazuje i v nepoškozeném stavu určitou míru nelinearity [69]. 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.

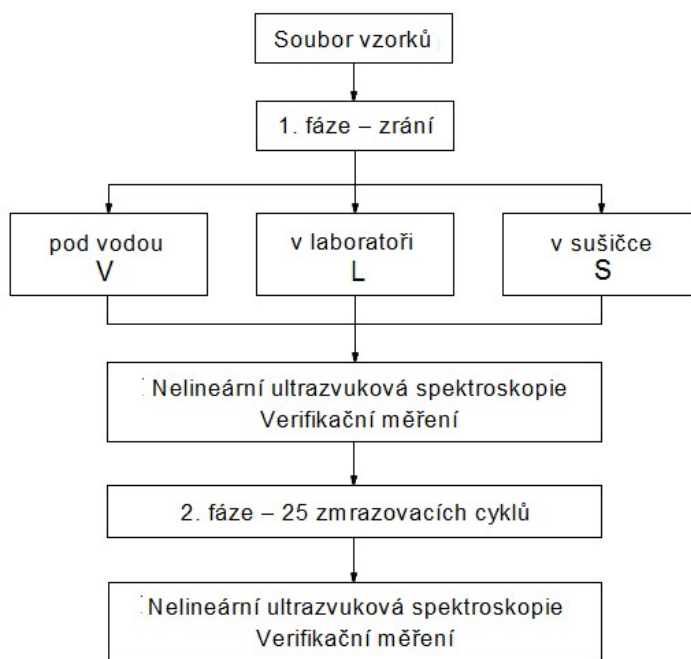
Předmětem experimentu bylo dvacet jedna kusů vzorků zhotovených z jemné betonové směsi dle č. receptury 400921, konzistence V1, o rozměrech 4 cm × 4 cm × 16 cm. Měření bylo realizováno ve dvou fázích. První fáze měření byla zaměřena na zkoumání vlivu odlišných podmínek zrání betonu na integritu vnitřní struktury vzorků [46]. Druhá fáze experimentu byla zaměřena na sledování poškození struktury vzorků po jejich teplotním zatěžování [44].

5.6.1 První fáze experimentu

Cílem první fáze experimentu bylo sledovat, pomocí metody nelineární ultrazvukové spektroskopie, vliv nestandardních podmínek zrání betonu na integritu struktury vzorků.

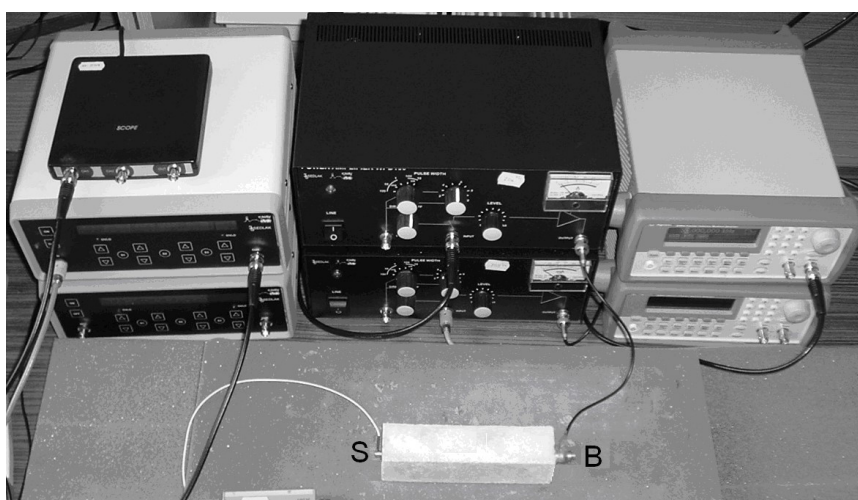
Vzorky byly po zatvrdnutí betonu rozděleny do tří skupin. Jednotlivé skupiny vzorků se vzájemně lišily podmínkami uložení v průběhu zrání betonu (obr. 5.31.). První skupina vzorků byla po dobu zrání betonu (dvacet osmi dnů) uložena dle standardních podmínek ve vodě (označení V), nedocházelo k úbytku vlhkosti po zatvrdnutí betonu. Vzorky dalších dvou

skupin byly podrobeny nedostatku vlhkosti v průběhu zrání betonu. V důsledku nedostatku vlhkosti byly vzorky namáhány smršťováním a docházelo ke vzniku mikrotrhlinek – porušení struktury v celém objemu vzorků. 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.



Obr. 5.31. Vzorky z jemné betonové směsi – schéma přípravy experimentu.

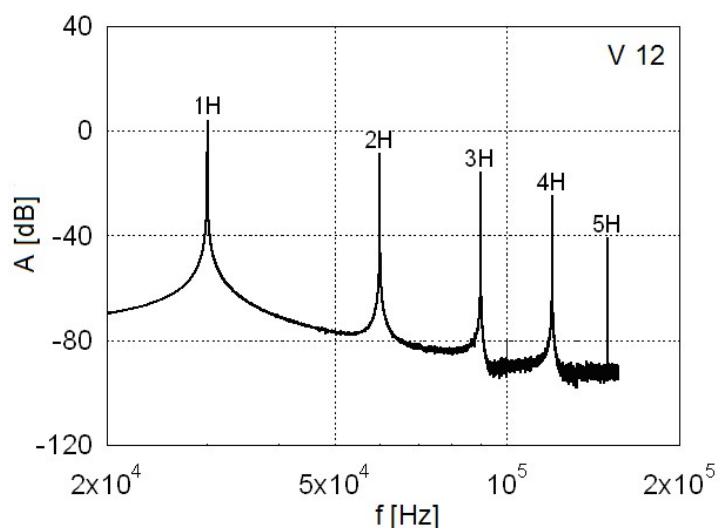
Uspořádání experimentu, s vyznačenou pozicí budiče B a snímače S na vzorku je zobrazeno na obr. 5.32.



Obr. 5.32. Vzorek z jemné betonové směsi – uspořádání experimentu.

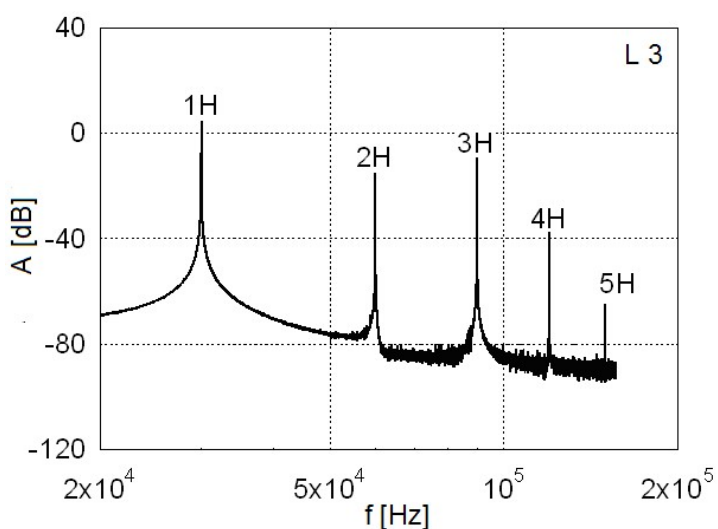
5.6.1.1 Výsledky měření

Jako první byla aplikována metoda s jedním budícím ultrazvukovým signálem o kmitočtu 30 kHz. Graf na obr. 5.33. 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. 5.33. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku V12 – zrání betonu pod vodou.

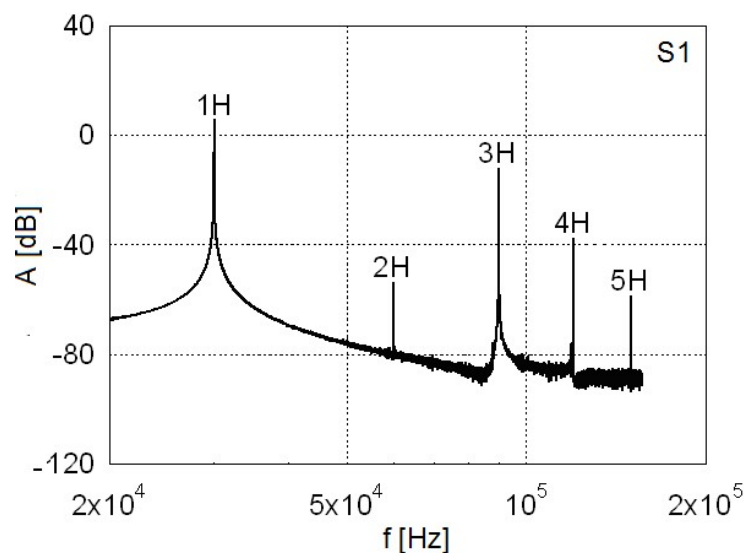
Následující obr. 5.34. zobrazuje výsledek měření vzorku L3, který reprezentuje vzorky namáhané smršťováním v důsledku nedostatku vlhkosti v procesu zrání betonu.



Obr. 5.34. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku L3 – zrání betonu v laboratorním prostředí.

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 na obr. 5.35.



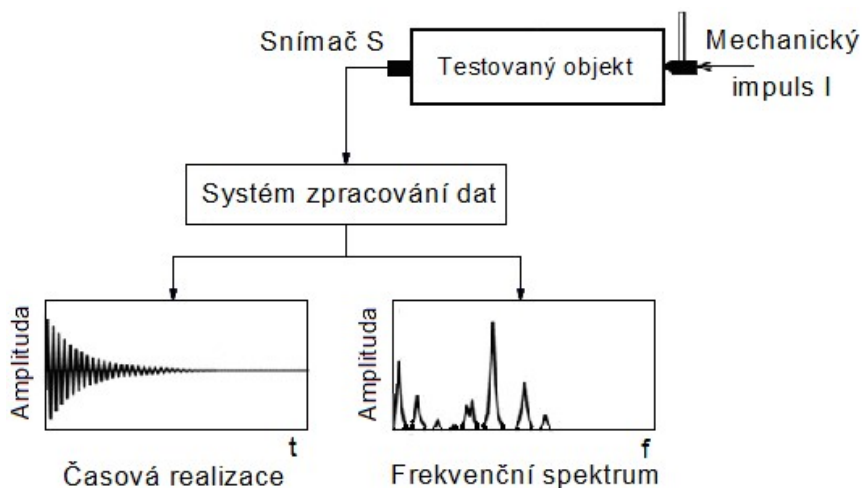
Obr. 5.35. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku S1 – v procesu zrání uloženého po dobu dvanácti dnů v sušičce.

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.

5.6.1.2 Verifikační měření

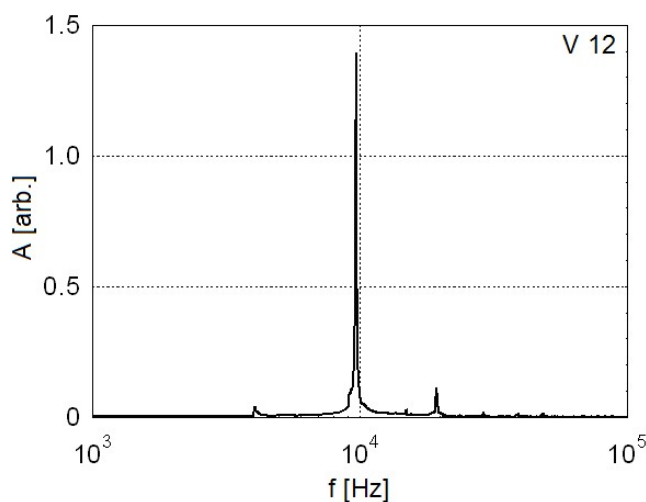
Aplikována byla metoda impact-echo založená na šíření napěťových vln generovaných mechanickým impulsem [63]. Krátký mechanický impuls, realizovaný rázem kladívka, příp. ocelové kuličky na povrch vzorku, vybudí nízkofrekvenční napěťové vlny (od 1 do 60 kHz), které se šíří uvnitř struktury a jsou odrazeny od trhlin a vnějšího povrchu. Odražené vlny jsou na povrchu zaznamenány snímačem a výsledkem měření je zobrazení časové realizace a jejího frekvenčního spektra (obr. 5.36.). Dominantní frekvence (které se projevují jako lokální maxima ve frekvenčním spektru) mají spojitost s několikanásobnými odrazy uvnitř struktury

a obsahují informace o integritě struktury a lokalizaci vad. Speciálním kladívkem byly ve vzorku generovány podélné vlny. Mechanický impuls I byl aplikován dle schématu na obr. 5.36., odezva vzorku byla snímána snímačem v místě S.



Obr. 5.36. Princip metody impact-echo.

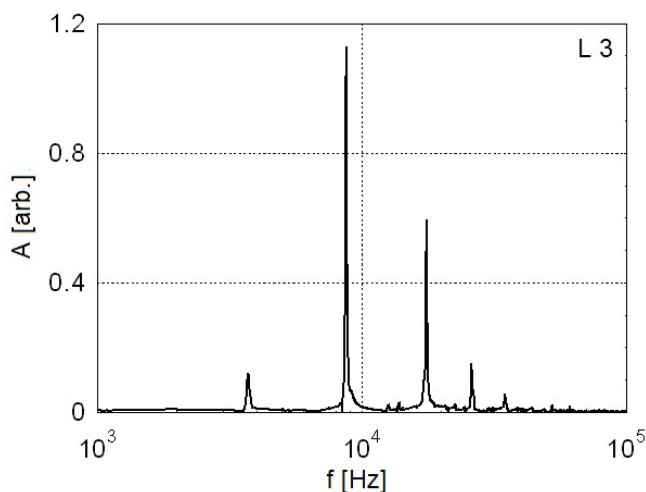
Výsledky měření prezentují frekvenční spektra odezvy vzorků na mechanický impuls. Frekvenční spektrum zobrazené na obr. 5.37. odpovídá neporušenému vzorku V12. Dominantní frekvenční složka se v tomto případě nachází na hodnotě 9 700 Hz, přičemž mírně zvýšená hodnota amplitudy na hodnotě 19 400 Hz odpovídá druhé harmonické frekvenci.



Obr. 5.37. Frekvenční spektrum odezvy vzorku V12 - zrání betonu pod vodou.

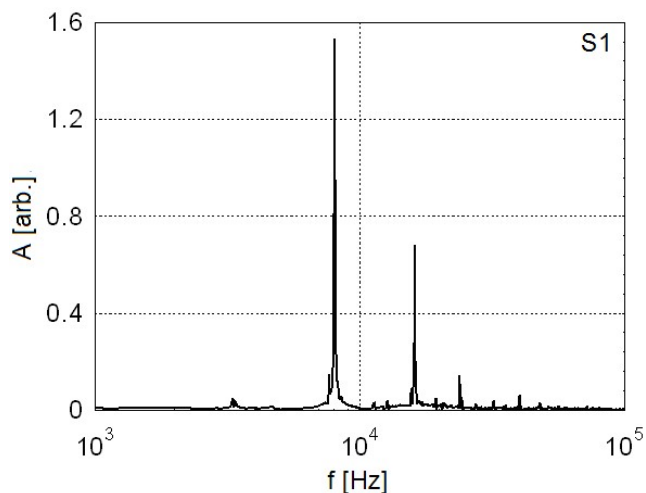
Výsledek měření vzorku L3, který reprezentuje vzorky vystavené nedostatku vlhkosti v procesu zrání betonu je zobrazen na obr. 5.38. Tyto nestandardní podmínky zrání betonu

byly zdrojem vzniku mikrotrhlin ve struktuře vzorku. Z frekvenčního spektra odezvy vzorku L3 je patrný posun dominantní frekvence v porovnání se vzorkem V12. Dominantní frekvence se nachází na nižší frekvenční složce o hodnotě 8 800 Hz, což odpovídá posunu o 900 Hz. Ve frekvenčním spektru se rovněž výrazněji uplatňuje její druhá harmonická frekvence na hodnotě 17 600 Hz a amplituda třetí harmonické na hodnotě 26 400 Hz mírně přesahuje úroveň šumového pozadí.



Obr. 5.38. Frekvenční spektrum odezvy vzorku L3 – zrání betonu v laboratorním prostředí.

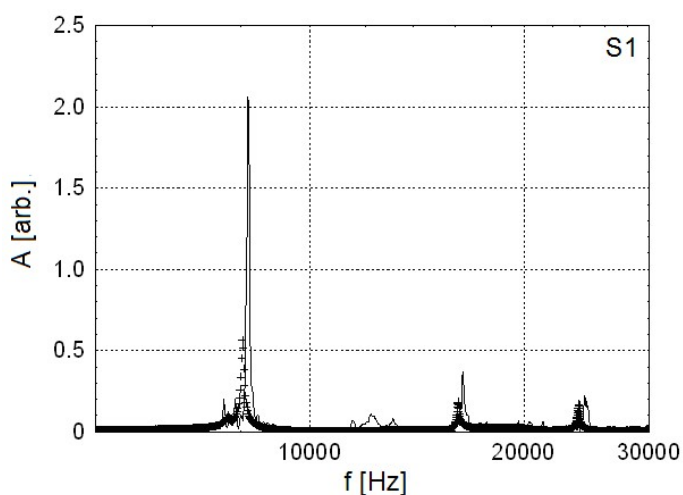
Graf na obr. 5.39 zobrazuje výsledek měření vzorku S1, který reprezentuje třetí skupinu vzorků, v procesu zrání betonu uložených po dobu dvanácti dnů v prostoru sušičky o teplotě 60 °C.



Obr. 5.39. Frekvenční spektrum odezvy vzorku S1 - v procesu zrání betonu uloženého po dobu dvanácti dnů v sušičce.

Ve frekvenčním spektru odezvy na mechanický impuls vzorku S1 se dominantní frekvence nachází na hodnotě 8 000 Hz. V porovnání se vzorkem V12 došlo k posunu dominantní frekvence o 1 700 Hz. Ve frekvenčním spektru je rovněž zvýrazněna amplituda druhé harmonické frekvence na hodnotě 16 000 Hz a mírně převyšuje hodnotu šumového pozadí také amplituda třetí harmonické frekvence na hodnotě 24 000 Hz.

Při aplikaci buzení mechanickým impulsem byl rovněž sledován vliv intenzity budícího signálu na posun dominantní frekvence, který je jako projev nelinearity využíván zejména pro tělesa se silně rezonančními projevy. Nepatrný posun byl pozorován pouze v případě vzorků skupiny S, která se vyznačovala nejsilnějším poškozením integrity struktury (obr. 5.40.).



Obr. 5.40. Závislost dominantní frekvence na intenzitě budícího impulsu – vzorek S1.

Pro všechny testované vzorky byla stanovena ultrazvukovou impulsovou metodou rychlost šíření ultrazvukových vln. Metoda je založena na opakovaném vysílání ultrazvukových signálů do zkoušeného materiálu a zjištění impulsové rychlosti. Tato rychlost je různá pro různé materiály a mění se s jejich vlastnostmi. Například u kvalitního betonu je impulsová rychlost ultrazvukového (UZ) vlnění vyšší než u betonu méně kvalitního [8]. Ze známého vztahu byla stanovena frekvence podélných kmitů ve vzorcích:

$$f_l = c_l / \lambda \quad (5.1)$$

kde: c_l ... průměrná rychlost UZ vlnění [m/s]

λ ... je délka vlny UZ vlnění [m].

V následující tabulce 5.1. jsou uvedeny 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 V12 (obr. 5.37.), L3 (obr. 5.38.) a S1 (obr. 5.39.). 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.

