

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 601

ISSN 1213-418X

Jan Martinek

**VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ
A BÍLÉHO ŠUMU
VE STAVEBNÍ AKUSTICKÉ
DEFEKTOSKOPII**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav fyziky

Mgr. Jan Martinek, Ph.D.

**VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ A BÍLÉHO ŠUMU
VE STAVEBNÍ AKUSTICKÉ DEFEKTOSKOPII**

THE USE OF COMPUTER MODELLING
AND WHITE NOISE GENERATORS
IN ACOUSTIC DEFECTOSCOPY OF BUILDING MATERIALS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní testování, akustické kmity, impact-echo, bílý šum, modal analysis

KEYWORDS

Non-destructive testing, acoustic waves, impact-echo, white noise, modal analysis

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Originál habilitační práce je uložen v archivu Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně

Obsah

Představení autora	4
1 Cíle práce	6
2 Úvod	7
3 Numerická simulace elastických vln	9
3.1 Modální analýza kvádrového vzorku	9
3.2 Model na bázi soustavy tlumených oscilátorů	11
4 Vývoj měřicí metody	16
4.1 Generátor na bázi posuvných registrů	16
4.2 Softwarová implementace	17
5 Měření cementových vzorků	20
5.1 Kontinuální měření frekvence kmitů schnoucího maltového vzorku	20
5.1.1 Experiment a výsledky	21
5.2 Teplotně namáhané maltové vzorky 40×40×160 mm	22
5.2.1 Materiál a metody	24
5.2.2 Výsledky a závěr	24
5.3 Měření teplotně namáhaných betonových vzorků	27
5.3.1 Naměřené vlastnosti vzorků	28
5.3.2 Vypočítané vlastnosti materiálu	32
5.3.3 Nelineární odezva	35
5.3.4 Destruktivní testy	35
6 Závěr	37

Představení autora:

Mgr. Jan Martinek, Ph.D.

Narozen: 28.7.1976

Pracoviště: VUT v Brně
Fakulta stavební
Ústav fyziky



Dosažené vzdělání:

- Gymnázium tř. Kpt. Jaroše, Brno (1990-1995)
- Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, obor odborná fyzika, téma práce *Konstrukce synchronního detektoru* (1995-2000)
- Doktorské studium, Ústav fyziky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, téma práce *Numerická simulace akustických kmitů v materiálu* (2000-2005)

Odborné zaměření:

nedestruktivní testování pomocí akustických metod, programování a automatizace měřících aparatur, výroba měřících obvodů a zařízení, numerické modelování a vývoj softwaru, metoda konečných prvků

Přehled zaměstnání:

Od roku 2000 asistent na Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně, od r. 2006 odborný asistent tamtéž

Odborné stáže:

- 2014: Francie: Fréjus, Scientific School, Scientific instrumentation and metrology for micro/nano fundamentals and applications
- 2015: Rakousko: stáž na Linz Institute for Organic Solar cells – Johannes Kepler University Linz

Též roční pobyt v USA, studium na Ralph C. Mahar Regional High School.

Pedagogická činnost:

Od r. 2000 vyučuje na Ústavu fyziky tyto předměty řádného i kombinovaného studia. U laboratorního cvičení vyučuje též anglickou variantu:

- BB01 2006–2018 Fyzika, přednáška
- BB01 2000–2018 Fyzika, laboratorní cvičení

- BB01 v angličtině, Physics, 2000–2018, laboratorní cvičení
- CB01 2010–2012, Aplikovaná fyzika, přednáška
- CB01 2010–2012, Aplikovaná fyzika, laboratorní cvičení
- CB54 2012–2018, Aplikovaná fyzika, přednáška
- CB54 2012–2018, Aplikovaná fyzika, laboratorní cvičení

Kromě výše uvedených předmětů přednáší již třetím rokem předmět fyzika v rámci *Letní technické školy* pořádané Fakultou stavební.

Je autorem řady učebních textů a sbírek příkladů, přičemž oficiálně byl vydán modul *M03 — Mechanika tuhého tělesa*. Je též spoluautorem sbírky matematických příkladů *Chci se dostat na VŠ – matematika*. Také sestavil několik desítek pedagogických pomůcek, např. novou laboratorní úlohu *Frekvenční analýza zvuku* nebo zkoušecí a e-learningový systém.

Vedení obhájené doktorské práce: 2016: Ing. Ladislav Carbol, téma: *Měření akustických vlastností stavebních materiálů pomocí pseudonáhodné sekvence*

Publikační činnost a granty:

Je autorem šesti publikací s impakt faktorem, u pěti z nich je IF vyšší než 1,4.

Mimo své nejvýznamnější publikace je spoluautorem více než sta konferenčních příspěvků a článků v časopisech.

Projekty, řešitel či spoluřešitel: GAČR: *Diagnostika defektů v materiálech za použití nejnovějších defektoskopických metod*, VRVŠ: *Tvorba výukových pomůcek pro demonstraci šíření zvuku*.

Ostatní:

- 2014: Čtvrté místo v soutěži o nejlepšího pedagoga pro magisterské studium z Fakulty stavební
- 2015–2017: První či druhé místo v hodnocení učitelů v rámci Letní technické školy
- 2015: Třetí místo v TOP 10 nejlépe publikujících autorů na Fakultě stavební

Velmi pozitivní recenze jsou též na nezávislém serveru unium.cz.