Tab. 5.1. Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin vzorků reprezentujících skupiny V, L, S.

| Vzorek | c_l [$m \cdot s^{-1}$] | f_l [Hz] | f_l [Hz] z grafu | Skupina vzorků | c_l [$m \cdot s^{-1}$] | f_l [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 |

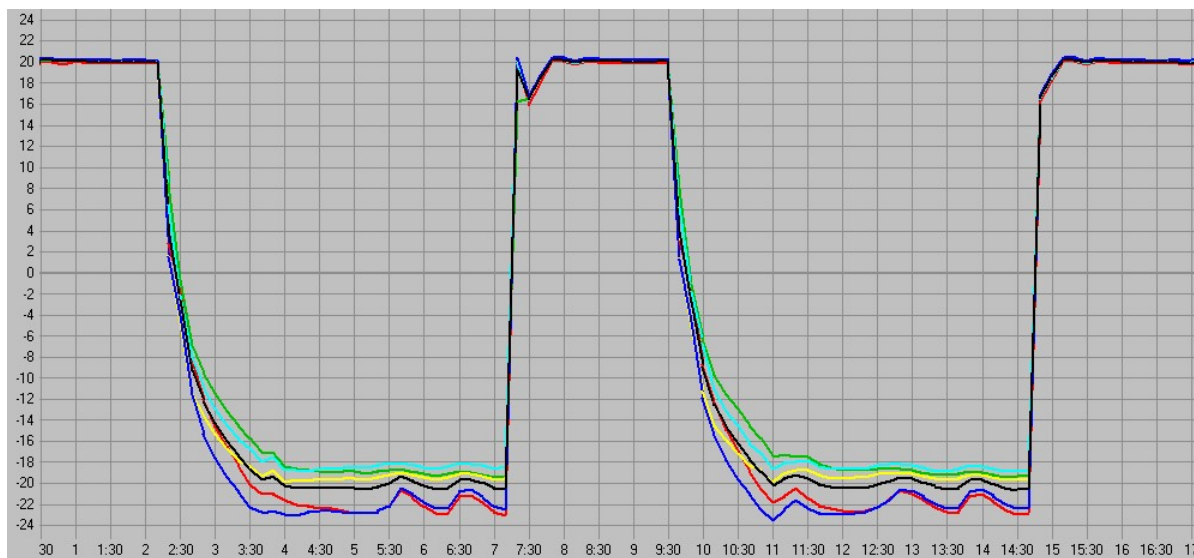
5.6.1.3 Diskuze výsledků

Vlivem nestandardních podmínek v procesu zrání betonu, v případě dvou skupin vzorků (označených L a S), došlo ke vzniku mikrotrhlin – porušení celistvosti struktury. Cílem měření bylo zjistit, zda je porušená struktura vzorků zdrojem nelineárních jevů při přenosu harmonického ultrazvukového signálu. Analyzovány byly přenosové charakteristiky budícího harmonického ultrazvukového signálu o kmitočtu 30 kHz. V případě vzorků namáhaných smršťováním v procesu zrání betonu (skupiny L a S) se ve frekvenčních spektrech přenosových křivek projevovaly nelineární efekty potlačením sudých harmonických, zejména druhé harmonické a zvýrazněním třetí harmonické.

Rovněž verifikační měření potvrdila porušenou celistvost struktury vzorků zrajících v nestandardních podmínkách. Při aplikaci metody impact-echo došlo u vzorků s porušenou strukturou k posunu dominantních frekvencí k nižším hodnotám. Další ověřovací fyzikální veličinou byla rychlost šíření ultrazvukových vln ve vzorcích s následným výpočtem frekvence podélných vln. Rovněž klesající trend hodnot obou veličin s rostoucím stupněm poškození vzorků potvrdil korelaci mezi výskytem nelineárních efektů a vznikem mikrotrhlin ve struktuře vzorků.

5.6.2 Druhá fáze experimentu

Vzorky všech tří skupin, vzájemně se lišících kvalitou struktury, 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 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně po dobu dvou hodin ohřívány při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (obr. 5.41.).

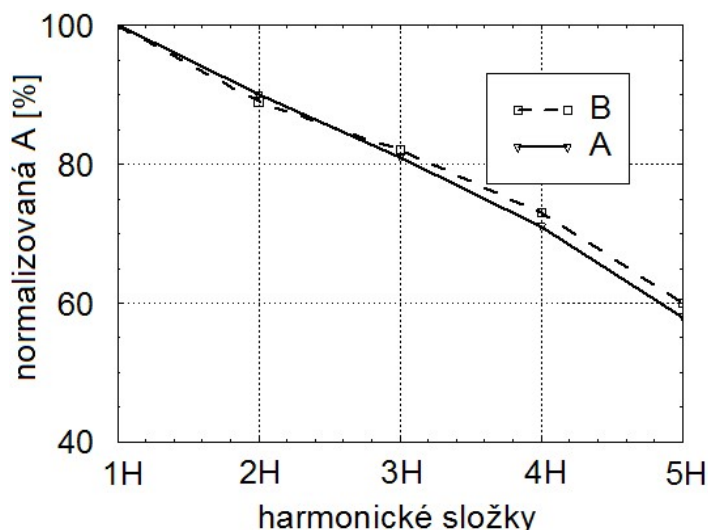


Obr. 5.41. Časová závislost zmrazovacích cyklů.

Po aplikaci zmrazovacích cyklů byly vzorky opakovaně proměřeny výše uvedenými metodami. Cílem měření bylo posoudit důsledek teplotní degradace na strukturu vzorků, vzájemně se lišící kvalitou vlivem různých podmínek zrání betonu. Sledovány a vzájemně porovnány byly změny hodnotících parametrů mezi jednotlivými skupinami vzorků.

5.6.2.1 Výsledky měření

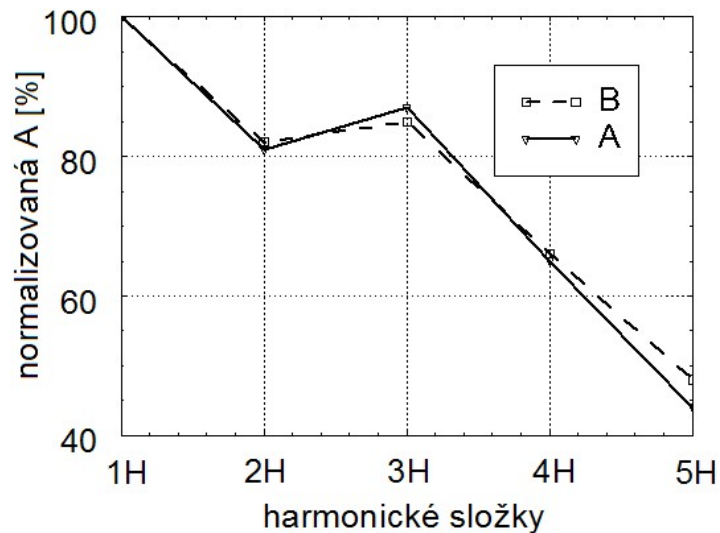
Opakovaně byla aplikována metoda s jedním harmonickým ultrazvukovým budícím signálem o kmitočtu 30 kHz při stejné orientaci budiče B a snímače S dle obr. 5.36. Z důvodu porovnání přenosových charakteristik před degradací a po degradaci jsou výsledky měření prezentovány formou relativních hodnot vyšších harmonických, normalizovaných na hodnotu první harmonické (budící) frekvence. V grafu na obr. 5.42. jsou porovnány výsledky měření vzorku V12, který reprezentuje skupinu vzorků zrajících dle standardních podmínek.



Obr. 5.42. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí nepoškozeného vzorku V12: A – před degradací; B – po degradaci.

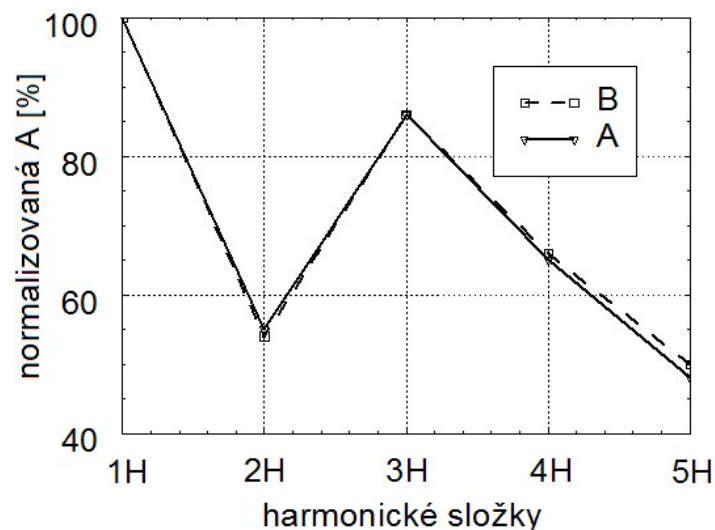
Křivka A odpovídá měření před degradací, křivka B odpovídá měření po degradaci. Obě přenosové charakteristiky (A i B) vykazují obdobný lineární pokles s rostoucím pořadím harmonických složek. Pro posouzení linearitu poklesu byla stanovena hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 . Hodnota koeficientu se blíží k jedné, pokud je pokles amplitud lineární (jak je tomu u nepoškozených vzorků). Čím méně je pokles amplitud lineární (s výskytem nelineárních efektů) tím více se hodnota koeficientu 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.

Výsledky prezentované na obr. 5.43. odpovídají vzorku L3, který reprezentuje skupinu vzorků částečně namáhaných smršťováním v procesu zrání betonu. V tomto případě byly teplotně degradovány vzorky s částečně porušenou celistvostí struktury. Obě křivky (A – před degradací, B – po degradaci) vykazují obdobný průběh s výskytem nelineárních efektů. Vypočtené hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 jsou z hlediska linearitu poklesu harmonických, příznivější pro měření vzorku po degradaci zmrazovacími cykly. Před degradací činila hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu $r^2 = 0,878$ (křivka A), po degradaci vykazovala druhá mocnina korelačního koeficientu mírně zvýšenou hodnotu $r^2 = 0,912$ (křivka B). Z porovnání obou hodnot korelačního koeficientu lze tedy konstatovat mírné zlepšení integrity struktury vzorku po teplotní degradaci.



Obr. 5.43. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku L3 (porušená integrita struktury): A – před degradací; B – po degradaci.

Výsledky měření vzorků skupiny S, které byly v průběhu zrání betonu vysušovány v sušičce, reprezentuje vzorek S1 (obr. 5.44). Obě křivky, A – před teplotní degradací a B – po teplotní degradaci, vykazují opět obdobný průběh s výskytem nelineárních efektů jako v případě vzorku L3 (obr. 5.43.). Hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu pro vzorek A před degradací činila $r^2 = 0,476$ a pro vzorek B po degradaci $r^2 = 0,507$.



Obr. 5.44. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku S1 (masivnější porušení struktury): A – před degradací; B – po degradaci.

Rovněž v případě této skupiny vzorků zřejmě nedošlo k dalšímu poškození struktury v důsledku aplikace zmrazovacích cyklů. Z hlediska linearit poklesu amplitud vyšších harmonických lze naopak opět usuzovat na mírné zlepšení strukturní celistvosti vzorku po teplotní degradaci.

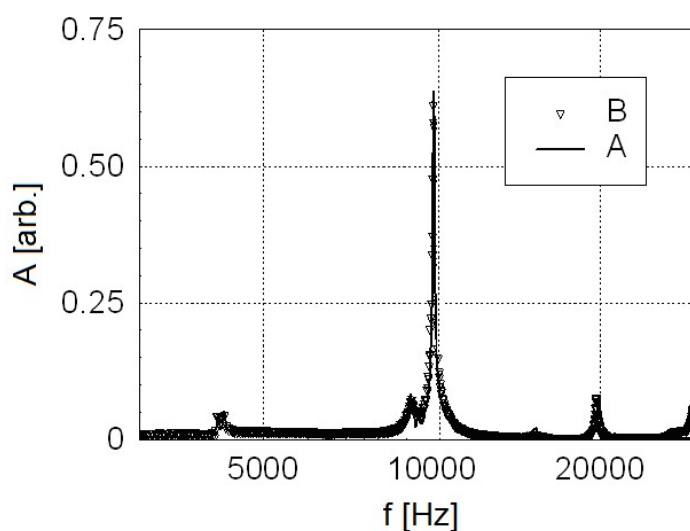
V tabulce 5.2 jsou porovnány hodnotící parametry jednotlivých skupin vzorků: relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických normalizované na amplitudu první harmonické (budící) frekvence a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 , kterou byla posuzována linearita poklesu amplitud vyšších harmonických frekvencí.

Tab. 5.2. 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.

| Skupina vzorků | 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 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | A | A | A | A | A | B | B | B | B | B |
| 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 |

5.6.2.2 Verifikační měření

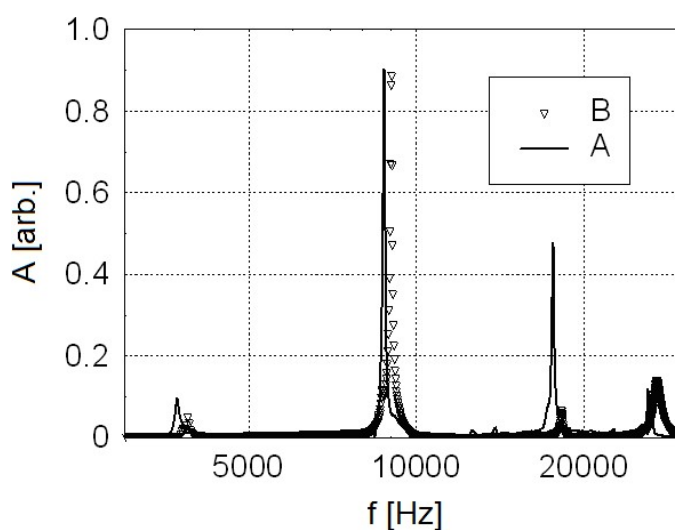
V grafu na obr. 5.45 jsou porovnána frekvenční spektra odezvy na mechanický impuls vzorku V12 před degradací a po teplotní degradaci po dobu zrání betonu uloženého pod vodou.



Obr. 5.45. Frekvenční spektra odezvy vzorku V12 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po degradaci.

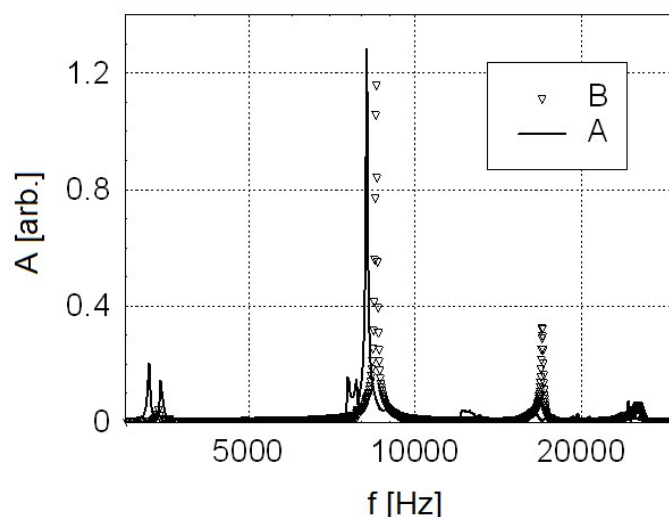
Křivka A odpovídá měření před degradací (9.5.2011), křivka B odpovídá měření po teplotní degradaci (11.8.2011). Z porovnání obou křivek je patrné, že ve frekvenčním spektru nedošlo k posunu dominantní frekvence, což informuje opět o skutečnosti, že v důsledku aplikace dvaceti pěti zmrazovacích cyklů nedošlo k poškození celistvosti struktury vzorku.

Následující obr. 5.46 odpovídá vzorku L3, který opět reprezentuje skupinu vzorků v procesu zrání uložených na vzduchu v laboratorních podmínkách. Z porovnání výsledků měření vzorku, před degradací – křivka A (měřeno 13.5.2011) a po aplikaci zmrazovacích cyklů – křivka B (měřeno 11.8.2011), je patrné, že po degradaci vzorku došlo k mírnému posunu dominantních frekvenčních složek k vyšším hodnotám. Dominantní frekvence se před degradací nacházela na hodnotě 8 800 Hz a po teplotní degradaci na hodnotě 8 980 Hz, což odpovídá posunu o 180 Hz. Po degradaci je také patrné snížení hodnoty amplitudy druhé harmonické. Posun dominantní frekvence k vyšší hodnotě po teplotní degradaci opět informuje o zlepšení integrity struktury vzorku. V průběhu degradačních cyklů byly vzorky máčeny vodou, což zřejmě způsobilo dodatečnou hydrataci cementových zrn.



Obr. 5.46. Frekvenční spektra odezvy vzorku L3 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po degradaci.

Výsledky měření skupiny vzorků S, jejichž struktura vykazovala před degradací nejnižší kvalitu struktury reprezentuje vzorek S1. Frekvenční spektra odezvy na mechanický impuls jsou zobrazena na obr. 5.47. Křivka A odpovídá měření vzorku před degradací (13.5.2011) a křivka B odpovídá měření po teplotní degradaci vzorku (11.8.2011).



Obr. 5.47. Frekvenční spektra odezvy vzorku S1 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po teplotní degradaci.

V grafu je opět patrný posun dominantní frekvence k vyšší hodnotě. Před degradací se dominantní frekvence nacházela na hodnotě 8 000 Hz a po degradaci se posunula na hodnotu 8 320 Hz. V tomto případě hodnota posunu činila 320 Hz, což rovněž informuje o zlepšení celistvosti struktury vzorku S1 jako v případě vzorku L3, zřejmě v důsledku dodatečné hydratace cementových zrn během máčení vzorků vodou při aplikaci degradačních cyklů.

V následující tabulce 5.3. jsou analogicky uvedeny hodnoty dalších verifikačních veličin po teplotní degradaci vzorků: rychlosti šíření UZ vlnění c_l , vypočtené hodnoty frekvencí podélných kmitů f_l a hodnoty dominantních frekvencí odečtené z grafů frekvenčních spekter odezvy vzorků V12 (obr. 5.45.), L3 (obr. 5.46.) a S1 (obr. 5.47.). V posledních dvou sloupcích jsou uvedeny průměrné hodnoty uvedených veličin všech proměřených vzorků v jednotlivých skupinách.

Tab. 5.3. Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin po teplotní degradaci vzorků.

| Vzorek | c_l [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | f_l [Hz] | f_l [Hz] z grafu | Skupina vzorků | c_l [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | f_l [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 |

Z přehledu verifikačních veličin je opět patrné zvýšení hodnot verifikačních veličin nestandardně zrajících vzorků (skupin L a S), které rovněž potvrzuje informaci o zlepšení jejich strukturní integrity po teplotní degradaci.

5.6.2.3 *Diskuze výsledků*

Cílem druhé fáze experimentu bylo sledovat důsledky aplikace dvaceti pěti teplotních degradačních cyklů na rozdílnou kvalitu struktury tří skupin betonových vzorků.

V případě vzorků první skupiny, po dobu zrání betonu uložených ve vodě, nebyly po aplikaci dvaceti pěti degradačních cyklů pozorovány změny ve výsledných parametrech. Při aplikaci metody nelineární ultrazvukové spektroskopie s jedním budícím kmitočtem obě přenosové charakteristiky (před teplotní degradací i po degradaci) vykazovaly lineární pokles bez výskytu nelineárních efektů. Hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 , která byla vypočtena pro posouzení linearitu přenosových charakteristik, vykazovala v obou případech srovnatelné hodnoty. Při aplikaci metody impact-echo nebyl ve frekvenčních spektrech odezvy na mechanický impuls patrný posun dominantní frekvence. Rovněž tyto výsledky měření poskytly informaci, že nedošlo v případě vzorků první skupiny ke změnám integrity struktury po degradaci zmrazovacími cykly.

U dalších dvou skupin vzorků (L a S), jejichž struktura byla méně kvalitní vlivem nedostatku vody v procesu zrání betonu, byly patrné změny hodnotících parametrů. V případě metody nelineární ultrazvukové spektroskopie vykazoval pokles přenosové charakteristiky vzorků po teplotní degradaci vyšší linearitu oproti přenosové charakteristice vzorků před degradací. Tato změna ovšem informovala o zlepšení celistvosti struktury vzorků po teplotní degradaci. V případě aplikace metody impact-echo rovněž došlo ke změnám ve frekvenčních spektrech. Ze vzájemného porovnání byl patrný posun dominantních frekvencí, avšak jednalo se o posun k vyšším hodnotám, což opět znamenalo zlepšení celistvosti struktury vzorků po teplotní degradaci. Rovněž hodnoty další verifikační veličiny (rychlosti šíření podélných vln a vypočítané hodnoty podélných vln) vykazovaly rostoucí trend a potvrdily tak informaci o zlepšení strukturní celistvosti vzorků obou uvedených skupin.

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.

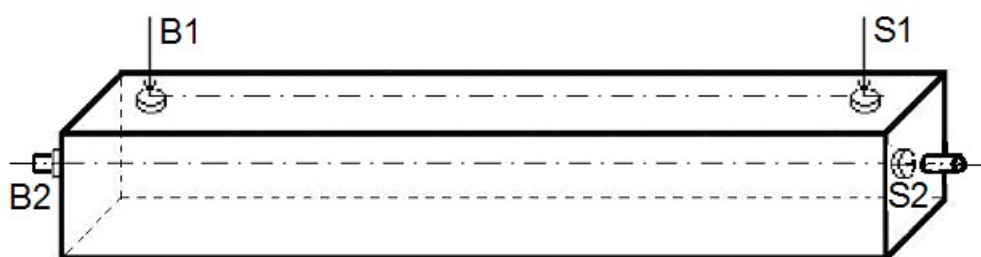
5.7 Železobetonové prvky

Koroze výztužné oceli uvnitř železobetonové konstrukce či dílce vzniká buď porušením povrchu – ztrátou ochranné funkce krycí vrstvy betonu, nebo chemickým či elektrickým působením bez zjevného porušení povrchu. V obou případech dochází k riziku snížení pevnosti dílce či konstrukce, které je způsobeno zmenšováním průřezu výztuže a snižováním spolupůsobení betonu a výztuže. Koroze ocelové výztuže tak významně znehodnocuje technické vlastnosti a následně zkracuje spolehlivost a životnost železobetonových konstrukcí [76]. V současnosti není známá spolehlivá NDT metoda pro průkaznou detekci korozního stavu výztuže přímo v konstrukci. Jako perspektivní se pro monitorování železobetonových konstrukcí jeví metody akustické, které nezatěžují životní prostředí ani neohrožují zdraví obsluhy, neboť neprodukují ani ke svému použití nepotřebují žádné zdraví nebezpečné látky či zařízení. Do experimentálního studia možnosti využití akustických metod jsem se zapojila v rámci své disertační práce, která byla zaměřena na detekci koroze ocelové výztuže a jejich důsledků pomocí metody akustické emise [52]. Dosažené poznatky a zkušenosti jsem využila při spolupráci na řešení grantového projektu “Defektoskopie železobetonových dílců a konstrukcí metodami nelineární akustické spektroskopie“. Cílem řešení bylo experimentální studium potenciálu nelineární ultrazvukové spektroskopie pro testování železobetonu [88] a v kombinaci s dalšími nedestruktivními metodami tak významnou měrou přispět k monitorování stavu železobetonových konstrukcí z hlediska koroze ocelové výztuže a jejich důsledků [35].

5.7.1 Železobetonové trámce

Předmětem laboratorních experimentů byly železobetonové trámce atypických rozměrů 50 mm x 50 mm x 360 mm, obsahující hladkou ocelovou výztuž o průměru 8 mm a délce 360 mm, umístěnou v podélné středové ose vzorku. Atypický rozměr trámců a receptura betonové směsi byly stanoveny pro urychlení procesu koroze v agresivní lázni, současně však byla splněna podmínka minimální krycí vrstvy betonu nad výztuží. Korozní prostředí bylo vytvořeno 5 % vodním roztokem NaCl. Vzorky byly do tohoto roztoku ponořeny do dvou třetin výšky, konce výztuže zajišťující připojení měřicích přístrojů byly chráněny před nežádoucím vznikem koroze polyetylenovou převlečnou chráničkou. Během jednoho korozního cyklu byly vzorky ponořeny na 16 hodin do korozního roztoku a poté vysoušeny v elektrické sušárně při teplotě 40 °C po dobu 8 hodin [52]. Zkušební trámce byly zhotoveny na Ústavu technologie hmot a stavebních dílců Fakulty stavební VUT v Brně, korozní proces byl

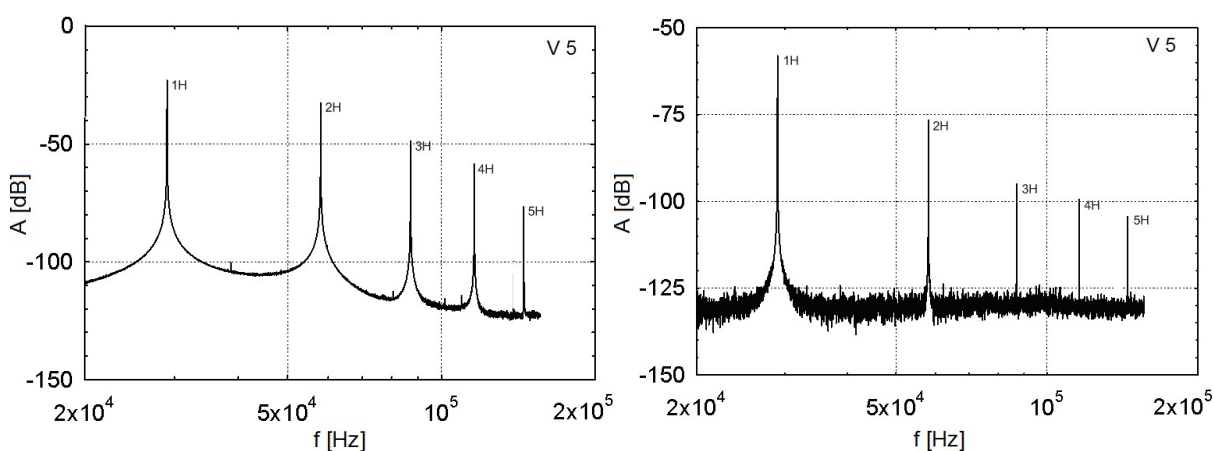
realizován na Ústavu fyziky. Měření byla realizována po aplikaci osmdesáti dvou (82) a sto dvaceti sedmi (127) korozních cyklů. Proměřovány byly dvě vzájemné konfigurace ultrazvukového budiče se snímačem vzhledem k podélné středové ose vzorku, a to příčná orientace (B1, S1) a podélná orientace (B2, S2), obr. 5.48. Současně byla prováděna srovnávací měření na referenčních vzorcích uložených ve standardních laboratorních podmínkách. Proměřován byl soubor šesti vzorků po aplikaci korozních cyklů a soubor tří referenčních vzorků [40, 42]. Aplikovány byly dvě metody nelineární ultrazvukové spektroskopie. V první fázi měření byla použita metoda s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem o kmitočtu 29 kHz.



Obr. 5.48. Dvě konfigurace budiče B a snímače S na testovaném železobetonovém trámcí: B1, S1 – příčná; B2, S2 – podélná.

5.7.1.1 Výsledky měření

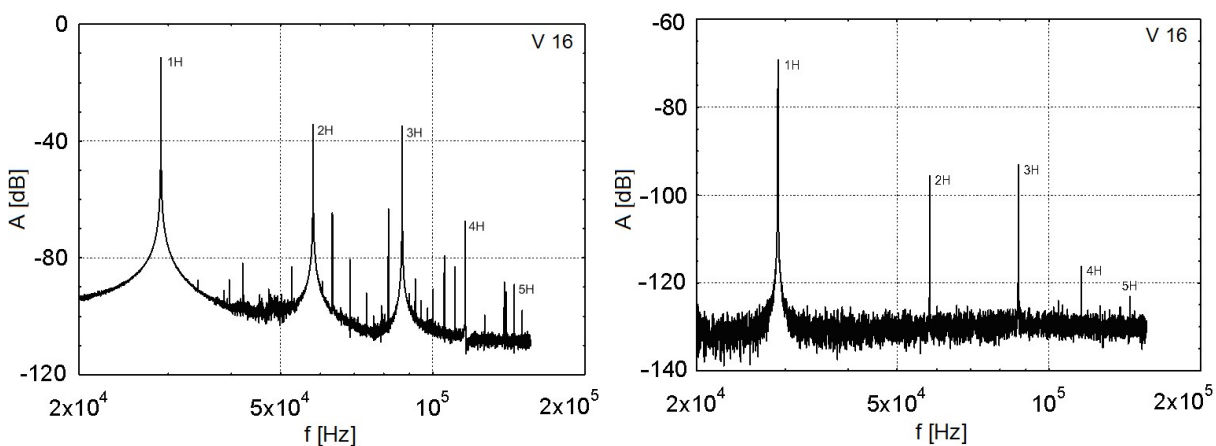
Výsledky měření referenčních vzorků reprezentuje vzorek č. 5 (obr. 5.49). Graf vlevo odpovídá příčné konfiguraci, graf vpravo podélné konfiguraci budiče B a snímače S.



Obr. 5.49. Frekvenční spektra přenosových charakteristik referenčního vzorku V5 pro dvě konfigurace budiče a snímače: vlevo – příčná; vpravo – podélná.

Z obou grafů je patrný postupný pokles amplitud s rostoucím pořadím harmonických frekvencí bez výskytu nelineárních efektů. Nižší hodnoty amplitud v případě podélné konfigurace budiče a snímače byly zapříčiněny nižší úrovní výstupního signálu vysokofrekvenčního budiče při použitém kmitočtu 29 kHz. Obdobných výsledků bylo dosaženo v případě všech referenčních vzorků.

Důsledek aplikace korozních cyklů se ve frekvenčních spektrech projevoval postupnými změnami korelujícími s počtem aplikovaných korozních cyklů. Frekvenční spektra vzorků po aplikaci 127 korozních cyklů reprezentuje vzorek 16 na obr. 5.50. V případě příčné konfigurace budiče a snímače (graf vlevo) ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky je hodnota amplitudy třetí 3H harmonické srovnatelná s amplitudou druhé 2H harmonické. Kromě harmonických frekvencí je zde patrný četný výskyt neharmonických frekvenčních složek, přičemž některé z jejich amplitud přesahují hodnoty amplitud čtvrté 4H a páté 5H harmonické frekvence. Ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky v podélné konfiguraci budiče a snímače (graf vpravo) amplituda třetí 3H harmonické mírně převyšuje hodnotu druhé 2H harmonické a patrný je také útlum amplitud čtvrté 4H a páté 5H harmonické frekvence.



Obr. 5.50. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku V16 po aplikaci 127 korozních cyklů pro dvě konfigurace budiče a snímače: vlevo – příčná; vpravo – podélná.

Výsledky měření všech jsou charakterizovány relativními hodnotami amplitud vyšších harmonických vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a druhou mocninou korelačního koeficientu r^2 . Průměrné hodnoty uvedených parametrů jsou pro jednotlivé skupiny vzorků a fáze měření porovnány v tab. 5.4. a tab. 5.5.

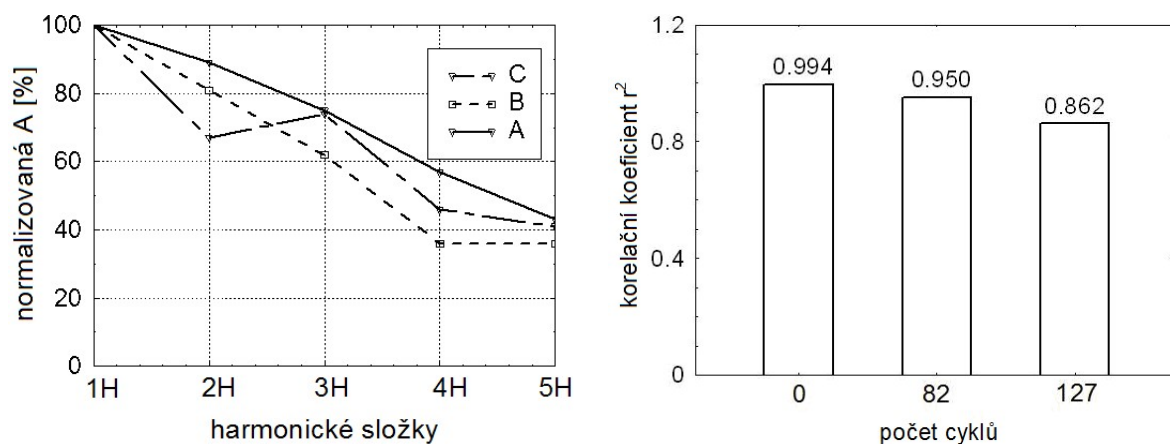
Tab. 5.4. Průměrné relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 z příčné konfigurace budiče a snímače.

| Vzorky | f_2/f_1 | f_3/f_1 | f_4/f_1 | f_5/f_1 | r^2 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| referenční | 89,0% | 75,4% | 57,6% | 43,5% | 0,994 |
| 82 cyklů | 81,2% | 62,3% | 36,6% | 36,6% | 0,950 |
| 127 cyklů | 67,3% | 74,0% | 46,2% | 41,4% | 0,862 |

Tab. 5.5. Průměrné relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 z podélné konfigurace budiče a snímače.

| Vzorky | f_2/f_1 | f_3/f_1 | f_4/f_1 | f_5/f_1 | r^2 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| referenční | 73,4 % | 50,0 % | 32,0 % | 19,1 % | 0,974 |
| 82 cyklů | 50,6 % | 51,8 % | 28,9 % | 7,2 % | 0,904 |
| 127 cyklů | 52,6 % | 57,0 % | 10,5 % | 15,8 % | 0,862 |

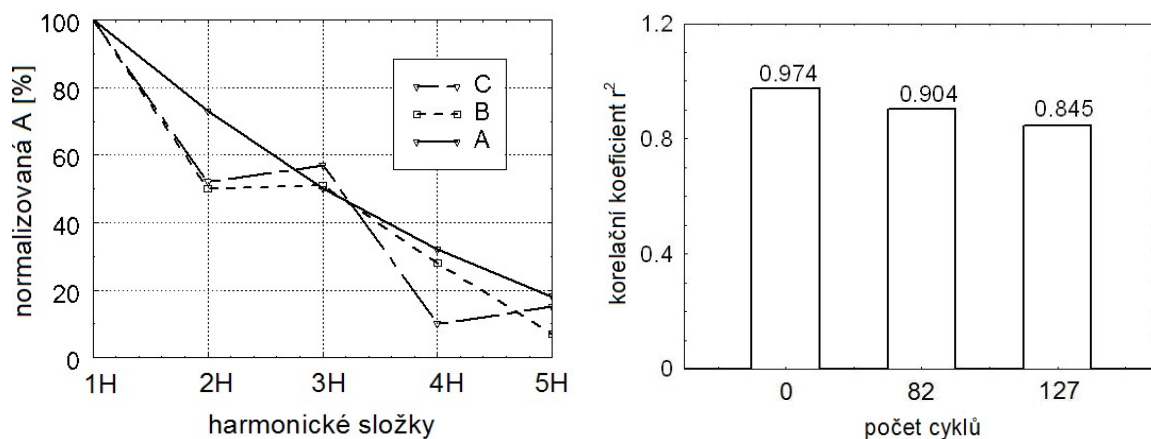
Grafické vyjádření tabelovaných hodnot je pro ilustraci uvedeno na obr. 5.51. a 5.52.



Obr. 5.51. Grafické zobrazení průměrných normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí odpovídající příčné konfiguraci budiče a snímače. Vlevo – normalizované hodnoty amplitud: A – referenční vzorky; B – po aplikaci 82 korozních cyklů; C – po aplikaci 127 korozních cyklů. Vpravo – druhá mocnina korelačního koeficientu r^2 .

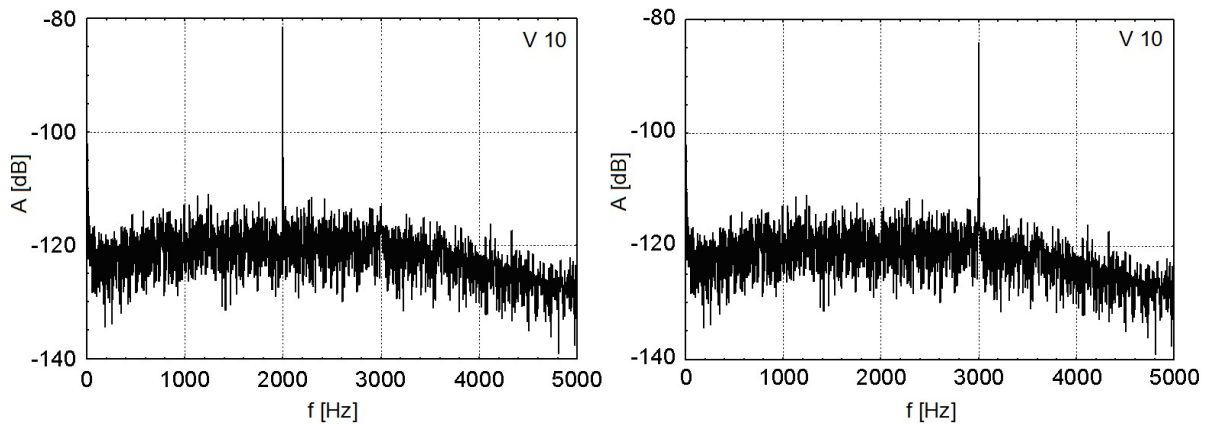
Na obr. 5.51. (vlevo) jsou vzájemně porovnány střední hodnoty normovaných amplitud ze všech etap měření. Křivka odpovídající skupině referenčních vzorků vykazuje pokles

relativních hodnot s rostoucím pořadím harmonických bez projevů nelineárních efektů. Na křivce odpovídající skupině vzorků po aplikaci 82 degradačních cyklů relativní hodnoty vyšších harmonických vykazují pokles do čtvrté harmonické a stejné hodnoty bylo dosaženo i v případě páté harmonické. Na obr. 5.51. (vpravo) jsou graficky porovnány hodnoty r^2 odpovídající křivkám A, B, C, které rovněž informují o zhoršené linearitě poklesu harmonických v důsledku aplikace korozních cyklů. Při podélné konfiguraci budiče a snímače bylo dosaženo obdobných výsledků, jak je pro ilustraci uvedeno na obr. 5.52.



Obr. 5.52. Grafické zobrazení průměrných normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí odpovídající podélné konfiguraci budiče a snímače. Vlevo – normalizované hodnoty amplitud: A – referenční vzorky; B – po aplikaci 82 korozních cyklů; C – po aplikaci 127 korozních cyklů. Vpravo – druhá mocnina korelačního koeficientu.

Aplikace metody se dvěma budícími signály blízkých kmitočtů byla realizována pro příčnou konfiguraci dvou budičů a snímače. Byla zaměřena na detekci první rozdílové složky kmitočtů budících signálů, která vzniká v důsledku nelinearity – výskytu nespojitostí a poruch ve struktuře vzorků. Rovněž tato měření prokázala korelaci nelineárních efektů s porušenou strukturou vzorků po aplikaci korozních cyklů. Při měření referenčních vzorků se rozdílová složka budících kmitočtů ve frekvenčním spektru přenosové charakteristiky nevyskytovala. V případě měření vzorků po aplikaci 82 degradačních cyklů již byly ve frekvenčním spektru rozdílové složky detekovány, jak je dokumentována na obr. 5.53. Graf uvedený vlevo odpovídá budícím signálům o kmitočtech $f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 31$ kHz. Ve frekvenčním spektru je zvýrazněna rozdílová složka kmitočtů na hodnotě 2 kHz. Graf vpravo odpovídá budícím kmitočtům $f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 32$ kHz. V tomto případě se dominantní amplituda nachází na rozdílové složce o hodnotě 3 kHz.



Obr. 5.53. Metoda se dvěma budícími signály blízkých kmitočtů – frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku V10 po aplikaci 82 degradačních cyklů: vlevo – budící kmitočty ($f_1 = 29\text{kHz}$, $f_2 = 31\text{ kHz}$); vpravo – budící kmitočty ($f_1 = 29\text{ kHz}$, $f_2 = 32\text{ kHz}$).

5.7.1.2 Diskuze výsledků

V první fázi experimentu při aplikaci metody s jedním budícím harmonickým signálem bylo prokázáno, že přenosové charakteristiky referenčních (nekorodovaných) vzorků nevykazovaly nelineární jevy při přenosu signálu. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorků po aplikaci osmdesáti dvou korozních cyklů obsahovala nelineární efekty korelující s defekty v důsledku počínající koroze ocelové výztuže. Při příčném i podélném buzení byly nelineární efekty patrné ve frekvenčních spektrech relativních hodnot amplitud vyšších harmonických, které nevykazovaly postupný pokles s rostoucím pořadím jako v případě referenčních vzorků. Při příčném buzení porušená struktura navíc produkovala neharmonické frekvenční složky při přenosu budícího signálu. Přenosové charakteristiky vzorků měřených po sto dvaceti sedmi korozních cyklech vykazovaly masivnější projev nelinearity korelující s důsledky pokročilejšího stupně koroze výztuže. Po následné destrukci vzorků byl stanoven hmotnostní úbytek oceli, který činil 12,58 % (průměrná hodnota ze šesti vzorků) [52]. Při aplikaci metody se dvěma budícími harmonickými signály se projevil důsledek koroze ocelové výztuže výraznou amplitudou na rozdílové složce dvou budících kmitočtů.

5.7.2 Železobetonový nosník

Po rozsáhlých laboratorních měřeních byla měřicí aparatura optimalizována pro možnost monitorování struktury rozměrnějších stavebních dílců in situ. Předmětem experimentu byl železobetonový nosník vyjmutý z mostní konstrukce v průběhu rekonstrukce mostu. Konkrétně se jednalo o nosník KA o rozměrech 0,5 m × 0,6 m × 11,5 m.

5.7.2.1 Uspořádání experimentu

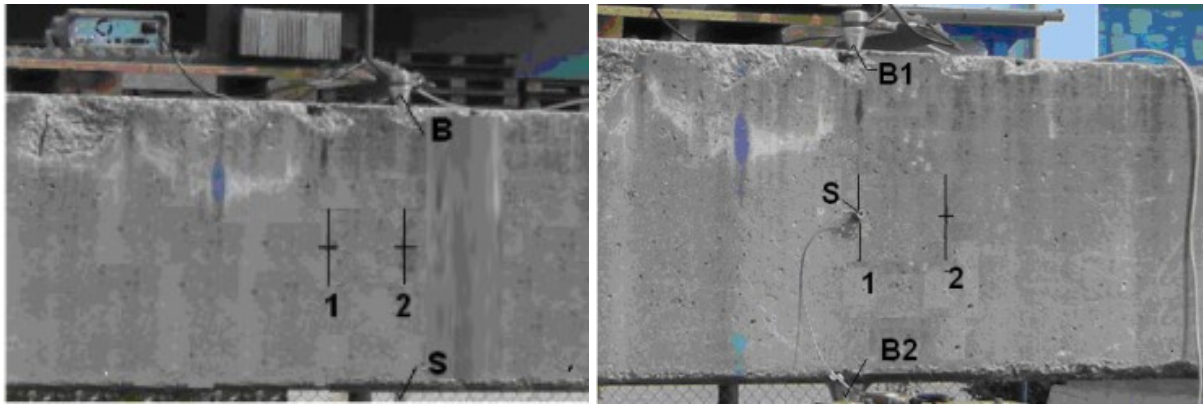
Nosník byl převezen do areálu výzkumných laboratoří Centra dopravního výzkumu v Tišnově, kde byl přes pružnou podložku uložen na dvě betonová svodidla (obr. 5.54.).



Obr. 5.54. Železobetonový nosník s osazeným zatěžovacím rámem.

Pro účely zatěžování byl sestaven speciální rám, který byl z bezpečnostních důvodů koncipován tak, aby bylo zatěžování realizováno pod nosníkem.

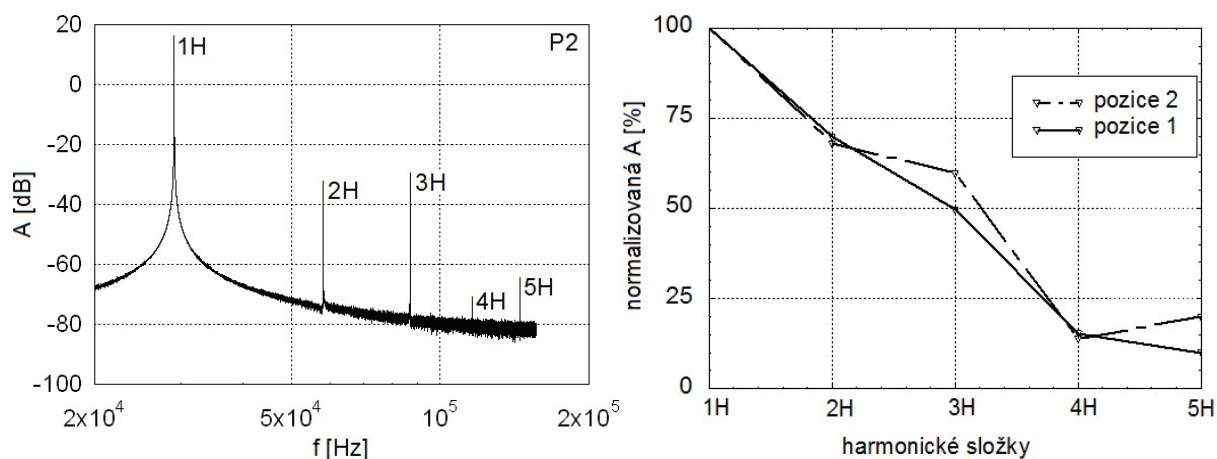
Měření nosníku probíhalo ve třech fázích: před jeho zatěžováním, v průběhu zatěžování a následně po jeho zatěžování. Cílem měření bylo monitorovat změny (poškození) strukturní integrity. Na obou stranách nosníku (pravé a levé) byla stanovena dvě místa (pozice) měření, vzájemně se lišící skladbou ocelové výztuže [45]. Schéma zobrazující místa měření (1; 2) včetně konfigurací budičů B a snímače S na pravé straně nosníku je zobrazeno na obr. 5.55.



Obr. 5.55. Schéma konfigurací budičů B a snímače S na pravé části nosníku: vlevo – metoda s jedním budícím signálem (B); vpravo – metoda se dvěma budícími signály (B1, B2).

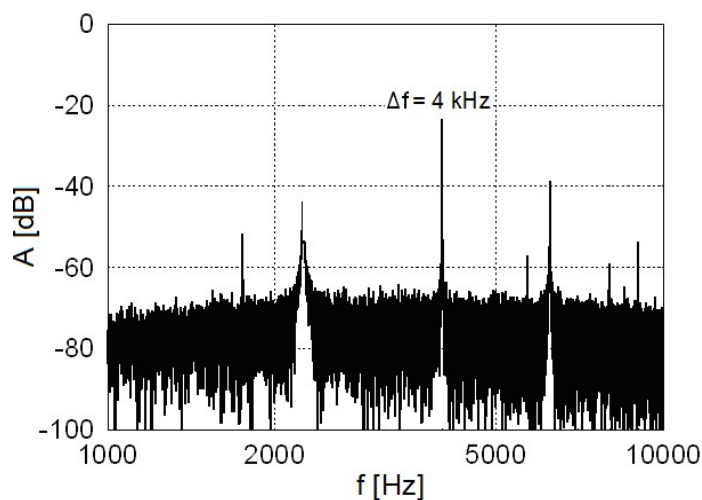
5.7.2.2 Výsledky měření

Prezentovány jsou výsledky z měření na obou pozicích, které se vzájemně lišily skladbou ocelové výztuže. První pozice měření (1) byla stanovena ve vzdálenosti 309 cm od konce nosníku, druhá pozice měření (2) ve vzdálenosti 291 cm od konce nosníku. Jako první byla použita metoda s jedním budícím signálem. Aplikován byl harmonický ultrazvukový signál o frekvenci $f = 29$ kHz, analyzovány byly přenosové charakteristiky nosníku zaznamenané snímačem. Konfigurace budiče B a snímače S jsou schematicky znázorněny na snímku uvedeném na obrázku 5.55 (vlevo). Výsledkem měření jsou frekvenční spektra přenosových charakteristik zobrazen na obr. 5.56. V grafu uvedeném vlevo je pro ilustraci zobrazeno frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na druhé pozici (P2). Ve frekvenčním spektru je patrný prudký pokles amplitud sudých harmonických frekvencí, přičemž amplitudy třetí 3H a páté 5H harmonické převyšují hodnoty amplitud druhé 2H a čtvrté 4H harmonické, což poskytuje informaci o výskytu nelineárních efektů v důsledku strukturních poruch. V grafu uvedeném vpravo 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 (P1). 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 . Pro měření na první pozici byla vypočtena 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.



Obr. 5.56. Frekvenční spektra přenosových charakteristik: vlevo – měření na druhé pozici (2); vpravo – grafické porovnání normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí na obou pozicích měření.

Jako druhá byla aplikována metoda se dvěma harmonickými ultrazvukovými signály o kmitočtech $f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 25$ kHz (dle obr. 5.55). Frekvenční spektrum odpovídající měření na druhé pozici měření (P2) zobrazuje graf na obr. 5.57.



Obr. 5.57. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na druhé pozici (2). Dva budící harmonické ultrazvukové signály ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 25$ kHz).

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) tato rozdílová složka nebyla ve frekvenčním spektru zvýrazněna.

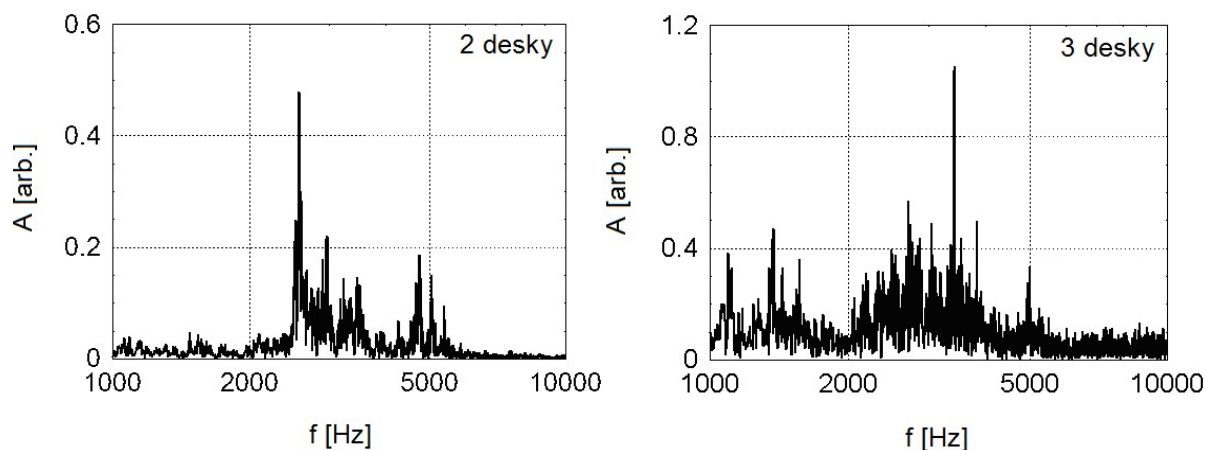
Po proměření nezátíženého nosníku následovalo dynamické zatěžování realizované dopadem ocelových desek o hmotnosti 320 kg (obr. 5.58.).



Obr. 5.58. Ukázka dynamického zatěžování nosníku.

Tři desky byly postupně spouštěny pomocí nakladače UNC z výšky 15 cm na dřevěnou podložku. Rám zatěžoval nosník po celé šířce prostřednictvím dvou nosníků tvaru I, které byly uloženy 17 cm od sebe na 1,5 cm silné lepence NAIP. Odezva na mechanický impuls, realizovaný dopadem ocelových desek, byla snímána současně dvěma snímači umístěnými na pozicích S1 a S2, dle obr. 5.55. (konfigurace vpravo).

Výsledná frekvenční spektra odezvy zaznamenané snímačem na pozici S1 jsou zobrazena na obr. 5.59.

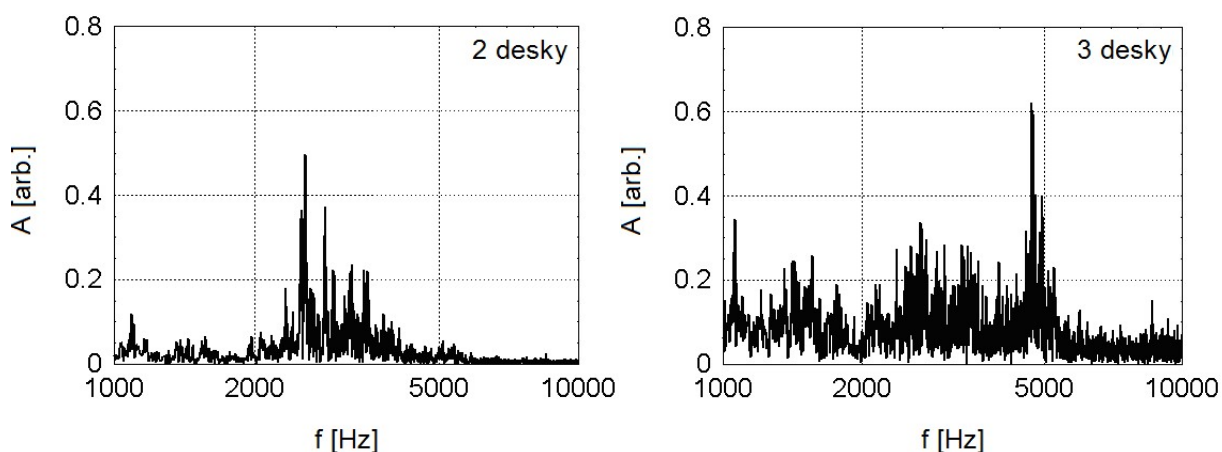


Obr. 5.59. Frekvenční spektra odezvy nosníku zaznamenané snímačem na pozici (1): vlevo – odezva na dopad dvou desek; vpravo – odezva na dopad tří desek.

Graf uvedený vlevo odpovídá dopadu dvou ocelových desek. V tomto případě se dominantní frekvence nachází na hodnotě 2,5 kHz. Frekvenční spektrum odezvy nosníku na vyšší intenzitu impulsu, realizovaném dopadem tří desek, zobrazuje graf uvedený vpravo.

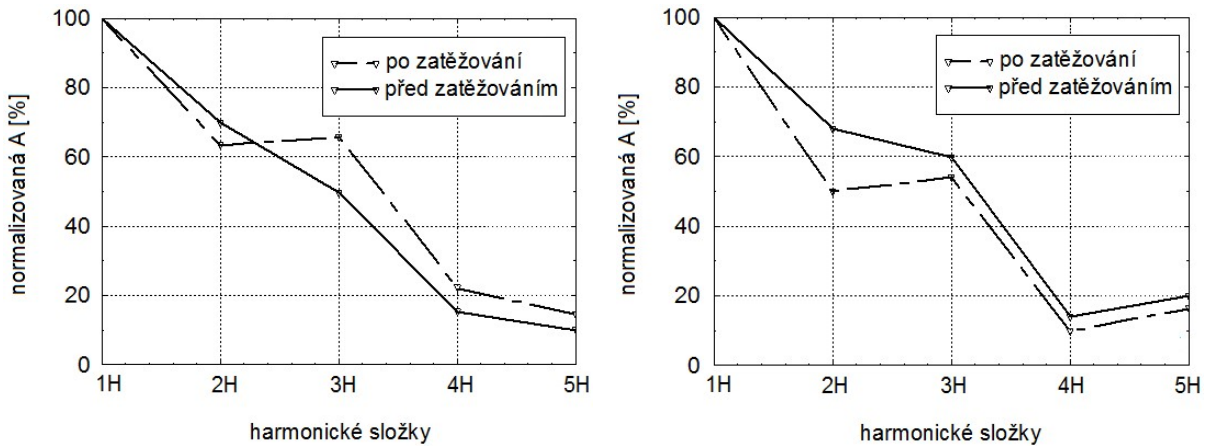
Dominantní frekvence se v tomto případě nachází na hodnotě 3,5 Hz, což odpovídá posunu o 1 kHz. Současně je v grafu patrný vyšší počet zvýrazněných frekvenčních složek v porovnání s frekvenčním spektrem odezvy na intenzitu impulsu realizovaném dopadem dvou desek, a to zejména v rozsahu 1 až 2 kHz.

Frekvenční spektra odezvy nosníku zaznamenané snímačem umístěným na pozici S2 jsou analogicky zobrazena na obr. 5.60. Ve frekvenčním spektru odezvy zaznamenané snímačem při dopadu dvou desek (graf vlevo) se dominantní frekvence nachází na hodnotě 2,5 kHz, shodně jako v případě snímače na pozici snímače S1. Při vyšší intenzitě budícího signálu se dominantní frekvence odezvy nosníku, zaznamenaná snímačem na pozici S2, nachází na vyšší hodnotě 4,7 kHz, což odpovídá posunu o 2,2 kHz. Ve frekvenčním spektru je opět patrný nárůst frekvenčních složek v rozsahu 1 až 2 kHz.



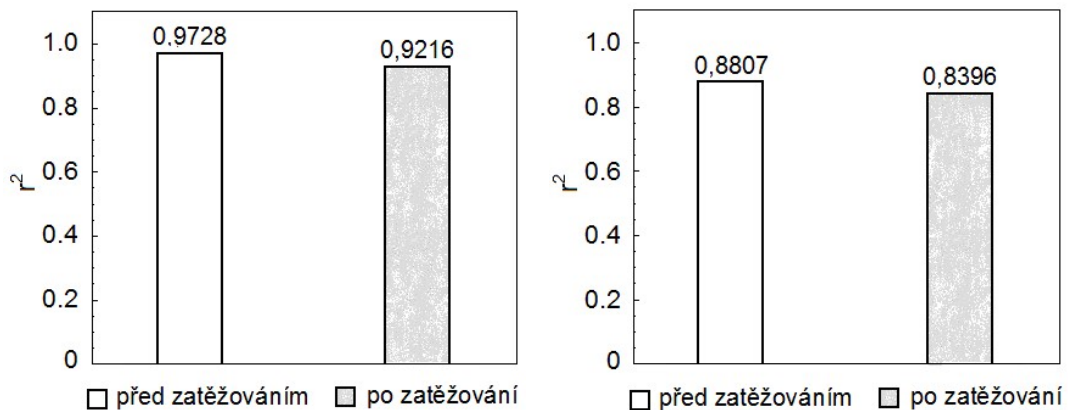
Obr. 5.60. Frekvenční spektra odezvy nosníku zaznamenané snímačem na pozici (2): vlevo – odezva nosníku na dopad dvou desek; vpravo – odezva nosníku na dopad tří desek.

Po ukončeném zatěžování a odlehčení byl nosník opakovaně proměřován metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie. Jako první byla aplikována opět metoda s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem o frekvenci 29 kHz. V grafech (obr. 5.61.) jsou vzájemně porovnány relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí získaných z měření před zatěžováním a po zatěžování nosníku, pro obě pozice měření. Graf uvedený vlevo odpovídá měření na pozici snímače (S1). 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.



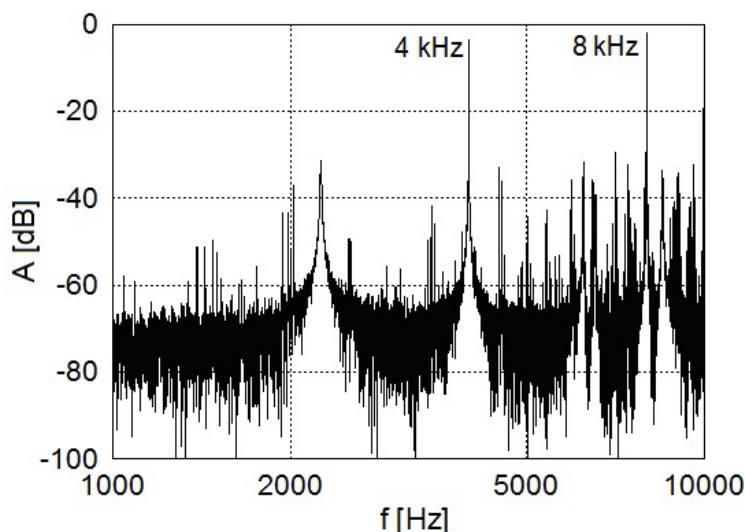
Obr. 5.61. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí před zatěžováním a po zatěžování nosníku: vlevo – první pozice měření (1); vpravo – druhá pozice měření (2).

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 (S2). Na obou křivkách, před mechanickým zatěžováním i po zatěžování nosníku, jsou patrné nelineární efekty. Přičemž silnější projev nelinearity je patrný opět na přenosové charakteristice odpovídající měření 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. Grafické vyjádření hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu pro obě pozice měření je zobrazeno na obr. 5.62.



Obr. 5.62. Grafické vyjádření hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 , před zatěžováním a po zatěžování nosníku: vlevo – měření na první pozici (1); vpravo – měření na druhé pozici (2).

Měření se dvěma budícími harmonickými signály bylo realizováno opět shodně jako před zatěžováním nosníku, aplikovány byly kmitočty $f_1 = 29 \text{ kHz}$, $f_2 = 25 \text{ kHz}$. Na obou pozicích měření byly dosaženy téměř srovnatelné výsledky, které reprezentuje graf odpovídající měření na druhé pozici (obr. 5.63.). Ve frekvenčních spektrech je patrný vyšší počet parazitních složek, které přesahují hodnoty šumového pozadí. Mezi nimi dominuje amplituda rozdílové složky budících kmitočtů na hodnotě 4 kHz a srovnatelné hodnoty dosahovala i amplituda druhé harmonické rozdílové složky na hodnotě 8 kHz.



Obr. 5.63. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na pozici (2) – po zatěžování nosníku. Dva budící harmonické ultrazvukové kmitočty ($f_1 = 29 \text{ kHz}$, $f_2 = 25 \text{ kHz}$).

5.7.2.3 Diskuze výsledků

Na obou stranách nosníku (pravé a levé) byla stanovena dvě měřicí místa (pozice měření), vzájemně se lišící skladbou ocelové výztuže dle výkresové dokumentace. Měření metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie bylo realizováno před dynamickým zatěžováním nosníku a následně po jeho zatěžování. V průběhu zatěžování byla snímána odezva nosníku na mechanický impuls vyvolaný dopadem ocelových desek.

Při analýze výsledků měření metodou s jedním budícím harmonickým ultrazvukovým signálem byly hodnotícími parametry amplitudy vyšších harmonických a druhá mocnina korelačního koeficientu. V případě porušené struktury se nelineární efekty projevovaly zvýšením hodnot amplitud lichých harmonických a poklesem hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu v důsledku snížené linearity přenosové charakteristiky.

Ve frekvenčních spektrech získaných při měření se dvěma budícími signály blízkých kmitočtů byl indikátorem nelinearity a strukturního poškození vznik rozdílových složek budících kmitočtů. Uvedené projevy nelinearity byly pozorovány při měření před zatěžováním na druhé pozici měření a po realizaci dynamického zatěžování se vyskytovaly na obou pozicích měření.

Odezva nosníku při jeho dynamickém zatěžování byla snímána současně na obou pozicích měření. Frekvenční analýza odezvy zaznamenané při dvou různých intenzitách budícího impulsu prokázala frekvenční změny na obou pozicích měření. Vyšší intenzita mechnaického impulsu vyvolala posun dominantních frekvencí v důsledku vzniku nových, případně růstu stávajících, trhlin ve vnitřní struktuře nosníku.

5.8 Předpínací ocelová lana

Poruchy a havárie některých mostních objektů z nedávné doby, spojené s korozi předpínací výztuže, ukazují na nutnost řešení otázky spolehlivosti a životnosti předpjatých mostních konstrukcí. Na řešení uvedené problematiky se podílím v rámci řešení projektu „Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků“ (TAČR CK01000108, doba řešení 04/2020 – 12/2022). Projekt je zaměřen na zkoumání uplatnění metod nelineární ultrazvukové spektroskopie a magnetické paměti materiálu z hlediska jejich využití v kombinaci s dalšími nedestruktivními metodami pro navržení nových přístupů pro detekci korozního napadení předpjaté výztuže zabudované v konstrukci. Do řešení projektu jsem zapojena jako spoluřešitelka části zaměřené na experimentální studium nelineární ultrazvukové spektroskopie. Experimenty jsou sestavovány a realizovány ve výzkumných laboratořích CDV, v.v.i.

5.8.1 Nepředpjaté ocelové lano

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. 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, obr. 5.64.



Obr. 5.64. Ukázka sedmiprutového ocelového lana.

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 (obr. 5.65.).



Obr. 5.65. Ocelové lano s osazeným korozním článkem.

Korozní roztok byl vytvořen rozpuštěním 30 g NaCl v 1 litru destilované vody při laboratorní teplotě. Korozní proces byl urychlován elektrickým proudem za použití laboratorního zdroje Peak Meter HY1503D 0-15V/0-3A. Jako anoda (pole+) bylo do obvodu zapojeno korodované ocelové lano a katoda (pole-) externí elektroda, zhotovená z mědi. Lano bylo polarizováno konstantní proudovou hustotou $j = 3 \text{ mA} / \text{cm}^2$. Korozi byla vystavena pouze střední část lana v délce 50 mm, zbývající část lana v korozním článku byla chráněna izolací (obr. 5.65.).

Důsledky postupující koroze byly analyzovány pomocí lineárních a nelineárních metod. 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 [82].

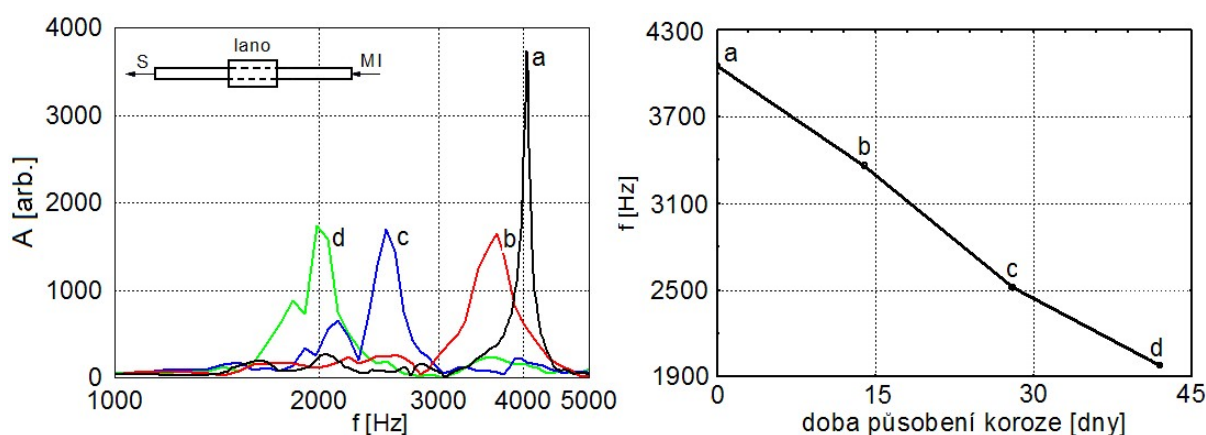
5.8.1.2 Lineární měření

Aplikována byla impact-echo metoda založená na šíření napěťových vln, které jsou generovány mechanickým impulsem (odstavec 5.6.1.2). Mechanický impuls MI byl realizován speciálním kladívkem na konci lana v podélném směru, odezva byla snímána snímačem S na opačném konci lana. Sledovány byly hodnoty podélných frekvencí v závislosti na postupující korozi. Výsledné hodnoty jsou prezentovány numericky v tab. 5.6. a graficky na obr. 5.66.

Tab. 5.6. Hodnoty dominantních frekvencí nepředpjatého ocelového lana v jednotlivých fázích korozního procesu.

| Fáze korozního procesu | a – před korozi | b – 14. den | c – 28. den | d – 42. den |
|------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| Dominantní frekvence | 4 050 Hz | 3 360 Hz | 2 520 Hz | 1 980 Hz |

Graf na obr. 5.66. (vlevo) zobrazuje frekvenční spektra odezvy lana na mechanický impuls v jednotlivých fázích korozního procesu. Z grafu je patrný postupný pokles hodnot dominantních frekvencí lana (b, c, d) a jejich amplitud s rostoucí dobou působení korozního procesu.



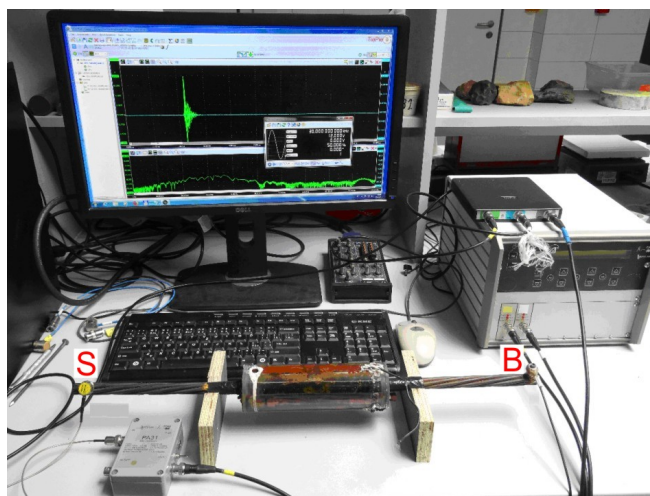
Obr. 5.66. Vlevo – frekvenční spektra odezvy lana s korozním článkem: a - před zahájením korozního procesu (nepoškozené lana), b - 14. den působení korozního procesu, c - 28. den, d - 42. den; vpravo – frekvenční závislost na době působení korozního procesu.

Dominantní frekvence na hodnotě 4 050 Hz (křivka a) odpovídá měření nepoškozeného lana před začátkem působení elektrochemické koroze. Z porovnání je patrné posunutí dominantní frekvence (křivka b) po čtrnácti dnech působení koroze na hodnotu 3 360 Hz, což odpovídá

posunu hodnoty o 690 Hz. Po dvaceti osmi dnech působení se dominantní frekvence (křivka) nacházela na hodnotě 2 520 Hz, ve srovnání s neporušeným lanem posun činí 1 530 Hz. Poslední dominantní frekvence (křivka d) se nachází na hodnotě 1 980 Hz, což znamená posun o 2 070 Hz ve srovnání s hodnotou frekvence neporušeného lana osazeného korozním článkem. Experimentálně stanovená hodnota podélné frekvence lana bez korozního článku činila 4 110 Hz, což je srovnatelné s teoreticky vypočítanou hodnotou 4 180 Hz. Graf uvedený obr. 5.66. vpravo zobrazuje závislost dominantních frekvencí na době působení korozního procesu. Hodnoty frekvencí klesají s narůstající dobou koroze. Křivka zobrazující pokles hodnot vykazuje téměř lineární průběh, hodnota korelačního koeficientu $r^2 = 0,9937$.

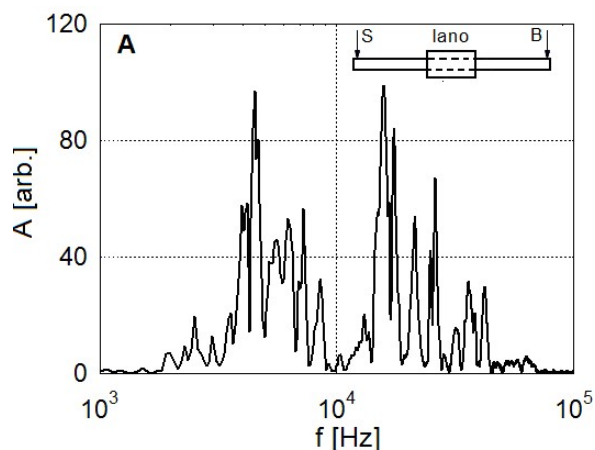
5.8.1.3 Nelineární měření

Použity byly nelineární ultrazvukové techniky, které zkoumají amplitudové závislosti rezonanční frekvence. Tyto metody náleží do skupiny rezonančních metod, nazývají se Single Mode Nonlinear Ultrasound Spectroscopy – SIMONRUS, v případě buzení na nižších akustických frekvencích jako SIMONRAS. V odezvě vzorků jsou detailně vyšetřovány frekvenční posuny rezonančního maxima jednoho vlastního módu v závislosti na změnách amplitudy buzení (odstavec 3.1, obr. 3.1.). Měření bylo realizováno v příčném směru na povrchu lana. Budící signál B byl realizován elektrickým harmonickým sinusovým signálem, odezva lana byla snímána piezoelektrickým snímačem S, dle obr. 5.67. Pro monitorování posunu vrcholů rezonančních maxim, v závislosti na amplitudě buzení, byl budící signál realizován se čtyřmi napěťovými hodnotami (12 V, 10 V, 8 V, 6 V) v každé fázi měření.



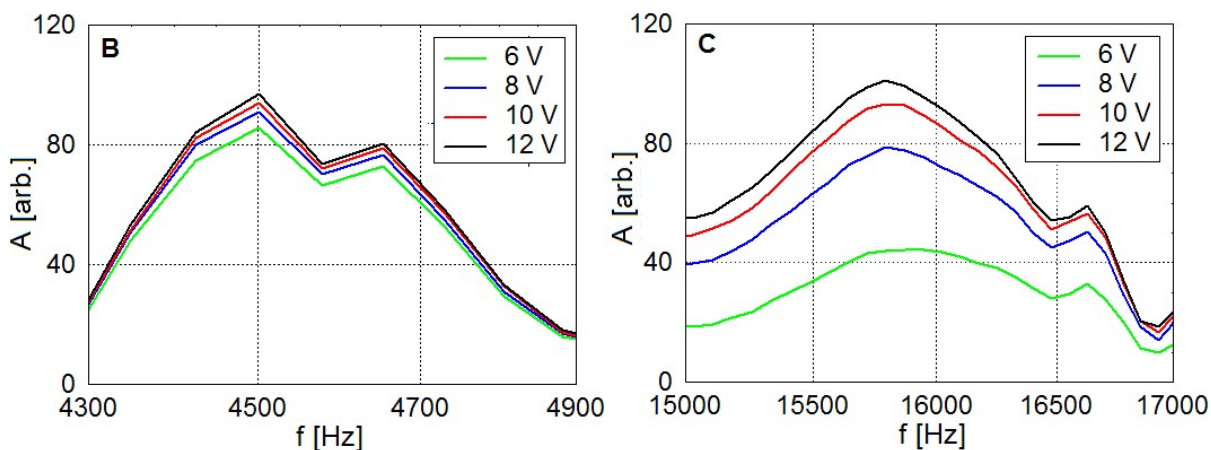
Obr. 5.67. Ukázka experimentálního uspořádání s vyznačením konfigurace budiče B a snímače S.

Výsledkem měření jsou frekvenční spektra odezvy lana na elektrický impuls, zobrazená graficky na následujících obrázcích. Obr. 5.68. odpovídá prvním výsledkům měření před zahájením korozního procesu, při hodnotě budícího napětí 12 V. Dominantní frekvence se vyskytují ve dvou frekvenčních rozsazích, jak je patrné z grafu A.



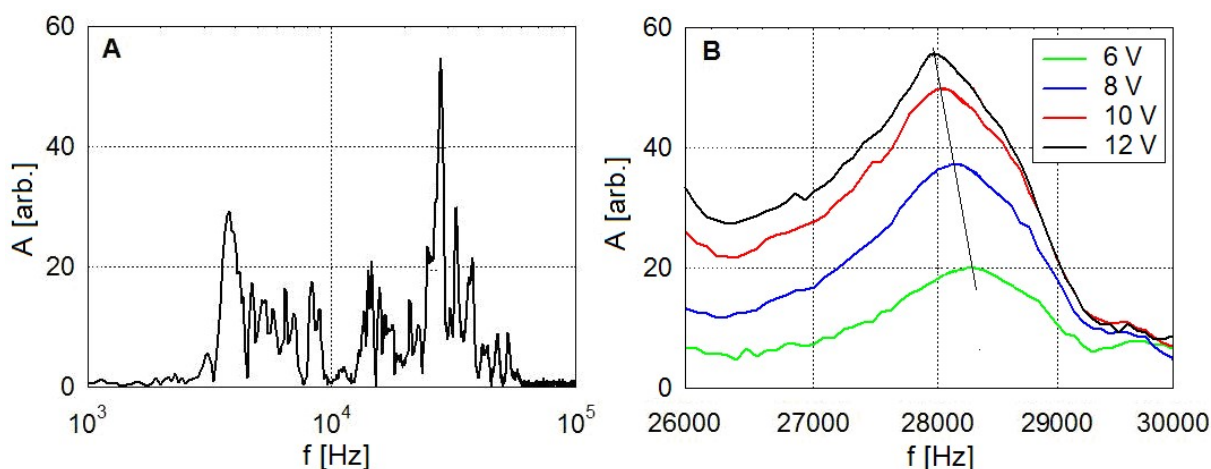
Obr. 5.68. Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření před zahájením korozního procesu – celý frekvenční rozsah.

Následující obr. 5.69. 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. 5.69. Detail frekvenčních rozsahů s výskytem dominantních frekvencí pro čtyři hodnoty budícího napětí.

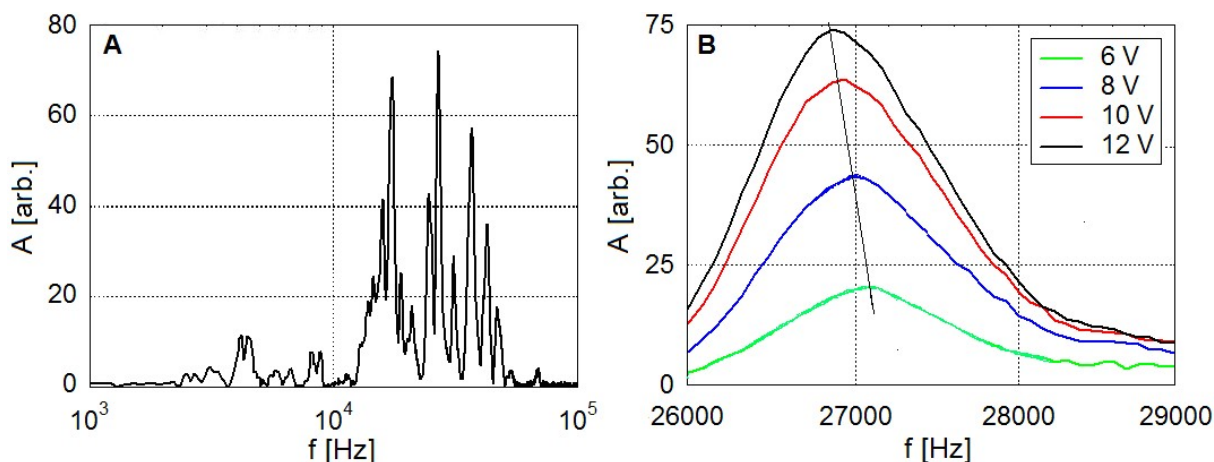
Další obr. 5.70. zobrazuje výsledky z druhého měření lana, po čtrnácti dnech působení korozního procesu.



Obr. 5.70. 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. Graf B zobrazuje detail dominantních frekvencí. V tomto případě je v grafu patrná závislost vrcholů maxim na hodnotě budícího napětí. Při nejvyšší hodnotě 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 ve srovnání s hodnotou dominantní frekvence při nejvyšším budícím napětí 12 V.

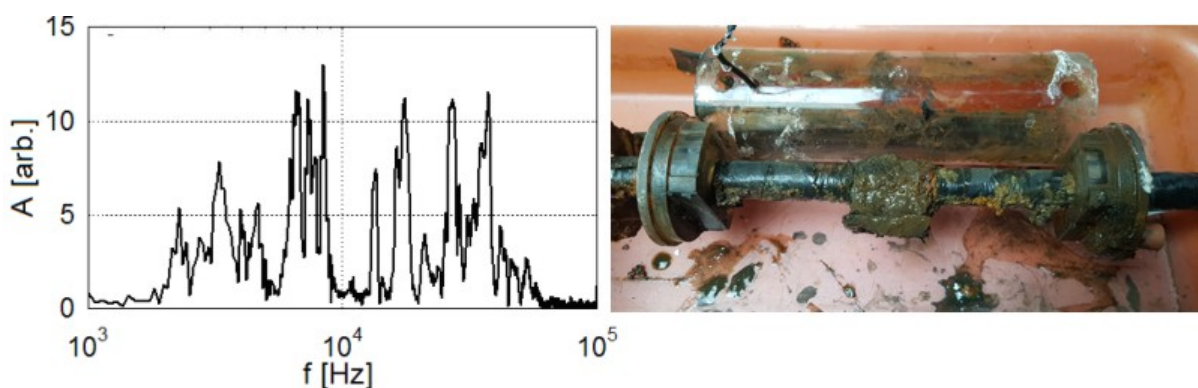
Na obr. 5.71. jsou analogicky porovnány výsledky měření po dvaceti osmi dnech působení korozního procesu.



Obr. 5.71. Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po dvaceti osmi dnech působení zrychlené koroze: A – celý frekvenční rozsah, B – detail vrcholů frekvenčních maxim.

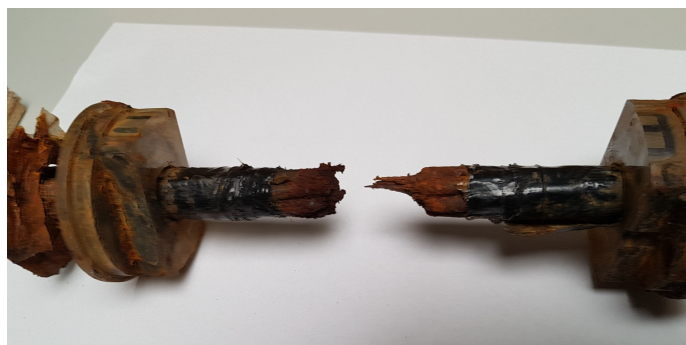
Dominantní frekvence se opět vyskytuje pouze ve druhém frekvenčním rozsahu. Graf B ukazuje obdobný trend posunu vrcholů frekvenčních maxim. Vrchol dominantní frekvence odpovídající budícímu napětí o hodnotě 12 V se nachází na hodnotě 26 800 Hz a opět dochází k nárůstu hodnot s poklesem intenzity budícího napětí. Při nejnižší hodnotě napětí 6 V se dominantní frekvence nachází na hodnotě 27 100 Hz. Frekvenční posun v tomto případě činí 300 Hz vzhledem k nejvyšší hodnotě budícího napětí 12 V.

Graf na obr. 5.72. (vlevo) prezentuje výsledky měření po čtyřiceti dvou dnech působení korozního procesu.



Obr. 5.72. Vlevo – frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po čtyřiceti dvou dnech působení zrychlené koroze; vpravo – ukázka lana po vyjmutí z korozního článku.

Z porovnání s grafem A (obr. 5.71.) je ve frekvenčním spektru patrný vysoký útlum signálu ve druhém frekvenčním rozsahu, amplitudy frekvencí nepřesahují úroveň šumového pozadí. Po posledním měření bylo lano vyjmuta z korozního článku a byla provedena vizuální prohlídka části lana podrobené korozi. Ukázka důsledků působení zrychleného korozního procesu je zdokumentována na obr. 5.72. (vpravo). Nechráněná část lana je obalena vrstvou rzi a korozních zplodin. Snímek lana po odstranění vrstvy korozních zplodin je zobrazen na obr. 5.73.



Obr. 5.73. Snímek lana po odstranění vrstvy korozních zplodin.

Na snímku uvedeném na obr. 5.73. jsou patrné důsledky koroze. Po čtyřiceti dvou hodinách působení zrychlené koroze zcela zkorodovalo všech šest vnějších prutů, centrální přímý prut byl korozí oslaben a přetržen.

5.8.1.4 Diskuze výsledků

V případě lineárního měření jsme z odezvy lana na mechanický impuls vyhodnotili změny lineárních materiálových charakteristik – rezonanční frekvence/rychlosti vlny jako funkci doby korozního působení. Frekvenční spektra ukázala, že hodnoty dominantních frekvencí se postupně snižovaly s rostoucí dobou působení korozního procesu. Frekvenční spektrum z posledního měření (po čtyřiceti dvou dnech působení koroze), vykazovalo stejný trend beze změn, které by upozornily na totální poškození lana.

V případě nelineárních měření jsme zkoumali posun rezonanční frekvence jako funkci hodnoty budící amplitudy/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). Vizuální kontrola ukázala úplné zkorodování všech šesti vnějších prutů, oslabení a přetržení centrálního prutu. Vysoká ztráta přenosu signálu byla způsobena poškozením lana v důsledku postupující koroze. Použití nelineární ultrazvukové metody prokázalo, že nárůst nelinearity je citlivějším indikátorem kumulativního mikro-poškození uvnitř materiálu v důsledku korozního napadení ve srovnání s použitými lineárními charakteristikami.

5.8.2 Předpjaté ocelové lano

Pro účely provádění zkoušek na samotných lanech a možnosti provádět zkoušky pro různé úrovně předpětí lan a při různých stupních jejich nakorodování byl navržen a zhotoven vyztužený předpínací rám o délce 3,1 m, výztuhami rozdělen na pět sekcí. Korozní válec byl v tomto případě nahrazen boxem s odnímatelným horním víkem pro možnost vizuální kontroly lana a optimalizaci průběhu korozního procesu, obr. 5.74. (vlevo). Navrženy a zhotoveny byly prototypy vlnodů pro přenos budícího signálu do testovaného objektu a pro záznam signálu jeho odezvy [83]. Pro testování samostatných lan byly zhotoveny dva typy vlnodů: typ A – 1 ks pro přenos budícího signálu z výkonového piezokeramického vysílače HTP03 s koncentrátorem mechanického vlnění a 1 ks pro přenos signálu odezvy (liší se

pouze velikostí kontaktní plochy); typ B – 1 ks pro přenos signálu z výkonového piezokeramického vysílače HTP02, obr. 5.74. (vpravo).



Obr. 5.74. Vlevo – detail korozního boxu s vloženým lanem; vpravo – jednotlivé typy vlnovodů.

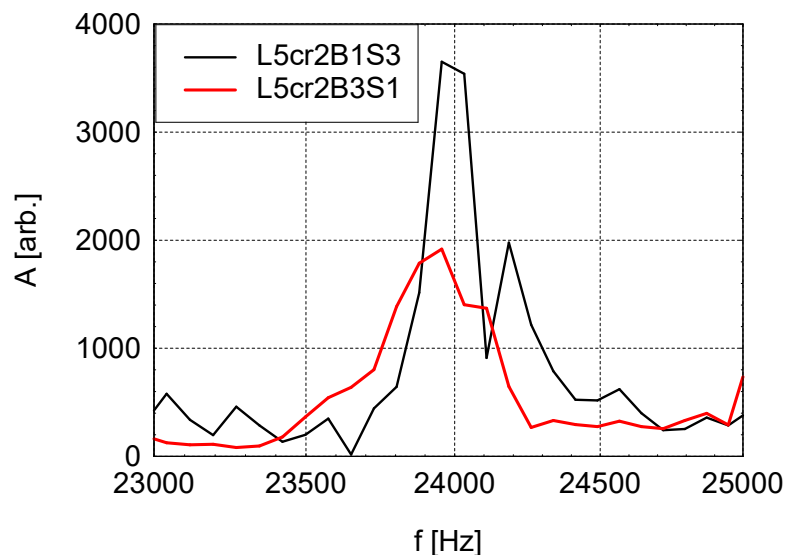
Korozní box byl nainstalován na ocelové lano po jeho předpětí, v první sekci rámu. Na obr. 5.75. je zobrazen předpínací rám s korozním boxem připojeným ke zdroji elektrického proudu pro urychlování koroze (odstavec 5.8.1). Na laně jsou označeny pozice měření (1, 3) pro označení konfigurace budiče a snímače při měření.



Obr. 5.75. Pohled na předpínací rám s předpjatým lanem s připojeným korozním boxem a označením pozic měření (1, 3).

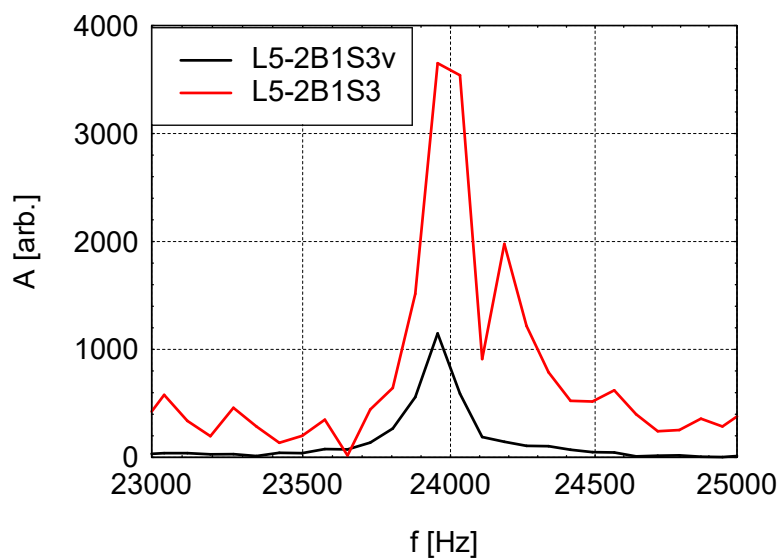
5.8.2.1 Výsledky měření

Proměřováno bylo předpjaté lano označené L5. Při monitorování důsledků postupující koroze byla zkoumána možnost využití různých parametrů pro hodnocení nelineární dynamické odezvy lana. Aplikovány obě varianty metody buzení, s jedním a se dvěma budícími signály. Při aplikaci metody s jedním budícím signálem byly proměřovány dvě vzájemné konfigurace budiče B a snímače S (B1S3 a B3S1), obr. 5.76. Cílem měření byla jednak optimalizace umístění budiče a snímače na korodovaném laně (L5) a ověření vlivu použití vlnovodů na přenos budícího signálu, obr. 5.77.



Obr. 5.76. Frekvenční spektra odezvy lana L5 při dvou konfiguracích budiče B a snímače S, druhé měření cr2.

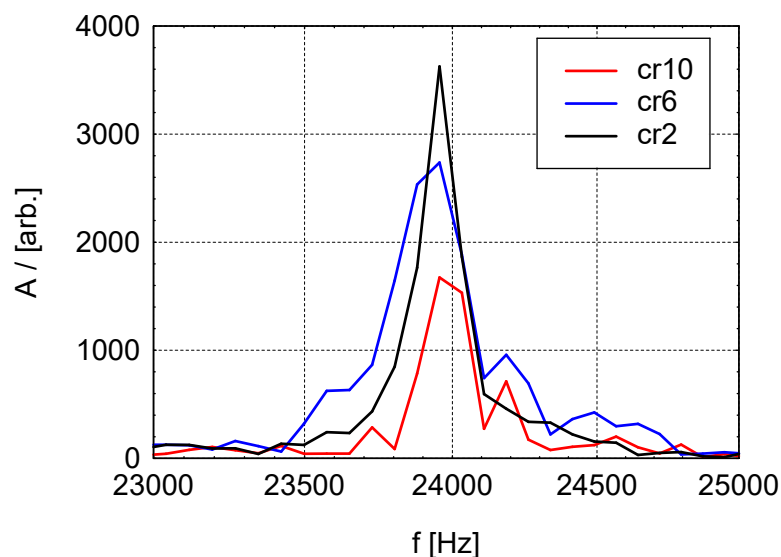
Dominantní frekvence se v obou případech nachází na stejné hodnotě 23 600 Hz, patrný je pouze vyšší útlum signálu v případě konfigurace B3S1.



Obr. 5.77. Frekvenční spektra odezvy lana L5 na budící signál realizovaný a snímáný bez vlnodů L5-2B1S3 a za použití vlnodů L5-2B1S3v, druhé měření cr2.

Rovněž z grafu na obr. 5.77. je patrné, že připojením vlnodů nedochází ke zkreslení signálu, pouze dochází k vyššímu útlumu signálu.

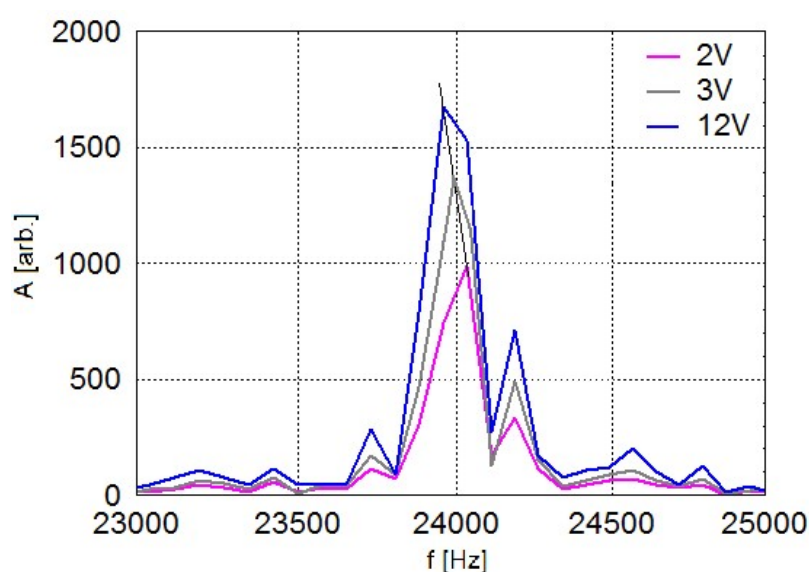
Narůstající doba působení korozního procesu se ve frekvenčních spektrech odezvy projevovala postupným útlumem signálu, jak je patrné z obr. 5.78.



Obr. 5.78. Frekvenční spektra odezvy lana ze tří měření: cr2 – 48 h, cr6 – 408 h, cr10 – 593 h působení koroze.

V grafu jsou porovnána frekvenční spektra ze tří fází korozního procesu: cr2 odpovídá měření po čtyřiceti osmi hodinách (dále 48 h) působení koroze, cr6 odpovídá měření po čtyřech stech osmi hodinách (dále 408 h) působení koroze a cr10 po pěti stech devadesáti třech hodinách (dále 593 h) působení koroze. Od šestého měření cr6 byla na křivkách, kromě dominantní frekvence 23 955 Hz, zvýrazněna také frekvenční složka 24 185 Hz.

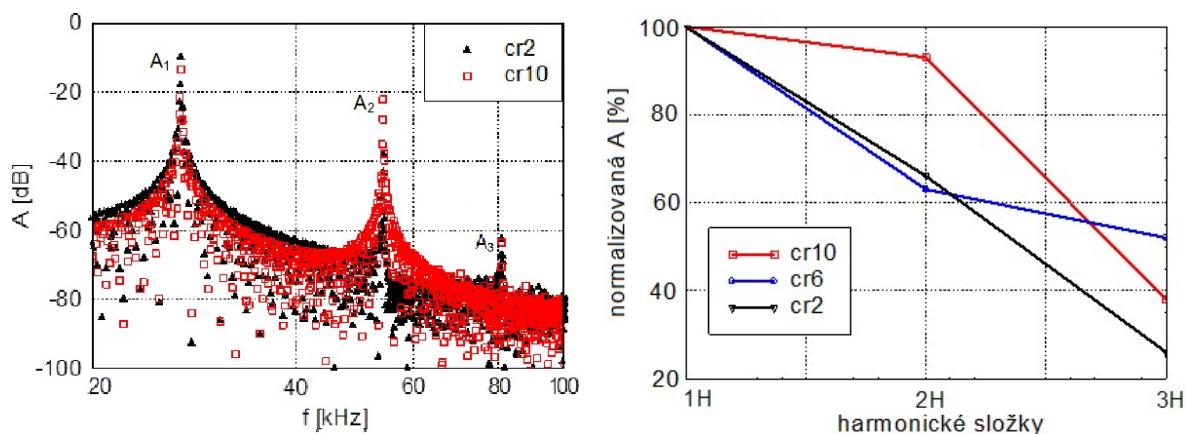
Na obr. 5.79. je zobrazen posun frekvenčních vrcholů maxim v závislosti na intenzitě budícího signálu.



Obr. 5.79. Frekvenční spektra odezvy lana na budící signály realizované budícím napětím o hodnotách 2 V, 3 V a 12 V, desáté měření cr10.

Použita byla ultrazvuková technika, která zkoumá amplitudovou závislost rezonanční frekvence (odstavec 5.8.1.3), byl vyhodnocován vliv změny intenzity budícího signálu na posun dominantní frekvence, obr. 5.79. Na křivce, která odpovídá v pořadí desátému měření lana, je patrný 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 působení korozního procesu došlo k přetržení tří vnějších prutů lana.

Aplikován byl současně kontinuální budící signál o frekvenci 27 kHz. Z frekvenčních spekter odezvy lana byl vyhodnocován korelační koeficient r^2 pro posouzení linearitu poklesu vyšších harmonických v jednotlivých fázích korozního procesu. Na obr. 5.80. (vlevo) jsou pro ilustraci porovnána frekvenční spektra vyšších harmonických z druhého a desátého měření. Grafické vyjádření normalizovaných amplitud ze tří měření (cr2, cr6 a cr10) je pro ilustraci uvedeno na obr. 5.80. vpravo.



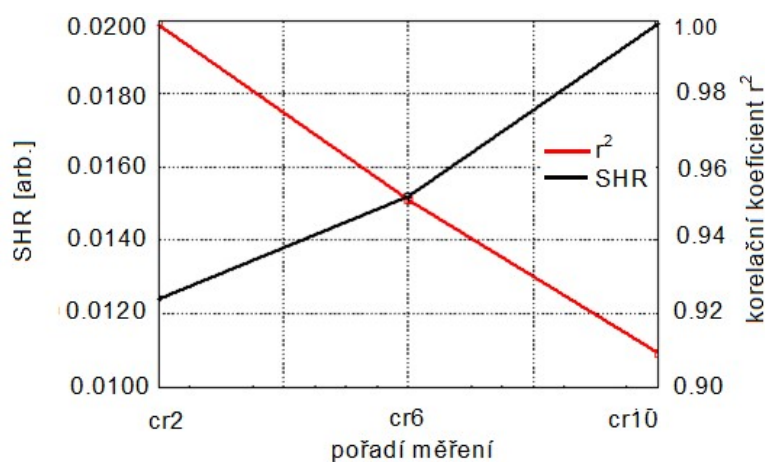
Obr. 5.80. Odezva lana na kontinuální budící signál: vlevo – frekvenční spektra odezvy z druhého cr2 a desátého cr10 měření; vpravo – normalizované hodnoty amplitud vyšších harmonických z měření: cr2, cr6 a cr10.

Z grafu na obr. 5.80. (vpravo) je patrná změna průběhu vyšších harmonických v závislosti na pořadí měření (fázi korozního procesu), jak informuje i vypočtená hodnota korelačního koeficientu r^2 . 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, zvyšuje se s růstem poruch (trhlin) ve struktuře testovaného objektu [72]. V tab. 5.7. je uveden přehled numerických hodnot sledovaných parametrů ze tří fází korozního procesu (cr2, cr6 a cr10).

Tab. 5.7. Hodnoty amplitud harmonických frekvencí (A), jejich relativních hodnot vzhledem k první harmonické, parametru SHR a druhé mocniny korelačního koeficientu (r^2) ze tří fází 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 | 13,3 | 0,0124 | 66,4 % | 26,1 % | 0,9986 |
| cr6 – 408 h | 43,7 | 29,0 | 23,0 | 0,0152 | 63,1 % | 52,6 % | 0,9520 |
| cr10 – 593 h | 47,1 | 44,2 | 18,0 | 0,0199 | 93,8 % | 38,2 % | 0,9082 |

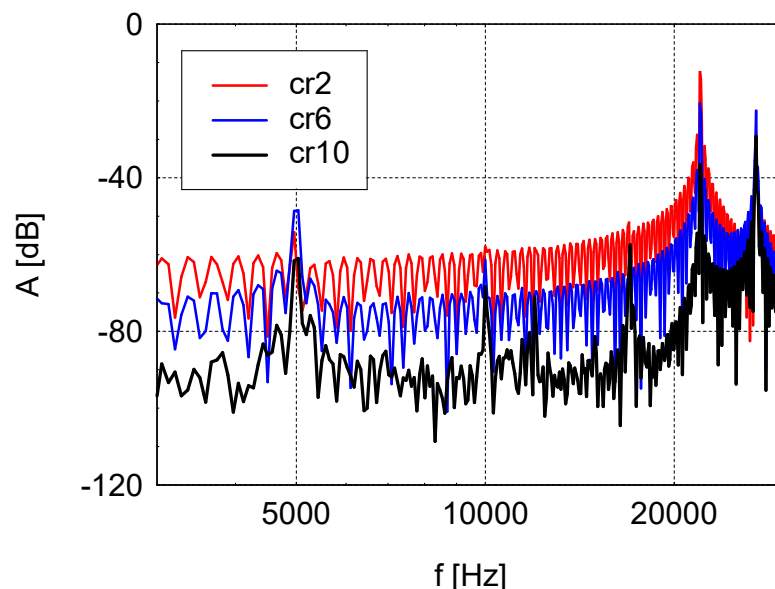
Hodnoty parametru SHR vykazují nárůst s délkou působení koroze v důsledku vzrůstajícího výskytu nelineárních jevů. Hodnoty druhé mocniny koeficientu r^2 s postupující korozi vykazují pokles v důsledku zhoršující se linearitu poklesu vyšších harmonických frekvencí. Oba hodnotící parametry informují o nárůstu nelineárních jevů s postupujícím poškozením struktury lana v důsledku působení korozního procesu. Jejich grafické vyjádření je zobrazeno na obr. 5.81.



Obr. 5.81. Grafické zobrazení závislosti hodnot 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. 3.3b). Lana byla buzena současně dvěma budiči (HTP02 – B a HTP03 – A) umístěnými na pozici 1 a 3 (dle obr. 5.75.). Snímač pro detekci rozdílové složky byl umístěn ve střední části lana. Realizováno bylo buzení s několika variantami dvojic 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 22 kHz a 27 kHz, obr. 5.82.



Obr. 5.82. Frekvenční spektra přenosových charakteristik lana z měření se dvěma budícími kmitočty ($f_1 = 22$ kHz, $f_2 = 27$ kHz).

Z grafu je patrné, že v případě měření cr2 (po 48 h působení koroze) amplituda rozdílové frekvenční složky $\Delta f = 5$ kHz jen mírně převyšuje úroveň šumového pozadí (převýšení ~ 5 dB). V případě měření cr6 (po 408 h) je hodnota amplitudy $\Delta f = 5$ kHz výraznější (převýšení ~ 18 dB) a zvýrazněna je také amplituda na frekvenci 10 kHz – její druhé harmonické (převýšení ~ 10 dB). Ještě výrazněji se amplitudy rozdílových složek uplatňují ve frekvenčním spektru odpovídajícím měření cr10 (po 593 h působení koroze). Amplituda rozdílové složky 5 kHz se nachází ~ 25 dB nad šumovým pozadím a převýšení její druhé harmonické činí ~ 18 dB. Ve spektru jsou také zvýrazněny amplitudy neharmonických frekvenčních složek na hodnotách 12 kHz a 17 kHz. Z grafu je rovněž patrný útlum signálu a rostoucím poškozením lana.

Snímek na obr. 5.83. dokumentuje stav nakorodování části lana po desátém cr10 měření. Po pěti stech devadesáti třech hodinách působení korozního procesu došlo k přetržení tří vnějších prutů lana v nechráněné, korozi podrobené části.



Obr. 5.83. Stav předpjatého lana po pěti stech devadesáti třech hodinách působení korozního procesu.

5.8.2.2 Diskuze výsledků

Použité metody poskytly informaci o změnách v přenosových charakteristikách signálu vyvolaných důsledky působení korozního procesu. Všechny vyhodnocované parametry při buzení s jedním ultrazvukovým signálem, posun dominantní frekvence v závislosti na intenzitě budícího signálu při pulsním buzení, hodnota parametru SHR a hodnota korelačního koeficientu r^2 charakterizující linearitu poklesu vyšších harmonických při kontinuálním budícím signálu, vykazovaly nárůst nelineárních efektů s rostoucím poškozením struktury v důsledku postupující koroze. Při buzení dvěma signály blízkých frekvencí se nárůst nelinearity projevoval ve velikosti amplitud detekovaných rozdílových složek kmitočtů.

Bylo ověřeno, že při použití navržených vlnodů nedochází ke zkreslení přenosové charakteristiky signálu.

6 ZÁVĚR

Habilitační práce přináší poznatky ze studia nelineárních ultrazvukových metod z hlediska možnosti jejich využití k detekci trhlin – defektů ve stavebních konstrukcích. Testovány byly stavební vzorky/prvky z různých stavebních materiálů, intaktní a různě poškozené. Nelineární dynamická odezva související s porušenou strukturou vzorků se projevovала různými způsoby. Analýza výsledků měření poškozených vzorků potvrdila korelaci výskytu nelineárních efektů v přenosových charakteristikách degradovaných vzorků s defekty ve struktuře materiálu. Tyto nelineární efekty byly kvantifikovány různými parametry nelinearity, které charakterizují přítomnost defektů.

Obkladové prvky z druhotných surovin: Testovány byly intaktní vzorky a vzorek s viditelnou trhlinou. Aplikováno bylo buzení jedním harmonickým ultrazvukovým signálem. V přenosových charakteristikách vzorku s viditelnou trhlinou se vyskytovaly nelineární efekty. Poškozená struktura vzorku se projevovала výrazným nárůstem lichých harmonických frekvencí při obou konfiguracích budiče a snímače. 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 popílkovílového střepu minimální – jeho nelineární projev byl podstatně nižší než u běžných defektů.

Keramické dlaždice: Proměřovány byly dlaždice nepoškozené a dlaždice teplotně namáhané. Vznik strukturních defektů v důsledku teplotního zatěžování dlaždic se projevil nelineárním nárůstem amplitud lichých harmonických frekvencí, a to jak třetí, tak páté harmonické, přičemž výraznější byl nárůst amplitudy třetí harmonické frekvence. Výsledky měření potvrdily, že nelineární techniky jsou vysoce citlivé metody pro detekci ranných stádií poškození struktury keramických dlaždic.

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 třetí harmonická 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.

Při aplikaci obou metod byla prokázána korelace nelineárních efektů v přenosových charakteristikách se strukturními defekty v testovaných stropních deskách. Provedená měření ověřila vhodnost použití metody nelineární ultrazvukové spektroskopie pro diagnostiku strukturní celistvosti stropních desek Hurdis.

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 s 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 problematiku 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 impact-echo. Při měření byl respektován požadavek na umístění budiče a snímače na lícní stěně bloků dostupné na reálné mostní konstrukci. Opakovaným monitorováním v časových intervalech s následným vyhodnocováním změn vybraných parametrů lze sledovat aktuální stav konstrukce 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 (nedostatku 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. Verifikační měření realizovaná impact-echo metodou prokázala u těchto vzorků posun dominantních

frekvencí k nižším hodnotám. Dalším ověřovacím parametrem byla rychlost šíření ultrazvukových vln ve vzorcích s následným výpočtem frekvence podélných vln. Rovněž klesající trend hodnot obou veličin s rostoucím stupněm poškození integrity vzorků potvrdil 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 po dobu zrání betonu uložených ve vodě, nebyly po teplotním namáhání pozorovány žádné změny hodnotících parametrů. Přenosové charakteristiky před teplotní degradací i po degradaci vykazovaly lineární pokles bez výskytu nelineárních efektů. Hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 , vypočtená pro posouzení linearitu přenosových charakteristik, vykazovala v obou případech srovnatelné hodnoty. Rovněž výsledky měření impact-echo metodou 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).

Železobetonové vzorky: Měření bylo zaměřeno na detekci důsledků postupné koroze zabudované ocelové výztuže, realizované aplikací osmdesáti dvou a sto dvaceti sedmi korozních cyklů. Ve frekvenčních spektrech přenosových charakteristik vzorků po aplikaci osmdesáti dvou korozních cyklů se již vyskytovaly nelineární efekty korelující s defekty v důsledku počínající koroze ocelové výztuže. Při příčném i podélném buzení byly nelineární efekty patrné ve frekvenčních spektrech relativních hodnot amplitud vyšších harmonických, které nevykazovaly postupný pokles s rostoucím pořadím jako v případě referenčních vzorků. Při příčném buzení porušená struktura navíc produkovala neharmonické frekvenční složky při přenosu budícího signálu. Přenosové charakteristiky vzorků měřených po sto dvaceti sedmi korozních cyklech vykazovaly masivnější projev nelinearity korelující s důsledky pokročilejšího stupně koroze výztuže. Po následné destrukci vzorků byl stanoven hmotnostní úbytek oceli, který činil 12,58 % (průměrná hodnota ze šesti vzorků) [52]. Při aplikaci metody se dvěma budícími harmonickými signály se projevíly důsledky koroze ocelové výztuže výraznou amplitudou na rozdílové složce dvou budících kmitočtů.

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, snímána byla odezva při dynamickém zatěžování a následně bylo opakovaně realizováno měření po 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. Dynamické zatěžování nosníku bylo realizováno pádem ocelových desek. Odezva nosníku byla snímána současně na obou pozicích měření. Frekvenční analýza odezvy zaznamenané při dvou různých intenzitách budícího impulsu prokázala frekvenční změny na obou pozicích odpovídající lokálnímu poškození struktury v důsledku dynamického zatěžování nosníku.

Předpínací ocelová lana: Koroze předpínací výztuže zásadním způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti výztuže. Pro posouzení stavu výztuže je tedy nezbytné zjistit kdy je stav koroze, a tedy snížení mechanických parametrů výrazné a kritické. Korozní proces byl v laboratorních podmínkách simulován zrychlenou elektrochemickou korozí, lana byla proměřována v několika fázích korozního procesu. První experimenty byly realizovány na nepředpjatém ocelovém laně. Aplikovány byly lineární a nelineární ultrazvukové metody. Výsledkem lineárních měření byl pokles hodnot podélných frekvencí korelujících s postupující korozí. V případě nelineárních měření jsme zkoumali posun rezonanční frekvence jako funkci hodnoty 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). Vizuální kontrola ukázala úplné zkorodování všech šesti vnějších prutů, oslabení a přetržení centrálního prutu. Aplikace nelineární ultrazvukové metody prokázala, že nárůst nelinearity je citlivějším indikátorem kumulativního mikropoškození 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 vlnodů pro přenos budícího signálu do testovaného objektu a záznam signálu jeho odezvy. Měření byla realizována v deseti fázích korozního procesu. Vyhodnocovány byly následující parametry: posun dominantní frekvence v závislosti na intenzitě budícího signálu při pulsním buzení, parametr SHR a korelační koeficient r^2 charakterizující pokles vyšších harmonických při kontinuálním budícím signálu a rozdílové složky kmitočtů při buzení dvěma signály blízkých frekvencí. Hodnoty všech parametrů vykazovaly nárůst nelineárních efektů s rostoucím poškozením struktury v důsledku postupující koroze. Použití vlnodů potvrdilo, že nedochází ke zkreslení signálu, pouze dochází k většímu útlumu signálu.

Realizované experimenty, analýza jejich výsledků a nalezené korelace hodnotících parametrů se strukturními defekty ukazují, že nasazení metod nelineární ultrazvukové spektroskopie může významnou měrou přispět k detailnějšímu poznání struktury stavebních dílců a konstrukcí. Experimentálně bylo ověřeno, že nelineární parametry, jako jsou poměry harmonických spektrálních složek, resp. výskyt subharmonických složek při monofrekvenčním či pulsním buzení nebo výskyt a nárůst postranních pásem při vícefrekvenčním buzení, umožňují posoudit míru poškození zkoušených objektů a lokalizovat defekty v materiálu mnohem citlivěji než dosud používané standardní metody nedestruktivního zkoušení. Kontinuální či v určitých časových periodách opakované sledování změn nelineárních parametrů poskytuje důležité informace o strukturních změnách sledovaného stavebního objektu v průběhu jeho životnosti. Provedená měření rovněž ověřila vhodnost kombinace použití vícero nedestruktivních metod pro hodnocení aktuálního stavu zabudované výztuže.

Získané poznatky jsou aktuálně využívány při řešení projektu Technologické agentury ČR „Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků“. Ukazují možný směr experimentálního studia potenciálu kombinace nelineární ultrazvukové spektroskopie a magnetické paměti kovových materiálů z hlediska možnosti vyhodnocení stavu zabudované výztuže po celé její délce.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [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] ANTONACI, P.; BRUNO, C. L. E.; SCALERANDI, M.; TONDOLO, F. Effects of corrosion on linear and nonlinear elastic properties of reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 2013, 51, p. 96–103.
- [3] BARBIERI, E.; MEO, M.; POLIMENO, U. Nonlinear wave propagation in damaged hysteretic materials using a frequency domain-based PM space formulation. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 41, p. 165–180.
- [4] CANTRELL, J. H.; YOST, W. T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23, p. S487–S490.
- [5] CATHELIN, S.; GENNISSON, J. L.; FINK, M. Measurement of elastic nonlinearity of soft solid with transient elastography. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114, p. 3087–3091.
- [6] CHEN, J.; ZHANG, D.; MAO, Y.; CHEN, Q. Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface. *Ultrasonics*, 2006, 44, p. e1355–e1358.
- [7] COOK, N. G. W.; HODGSON, K. Some Detailed Stress-Strain Curves for Rock. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70, p. 2883–2888.
- [8] ČSN 73 1371, 2011, Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.
- [9] DAVIDENKOV, V. V. Energy dissipation in vibration. *Journal of Technical Physics*, 1938, 8, p. 403–417.
- [10] DE LIMA, W. J. N.; HAMILTON, M. F. Finite-amplitude waves in isotropic elastic plates. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 265, p. 819–839.
- [11] DELSANTO, P. P.; GLIOZZI, A. S.; HIRSEKORN, M. et al. A 2D spring model for the simulation of ultrasonic wave propagation in nonlinear hysteretic media. *Ultrasonics*, 2006, 44, p. 279–280.

- [12] DELSANTO, P. P. Universality of Nonclassical Nonlinearity: Applications to Non-Destructive Evaluations and Ultrasonics. *Springer Science+Business Media*, New York, 2007, 568 p.
- [13] DE PASCALIS, R. The Semi-Inverse Method in Solid Mechanics: Theoretical underpinnings and novel applications. *Ph.D. Thesis*, Sorbonne Universités, 2010, 156 p.
- [14] GUYER, R. A.; JOHNSON, P. A. Nonlinear Mesoscopic Elasticity: The Complex Behaviour of Rocks, Soil, Concrete. *Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA*, Weinheim, Germany, 2009, 410 p.
- [15] 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.
- [16] HAMIEL, Y.; LYAKHOVSKY, V.; BEN-ZION, Y. The elastic strain energy of damaged solids with applications to nonlinear deformation of crystalline rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, 168, p. 2199–2210.
- [17] HAUPERT, S.; JOHNSON, P. A.; LAUGIER, P. High-accuracy acoustic detection of nonclassical component of material nonlinearity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 130, p. 2654–2661.
- [18] HEARMON, R. F. S. “Third-order” elastic coefficients. *Acta Crystallography*, 1953, 6, p. 331–340.
- [19] HEDBERG, C. M. Nonlinear Acoustic Methods of Non-Destructive Testing. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Section 3 – Nonlinearity of Media and Structures, Nonlinear Testing*, Moscow, 19–23 August 2002.
- [20] HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. Second-Order Elastic Deformation of Solids. *Physical Review*, 1953, 92, p. 1145–1149.
- [21] JOHNSON, P. A.; SHANKLAND, T. J.; O’CONNELL, R. J.; ALBRICHT, J. N. Nonlinear generation of elastic waves in crystalline rock. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92, p. 3597–3602.
- [22] JOHNSON, P. A.; SHANKLAND, T. J. Nonlinear generation of elastic waves in granite and sandstone: Continuous wave and travel time observations. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94, p. 17729–17733.

- [23] JOHNSON, P. A.; MIGLIORI, A.; SHANKLAND, T. J. Continuous wave phase detection for probing nonlinear elastic wave interaction in rocks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 89, p. 598–603.
- [24] JOHNSON, P. A.; RASOLOFOSAON, P. N. Manifestation of nonlinear elasticity in rock: convincing evidence over large frequency and strain intervals from laboratory studies. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1996, 3, p. 77–88.
- [25] JOHNSON, P. A.; OSTROVSKY, L. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *Rivista del Nuovo Cimento*, 2001, 24, p. 1–46.
- [26] JOHNSON, P. A.; ZINSZNER, B.; RASOLOFOSAON, P. N. Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 101, p. 11553–11564.
- [27] 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 6th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials*, Leuven (B), 2001, p. 18–22.
- [28] KAZAKOV, V.; JOHNSON P. A. Modulation Acoustic Method of Crack Location. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Nonlinear Acoustic, Section 3 – Nonlinearity of Media and Structures, Nonlinear Testing*, Moscow, 19–23 August 2002.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] KOBER, J.; PREVOROVSKY, Z. Theoretical investigation of nonlinear ultrasonic wave modulation spectroscopy at crack interface. *NDT&E International*, 2014, 61, p. 10–15.

- [33] 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.
- [34] KOŘENSKÁ, M.; MATYSÍK, M.; MANYCHOVÁ, M. Nelineární ultrazvuková spektroskopie stavebních prvků a konstrukcí. In: *Proceedings of International Workshop Research Activities of Physics Departments of Civil Engineering Faculties in the Czech and Slovak Republics*, Brno, 2004, p. 69–72.
- [35] 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.
- [36] KORENSKA, M.; MANYCHOVA, M. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Used to Detection of Ceramic Structure Damage. In: *Proceedings of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Nonlinear Acoustics-Fundamentals and Application*, 1. USA, American Institute of Physics, 2008, p. 541–544.
- [37] KORENSKA, M.; MATYSIK, M.; PLSKOVA, I.; MANYCHOVA, M. Monitoring of Concrete Components Structure Condition Using a Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. *Proceedings of the 17th World Conference on NDT*, Shanghai, 2008, CD, p. 1–6. *NDT.net*, 2008, 13/11.
- [38] KORENSKA, M.; MATYSIK, M.; PLSKOVA, I.; PAZDERA, L.; MANYCHOVA, M. Application of non-linear ultrasonic spectroscopy to non-destructive testing in civil engineering. In: *Proceedings of the 18th Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*, Slovenia, 2009, p. 135–141. *NDT.net*, 2009, 14/10.
- [39] KORENSKA, M.; MATYSIK, M.; MANYCHOVA, M. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy as a Tool to Evaluate Concrete Structure Integrity. In: *Book of abstracts of the 15th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials, Session NDT I: Concrete*, 2010, Otranto, Italy.
- [40] KORENSKA, M.; MATYSIK, M.; MANYCHOVA, M. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy as a Tool to Evaluate Building Material Structure Damage. In: *Proceedings of the 10th European Conference on NDT*, Moscow, June 7–11 2010, CD, p. 1–7. *NDT.net*, 2010, 15/8.

- [41] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M. New Possibilities of Non-destructive Testing of Ceramic Specimen Integrity. *Ceramics-Silikáty*, 2010, 54, p. 72–77.
- [42] KOŘENSKÁ, M.; MATYSÍK, M.; MANYCHOVÁ, M. New Approach to Evaluate Building Material Structure Damage via Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. In: *Proceedings of the 6th Workshop "NDT in Progress", International Meeting of NDT Experts*, Praha, 2011, p. 149–156. *NDT.net*, 2011, 16/10.
- [43] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Applied to Integrity Damage Evaluation in a Ceramic Structures. In: *Proceedings of the 10th International Conference 2012, Non-Destructive Testing in Engineering Practice*, Brno, 2012, p. 51–56.
- [44] KOŘENSKÁ, M.; MANYCHOVÁ, M.; MATYSÍK, M. Evaluation of the Concrete Structure Integrity after Temperature Degradation via Nonlinear Ultrasonic Measurements. In: *Proceedings of the 42nd International Conference Defektoskopie 2012/NDE for Safety*, Seč, 2012, p. 139–142. *NDT.net*, 2013, 18/6.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Theory of elasticity. *The 2nd edition*, Pergamon Press, New York, 1970, 165 p.

- [51] MACECEK, M. Ultrasonic Concrete Testing. In: *Proceedings of the 33rd International Conference Defektoskopie 2003*, Ostrava, 2003, p. 117–132.
- [52] MANYCHOVA, M. Aplikace akustické emise ve stavebnictví. *Disertační práce*, Brno: FAST VUT, 2004, 102 s.
- [53] 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.
- [54] MANYCHOVÁ, M. Využití rezonanční inspekce ve stavebnictví. In: *Sborník z konference Podlahy, stropy a podhledy 2006*, VUT v Brně, 2006, p. 59–63.
- [55] 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.
- [56] MANYCHOVÁ, M.: Hodnocení struktury stavebních prvků pomocí rezonanční inspekce. In: *Sborník z konference Konstrukce a progresivní materiály s využitím druhotných surovin 2007*, VUT v Brně, 2007, p. 90-95.
- [57] MANYCHOVÁ, M. Measuring Setup for the Non-linear Ultrasonic Spectroscopy Method. In: *Proceedings of the 37th International Conference Defektoskopie 2007*, Praha, 2007, p. 147–152. *NDT.net*, 2008, 13/3.
- [58] MANYCHOVÁ, M. Test of Cladding Elements Using a Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Metod. In: *Proceedings of the 5th Workshop NDT 2007, Non-destructive Testing in Engineering Practice*, Brno, 2007, p. 76–81.
- [59] 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.
- [60] MANYCHOVA, M. On the diagnosis of Hurdis ceiling slabs using non-linear ultrasonic spectroscopy methods. In: *Proceedings of the 38th International Conference Defektoskopie 2008*, Brno, 2008, p. 131–136. *NDT.net*, 2009, 14/3.

- [61] MANYCHOVA, M. Application of NDT Methods on Ceiling Slabs - Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. In: *Proceedings of the 12th International Scientific Conference, Brno, Building Structures and Architecture*, Brno, 2009, p. 95–98.
- [62] MANYCHOVÁ, M. Nondestructive integrity testing of sandwiches made of Hurdis ceiling slabs. In: *Proceedings of the 40th International Conference Defektoskopie 2010 and NDE for Safety*, Plzeň, 2010, p. 167–174. *NDT.net*, 2011, 16/5.
- [63] MANYCHOVÁ, M. Evaluation of the Concrete Structure Integrity by Frequency Inspection. In: *Proceedings of the 41st International Conference Defektoskopie 2011 and NDE for Safety*, Ostrava, 2011, p. 87–91. *NDT.net*, 2012, 17/3.
- [64] MATYSIK, M.; KORENSKA, M.; MANYCHOVA, M.; PAZDERA, L. Acoustic method based diagnostics of ceramic tiles structure integrity. In: *Proceeding of Workshop NDT 2005, Non-Destructive Testing at Engineering*, Brno, 2005, p. 100–105.
- [65] MCCALL, K. R. Theoretical study of nonlinear acoustic wave propagation. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 1994, 99, p. 2591–2600.
- [66] MEURER, T.; QU, J.; JACOBS, L. J. Wave propagation in nonlinear and hysteretic media – a numerical study. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39, p. 5585–5614.
- [67] MURNAGHAN, F. D. Finite deformation of an elastic solid. *Dover Publications*, New York, 1967, 140 p.
- [68] NAUGOLNYKH, K.; OSTROVSKY, L. A. Nonlinear Wave Processes in Acoustics. *Cambridge Texts in Applied Mathematics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, 312 p.
- [69] 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.
- [70] NAZAROV, V. E.; KOLPAKOV, A. B.; RADOSTIN, A. V. Experimental Study of Nonlinear Acoustical Effects in Limestone. *Acoustical Physics*, 2007, 53, p. 217–225.
- [71] OBRAZ, J. Zkoušení materiálu ultrazvukem. SNTL Praha, 1989.

- [72] 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.
- [73] POLIMENO, U.; MEO, M. Understanding the effect of boundary conditions on damage identification process when using non-linear elastic wave spectroscopy methods. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2008, 43, p. 187–193.
- [74] POSPISIL, K.; MANYCHOVÁ, M.; STRYK, J., et al.: Diagnostics of reinforcement condition in concrete structures by GPR, metal magnetic memory method and impact-echo method. *Remote Sensing*, 2021, 13, 952. p. 1-15.
<http://doi.org/10.3390/rs1305095>.
- [75] PŘEVOROVSKÝ, Z. Non-linear Acoustic Spectroscopy and New Methods of Flaw Detection. In: *Proceedings of the 31st International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2001*, Praha, 2001, p. 11–16.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] SOLODOV, I. Y. Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications. *Ultrasonics*, 1998, 36, p. 383–390.
- [79] SOLODOV, I. Y.; KROHN, N.; BUSSE, G. CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*, 2002, 40, p. 621–625.
- [80] SOLODOV, I. Y.; PFLEIDERER, K.; GERHARD, H.; BUSSE, G. Nonlinear acoustic approach to material characterization of polymers and composites in tensile tests. *Ultrasonics*, 2004, 42, p. 1011–1015.
- [81] 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.

- [82] 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 Xth Workshop “NDT in Progress” International Meeting of NDT Experts*, Prague, 2019, p. 75-84.
- [83] STRYK, J.: Nové přístupy při diagnostice stavu výztuže předpjatých mostních nosníků. Nepublikovaná průběžná zpráva za rok 2020. Brno: CDV, 2021, 45 s.
- [84] STULIROVA, J.; POSPISILOVA, D.; MANYCHOVA, M.: Urban Concrete Bridge Structures in the Czech Republic and their Monitoring by Acoustic Emission and Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy. *SGEM2018*, Vol. 5, Issue 5.3, 2018, p. 733-740.
<https://sgemworld.at/ssgemlib/spip.php?article6983>.
- [85] TEN CATE, J. A.; VAN DEN ABEELE, A.; SHANKLAND, T. J.; JOHNSON, P. A. Laboratory study of linear and nonlinear elastic pulse propagation in sandstone. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 100, p. 1383–1391.
- [86] VAN DAMME, B. Optimization of nonlinear elastic wave spectroscopy for diagnostic nondestructive testing and imaging. *Ph.D. Thesis*, KU Leuven, 2011, 168 p.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.

- [91] VAN DEN ABEELE, K.; SUTIN, A.; CARMELIET, J.; JOHNSON, P. A. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS), *NDT&E International*, 2001, 34, p. 239–248.
- [92] VAN DEN ABEELE, K. Multi-mode nonlinear resonance ultrasound spectroscopy for defect imaging: An analytical approach for the one-dimensional case. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 122, p. 73–90.
- [93] 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.
- [94] 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.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1.** Závislost napětí σ na deformaci ε pro lineární a dva typy slabě nelineárního chování.
- Obr. 2.2.** Schematické znázornění dvou typů nelinearity a jejich vlivu na modul pružnosti, změnu tvaru sinusové vlny a frekvenční odezvu na monofrekvenční buzení [89].
- Obr. 2.3.** Závislost napětí σ na deformaci ε pro bimodulární model. Varianta pro $\varepsilon_c = 0$.
- Obr. 2.4.** Schematické zobrazení bimodulárního modelu pro $\varepsilon_c = 0$.
- Obr. 2.5.** Deformace signálu vlivem doteku stěn trhliny.
- Obr. 2.6.** Pulsní modulace a ΔE jako funkce času [14].
- Obr. 2.7.** Změna tvaru signálu a spektrum signálu – bimodulární model, $f = 5$ Hz.
- Obr. 2.8.** Numericky vypočtené závislosti normalizované amplitudy harmonických složek na normalizované amplitudě deformace. $\Delta E/E = 0,6$; $\varepsilon_c = 0,1$.
- Obr. 2.9.** Porovnání dvou základních modelů hystereze – *inelastické a elastické*.
- Obr. 2.10.** Numerická simulace nelineárního hysterezního chování podle rovnice (2.23).
- Obr. 3.1.** Příklad posunu rezonančního kmitočtu tělesa na intenzitě vybuzení [87].
- Obr. 3.2.** Frekvenční spektrum odezvy nelineárního prostředí.
- Obr. 3.3.** Kmitočtové spektrum při průchodu dvou signálů nelineárním prostředím.
- Obr. 3.4.** Fyzikální princip nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS).
- Obr. 4.1.** Blokové schéma měřicího zařízení s jedním budícím signálem.
- Obr. 4.2.** Generátor harmonického signálu Agilent 33220A.
- Obr. 4.3.** Řízený výkonový zesilovač pro buzení ultrazvukových vysílačů.
- Obr. 4.4.** Výstupní filtr typu dolní propust.
- Obr. 4.5.** Výkonové piezokeramické vysílače: A – s koncentrátorem mechanického vlnění; B – pro buzení ultrazvuku na deskách; C – pro buzení na vyšších kmitočtech.
- Obr. 4.6.** Frekvenční spektra přenosových charakteristik testovaných snímačů: A – vyhovující snímač S4; B – nevhovující snímač SN1.
- Obr. 4.7.** Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí: A – snímače vyhovující; B – snímače nevhovující.
- Obr. 4.8.** Blokové schéma měřicího zařízení se dvěma budícími signály.

Obr. 5.1. Uspořádání experimentu: vlevo – měřicí zařízení s testovaným vzorkem; vpravo – schéma vzájemných konfigurací budiče B a snímače S na vzorku s trhlinou.

Obr. 5.2. Frekvenční spektra přenosových charakteristik intaktních vzorků v závislosti na hodnotě napětí budícího signálu: vlevo – vzorek A; vpravo – vzorek C1.

Obr. 5.3. Frekvenční spektra přenosových charakteristik poškozeného vzorku C2 v závislosti na hodnotě napětí budícího signálu: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Obr. 5.4. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí intaktního vzorku A: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Obr. 5.5. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí intaktního vzorku C1: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Obr. 5.6. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí poškozeného vzorku C2: vlevo – první konfigurace; vpravo – druhá konfigurace.

Obr. 5.7. Keramická dlaždice s vyznačenou polohou budiče B a čtyř pozic snímače (S1–S4) na glazovaném povrchu.

Obr. 5.8. Frekvenční spektra přenosových charakteristik z měření na glazovaném povrchu. A – intaktní vzorek; B – vzorek po teplotním namáhání; C – po aplikaci degračních cyklů.

Obr. 5.9. Frekvenční spektra přenosových charakteristik z měření na neglazovaném povrchu. Křivka A – intaktní vzorek; B – vzorek po teplotním namáhání; C – po aplikaci degračních cyklů.

Obr. 5.10. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí jednotlivých skupin vzorků: vlevo – měření na glazovaném povrchu; vpravo – měření na neglazovaném povrchu.

Obr. 5.11. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí jednotlivých skupin vzorků při snímání odezvy na hraně vzorku: vlevo – buzení na glazovaném povrchu; vpravo – buzení na neglazovaném povrchu.

Obr. 5.12. Závislost přenosových charakteristik na hodnotě napětí budícího signálu – nepoškozená stropní deska N1.

Obr. 5.13. Ukázka stropní desky s vyznačenou polohou budiče B a pozicemi snímače (S1, S2) při aplikaci metody s jedním budícím signálem.

Obr. 5.14. Frekvenční spektra přenosových charakteristik stropních desek: vlevo – nepoškozená deska N1; vpravo – deska s trhlinou T1. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

Obr. 5.15. Konfigurace budičů (B1, B2) a snímače S při buzení stropní desky dvěma harmonickými ultrazvukovými signály ($f_1 = 19$ kHz, $f_2 = 23$ kHz).

Obr. 5.16. Frekvenční spektra přenosových charakteristik stropních desek při buzení dvěma harmonickými signály blízkých kmitočtů: vlevo – intaktní deska N1; vpravo – deska s trhlinou T1.

Obr. 5.17. Ukázka testovaných sendvičů. Vpravo – konfigurace budičů a snímače při metodě se dvěma budícími ultrazvukovými signály.

Obr. 5.18. Frekvenční spektra přenosových charakteristik intaktní desky N3: vlevo – buzení jedním signálem; vpravo – buzení dvěma signály ($f_1 = 19$ kHz; $f_2 = 23$ kHz).

Obr. 5.19. Frekvenční spektra přenosových charakteristik sendviče SN3: vlevo – buzení jedním signálem; vpravo – buzení dvěma signály ($f_1 = 19$ kHz; $f_2 = 23$ kHz).

Obr. 5.20. Pohled na Karlův most.

Obr. 5.21. Vzorek č. 1 se schematickým znázorněním konfigurací budiče B a snímače S na horní ploše vzorku: a) pro jeden budící signál; b) pro dva budící signály.

Obr. 5.22. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 1: vlevo – pozice snímače S1; vpravo – pozice snímače S2.

Obr. 5.23. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku č.1. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

Obr. 5.24. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku č. 1 – buzení dvěma signály ($f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 27$ kHz).

Obr. 5.25. Mikroskopická charakteristika struktury dvou pískovcových hranolů: vlevo – vzorek č. 1; vpravo – vzorek č. 2.

Obr. 5.26. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 2: vlevo – pozice snímače S1; vpravo – pozice snímače S2.

Obr. 5.27. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku č. 2. S1 – první pozice snímače; S2 – druhá pozice snímače.

Obr. 5.28. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku č. 2 – buzení dvěma signály o kmitočtech $f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 27$ kHz).

Obr. 5.29. Vzorek č. 3 s vyznačenými pozicemi budičů B1, B2 a snímače S.

Obr. 5.30. Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku č. 3: vlevo – buzení jedním signálem B1; vpravo – buzení dvěma signály ($f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 27$ kHz).

Obr. 5.31. Vzorky z jemné betonové směsi – schéma přípravy experimentu.

Obr. 5.32. Vzorky z jemné betonové směsi – uspořádání experimentu.

Obr. 5.33. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku V12 – zrání betonu pod vodou.

- Obr. 5.34.** Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku L3 – zrání betonu v laboratorním prostředí.
- Obr. 5.35.** Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky vzorku S1 – v procesu zrání uloženého po dobu dvanácti dnů v sušičce.
- Obr. 5.36.** Princip metody impact-echo.
- Obr. 5.37.** Frekvenční spektrum odezvy V12 – zrání betonu pod vodou.
- Obr. 5.38.** Frekvenční spektrum odezvy vzorku L3 – zrání betonu v laboratorním prostředí.
- Obr. 5.39.** Frekvenční spektrum odezvy vzorku S1 – v procesu zrání uloženého po dobu 12 dnů v sušičce.
- Obr. 5.40.** Závislost dominantní frekvence na intenzitě budícího impulsu – vzorek S1.
- Obr. 5.41.** Časová závislost zmrazovacích cyklů.
- Obr. 5.42.** Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí nepoškozeného vzorku V12: A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.43.** Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku L3 (porušená integrita struktury): A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.44.** Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí vzorku S1 (masivnější porušení struktury): A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.45.** Frekvenční spektra odezvy vzorku V12 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.46.** Frekvenční spektra odezvy vzorku L3 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.47.** Frekvenční spektra odezvy vzorku S1 na mechanický impuls: A – před degradací; B – po degradaci.
- Obr. 5.48.** Dvě konfigurace budiče B a snímače S na testovaném železobetonovém trámci: B1, S1 – příčná; B2, S2 – podélná.
- Obr. 5.49.** Frekvenční spektra přenosových charakteristik referenčního vzorku V5 pro dvě konfigurace budiče a snímače: vlevo – příčná; vpravo – podélná.
- Obr. 5.50.** Frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku V16 po aplikaci 127 korozních cyklů pro dvě konfigurace budiče a snímače: vlevo – příčná; vpravo – podélná.
- Obr. 5.51.** Grafické zobrazení průměrných normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí odpovídající příčné konfiguraci budiče a snímače. Vlevo – normalizované hodnoty

amplitud: A – referenční vzorky; B – po aplikaci 82 korozních cyklů; C – po aplikaci 127 korozních cyklů. Vpravo – druhá mocnina korelačního koeficientu r^2 .

Obr. 5.52. Grafické zobrazení průměrných normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí odpovídající podélné konfiguraci budiče a snímače. Vlevo – normalizované hodnoty amplitud: A – referenční vzorky; B – po aplikaci 82 korozních cyklů; C – po aplikaci 127 korozních cyklů. Vpravo – druhá mocnina korelačního koeficientu r^2 .

Obr. 5.53. Metoda se dvěma budícími signály blízkých kmitočtů – frekvenční spektra přenosových charakteristik vzorku V10 po aplikaci 82 degradačních cyklů: vlevo – budící kmitočty ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 31$ kHz); vpravo – budící kmitočty ($f_1 = 29$ kHz, $f_2 = 32$ kHz).

Obr. 5.54. Železobetonový nosník s osazeným zatěžovacím rámem.

Obr. 5.55 Schéma konfigurací budičů B a snímače S na pravé části nosníku: vlevo – metoda s jedním budícím signálem (B); vpravo – metoda se dvěma budícími signály (B1, B2).

Obr. 5.56. Frekvenční spektra přenosových charakteristik: vlevo – měření na druhé pozici (2); vpravo – grafické porovnání normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí na obou pozicích měření.

Obr. 5.57. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na druhé pozici (2). Dva budící harmonické ultrazvukové signály ($f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 25$ kHz).

Obr. 5.58. Ukázka dynamického zatěžování nosníku.

Obr. 5.59. Frekvenční spektra odezvy nosníku zaznamenané snímačem na pozici (1): vlevo – odezva na dopad dvou desek; vpravo – odezva na dopad tří desek.

Obr. 5.60. Frekvenční spektra odezvy nosníku zaznamenané snímačem na pozici (2): vlevo – odezva nosníku na dopad dvou desek; vpravo – odezva nosníku na dopad tří desek.

Obr. 5.61. Grafické vyjádření normalizovaných hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí před zatěžováním a po zatěžování nosníku: vlevo – první pozice měření (1); vpravo – druhá pozice měření (2).

Obr. 5.62. Grafické vyjádření hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu (r^2) před zatěžováním a po zatěžování nosníku: vlevo – měření na první pozici (1); vpravo – měření na druhé pozici (2).

Obr. 5.63. Frekvenční spektrum přenosové charakteristiky z měření na pozici (2) – po zatěžování nosníku. Dva budící harmonické ultrazvukové kmitočty ($f_1 = 29$ kHz; $f_2 = 25$ kHz).

Obr. 5.64. Ukázka sedmiprutového ocelového lana.

Obr. 5.65. Ocelové lano s osazeným korozním článkem.

- Obr. 5.66.** Vlevo – frekvenční spektra odezvy lana s korozním článkem: a – před zahájením korozního procesu (nepoškozené lano), b – 14. den působení korozního procesu, c – 28. den, d – 42. den; vpravo – frekvenční závislost na době působení korozního procesu.
- Obr. 5.67.** Ukázka experimentálního uspořádání s vyznačením konfigurace budiče B a snímače S.
- Obr. 5.68.** Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření před zahájením korozního procesu – celý frekvenční rozsah.
- Obr. 5.69.** Detail frekvenčních rozsahů s výskytem dominantních frekvencí pro čtyři hodnoty budícího napětí.
- Obr. 5.70.** Frekvenční spektrum odezvy lana po čtrnácti dnech působení zrychlené koroze: A – celý frekvenční rozsah, B – detail vrcholů frekvenčních maxim.
- Obr. 5.71.** Frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po dvaceti osmi dnech působení zrychlené koroze: A – celý frekvenční rozsah, B – detail vrcholů frekvenčních maxim.
- Obr. 5.72.** Vlevo – frekvenční spektrum odezvy odpovídající měření po čtyřiceti dvou dnech působení zrychlené koroze; vpravo – ukázka lana po vyjmutí z korozního článku.
- Obr. 5.73.** Snímek lana po odstranění vrstvy korozních zplodin.
- Obr. 5.74.** Vlevo – detail korozního boxu s vloženým lanem; vpravo - typy vlnovodů.
- Obr. 5.75.** Pohled na předpínací rám s předpjatým lanem s připojeným korozním boxem a označením pozic měření (1,3).
- Obr. 5.76.** Frekvenční spektra odezvy lana L5 při dvou konfiguracích budiče B a snímače S, druhé měření cr2.
- Obr. 5.77.** Frekvenční spektra odezvy lana L5 na budící signál realizovaný a snímáný bez vlnovodů L5-2B1S3 a za použití vlnovodů L5-2B1S3v, druhé měření cr2.
- Obr. 5.78.** Frekvenční spektra odezvy lana ze tří měření: cr2 - 48 h, cr6 - 408 h, cr10 - 593 h působení koroze.
- Obr. 5.79.** Frekvenční spektra odezvy lana na budící signály realizované budícím napětím o hodnotách 2 V, 3 V a 12 V, desáté měření cr10.
- Obr. 5.80.** Odezva lana L5B1kS3 na kontinuální budící signál: vlevo – frekvenční spektra odezvy z druhého cr2 a desátého cr10 měření; vpravo – normalizované hodnoty amplitud vyšších harmonických z měření cr2, cr6, cr10 .
- Obr. 5.81.** Grafické zobrazení závislosti hodnot parametru SHR a korelačního koeficientu r^2 na postupující korozi.

Obr. 5.82. Frekvenční spektra přenosových charakteristik lana z měření se dvěma budícími kmitočty ($f_1 = 22 \text{ kHz}$, $f_2 = 27 \text{ kHz}$).

Obr. 5.83. Snímek předpjatého lana po pěti stech devadesáti tří hodinách působení korozního procesu.

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1. Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin vzorků reprezentujících skupiny V, L, S.

Tab. 5.2. 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.

Tab. 5.3. Hodnoty verifikačních fyzikálních veličin vzorků po teplotní degradaci.

Tab. 5.4. Průměrné relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 z příčné konfigurace budiče a snímače.

Tab. 5.5. Průměrné relativní hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí vzhledem k první harmonické (budící) frekvenci a hodnoty druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 z podélné konfigurace budiče a snímače.

Tab. 5.6. Hodnoty dominantních frekvencí nepředpjatého ocelového lana v jednotlivých fázích korozního procesu.

Tab. 5.7. Hodnoty amplitud harmonických frekvencí A , jejich relativních hodnot vzhledem k první harmonické, parametru SHR a druhé mocniny korelačního koeficientu r^2 ze tří fází korozního procesu.

10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| | |
|-------------------------------------|---|
| A, B, C | Landauovy moduly [Pa] |
| A | amplituda [V, dB, arb.] |
| C_{ijkl} | tenzory elastických konstant druhého řádu |
| C_{ijklmn} | tenzory elastických konstant třetího řádu |
| c_l | průměrná rychlost UZ vlnění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| E, E^+ | modul pružnosti v tahu [Pa] |
| E_0 | konstantní modul pružnosti v tahu [Pa] |
| E^- | modul pružnosti v tlaku [Pa] |
| f | frekvence, kmitočet [Hz] |
| f_l | frekvence podélných kmitů [Hz] |
| f_v | frekvence harmonických signálů [Hz] |
| f_{ef} | pevnost v tahu ohybem [Pa] |
| $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ | hysterezní člen |
| G | modul pružnosti ve smyku [Pa] |
| $H(\varepsilon)$ | Heavisideova skoková funkce |
| I_1, I_2, I_3 | invarianty tenzoru deformace |
| K | modul pružnosti [Pa] |
| m, n | přirozená čísla |
| r | korelační koeficient |
| $S(f)$ | spektrální složky Fourierovy transformace [$\text{V}^2\cdot\text{s}$] |
| t | čas [s] |
| T | perioda [s] |
| W | hustota elastické deformační energie |
| W_0 | konstantní hustota elastické deformační energie |

| | |
|------------------------------------|--|
| α | hysterezní nelineární konstanta 1.řádu |
| β | konstanta klasické nelinearity 1. řádu |
| β_1 a β_2 | konstanty hysterezního modelu „ <i>slider</i> “ |
| γ_{1-4} | konstanty hysterezního modelu „ <i>ratchet</i> “ |
| ΔE | změna modulu pružnosti způsobená dotykem lící trhliny [Pa] |
| δ | konstanta klasické nelinearity 2. řádu |
| ε | deformace |
| $\dot{\varepsilon}$ | rychlost deformace |
| ε_c | hodnota deformace odpovídající počátečnímu doteku lící (CAN práh) |
| ε_{ij} | tenzor deformace |
| ε_m | lokální amplituda deformace |
| $\varepsilon_m^+, \varepsilon_m^-$ | lokální amplitudy kladné a záporné části zatěžovacího cyklu (vlny) |
| λ | Lamého konstanta [Pa] délka vlny UZ vlnění [m] |
| σ | normálové napětí [Pa] |
| τ | šířka pulsu [s] |
| τ_{ij} | tenzor napětí |

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|----------|--|
| AE | Akustická emise |
| AM | Amplitudová modulace |
| CAN | Kontaktní akustická nelinearita (Contact Acoustic Nonlinearity) |
| CW | Spojité režim (Continuous Wave) |
| DP | Dolní propust |
| EPM | Efekty pomalé dynamiky (End Point Memory) |
| FFT | Fourierova transformace |
| H | Harmonická frekvence |
| NATEMIS | Nonlinear Acoustic Techniques for Microscale Damage Diagnostics |
| NDT | Nedestruktivní testování |
| NEWS | Nelineární spektroskopie elastických vln (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) |
| NRUS | Nelineární rezonanční ultrazvuková spektroskopie (Nonlinear Resonant Ultrasonic Spectroscopy) |
| NUS | Nelineární ultrazvuková spektroskopie (Nonlinear ultrasonic Spectroscopy) |
| NWMS | Nelineární vlnově modulační spektroskopie (Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy) |
| SHR | Druhý harmonický poměr (Second harmonic ratio) |
| SIMONRUS | Single Mode Nonlinear Resonance Ultrasound Spectroscopy |
| SIMONRAS | Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy |
| UZ | Ultrazvuk |