Kapitola 1

Cíle práce

1. Vypočítat šíření elastických vln pomocí různých metod na modelových případech a vyhodnotit nejvhodnější přístup. Získané výsledky experimentálně ověřit.
2. Naprogramovat software, který by umožňoval simulovat vibrace materiálu s komplikovanou mikrostrukturou
3. Odlišit jevy, které jsou spojené s materiálem od jevů, které souvisejí se samotným tvarem standardních vzorků.
4. Provést teoretickou analýzu měřicí metody založené na deterministickém generátoru bílého šumu, která by umožňovala naměřit rezonanční spektrum zkoumaných vzorků
5. Sestavit prakticky použitelnou měřicí aparaturu a provést měření na vybraných vzorcích
6. Naměřené výsledky porovnat s metodou impact-echo.
7. Provést experimenty, ukazující výhody nové metody: možnost automatizace měření a možnost stanovit nelineární chování vzorků, tj. posuv rezonanční frekvence v závislosti na amplitudě budícího signálu

Kapitola 2

Úvod

V nedestruktivním testování existuje mnoho metod založených na frekvenční analýze vibrací. Získané spektrum obsahuje informace o periodických dějích, které probíhají ve zkoumaném systému.

Naměřené frekvence souvisejí s materiálovými vlastnostmi a mnohokrát bylo ověřeno, že lze odhalit poškození zkoumaného vzorku na základě změny vibračního spektra. Takové vyhodnocení naměřených dat je však velmi obtížný úkol, a to zejména ve stavebnictví, kde se používá široká škála materiálů s komplikovanou mikrostrukturou, a které mohou být vystaveny mnoha vlivům vedoucím k jejich degradaci.

Proto bývá akustická defektoskopie spíše srovnávací metodou, která dokáže postihnout změny zkoumaného vzorku vůči referenčnímu.

Problematika je v celé šíři velmi složitá a tato práce se zaměřuje jen na nepatrnou oblast. Cílem její první části je popis, výpočet a experimentální ověření vlnových jevů, které souvisejí především s tvarem vzorku. Různými výpočetními modely se podařilo předpovědět frekvence několika druhů vlnění, a to jak u vzorku ve tvaru tenké tyče, tak i tvaru kvádrů. Kvádr měl stejný tvar jako standardní betonové vzorky. Modální analýza se ukázala jako nejpřesnější, ale nejvíce komplikovaná metoda. Výsledky každé z výpočetních metod byly současně ověřeny experimentem, a tak první část nelze pokládat jen za teoretickou. V rámci modelování vznikl též program pro numerickou simulaci šíření vln v nehomogenním materiálu s náhodně rozmístěnými defekty.

Druhá část práce se věnuje měřícím metodám, zejména pak metodě impact-echo. Ta je založena na tom, že se vibrace vybudí úderem kladívka do zkoumaného vzorku. Předpokládá se, že počáteční impuls má dostatečně široké spektrum, což je podmínka pro následnou frekvenční analýzu. Metoda impact-echo je v nedestruktivním testování hojně využívána, a je zakotvena i ve standardu ASTM.

Každá metoda má svá omezení a přinejmenším dvě nevýhody by bylo vhodné blíže popsat. Impact-echo je metoda nevhodná pro automatizované měření, protože úder kladívkem provádí obvykle člověk. Z toho také vyplývá nutnost větší opatrnosti v posuzování, zda jsou výsledky dostatečně reprodukovatelné. Byly provedeny pokusy s robotizovaným kladívkem, ale ty lze dosud považovat spíše za ojedinělé a obtížně proveditelné. Automatizovaná měření je možné realizovat tak, že se kmity vyvolají piezoelektrickým budičem, který je v kontaktu se zkoumaným vzorkem. Řada ultrazvukových metod je na tomto principu založena a často jeden a tentýž piezoelektrický člen slouží současně jako budič a současně jako detektor. V každém případě platí, že impuls vyvolaný ultrazvukovým budičem zdaleka nedosahuje takových intenzit jako úder kladívkem.

Druhou nevýhodou je samotný fakt, že impuls má velmi krátké trvání. Má-li se systému předat dostatečná energie pro vybuzení měřitelných vibrací, pak musí být impuls velmi intenzivní. Jeho velká počáteční amplituda klade značné nároky na dynamický rozsah měřicí aparatury. Krom toho, řada algoritmů pro následné numerické zpracování naměřených hodnot je založena na předpokladu, že experiment splňoval podmínky pro *lineární, časově invariantní systém* (LTI = Linear, Time Invariant). Podmínka pro linearitu je obvykle zajištěna tím, že v systému jsou pouze malé výchylky, a tak nelineární chování se neuplatní. Jenže právě intenzivní počáteční impuls může tuto podmínku porušit. Výsledkem je spektrum, které je závislé na intenzitě úderu, což velmi znesnadňuje následnou interpretaci výsledků.

Matematický rozbor metody impact-echo vede k závěru, že lze vytvořit metodu novou, která zmiňované nedostatky odstraní. Lze dokázat, že stejnou informaci, kterou získáváme metodou impact-echo, můžeme naměřit i pomocí deterministického generátoru bílého šumu. Byla proto navržena a sestavena funkční měřicí aparatura, jejíž vlastnosti byly ověřeny pomocí teplotně degradovaných cementových vzorků.

Ukázalo se, že popisovaná metoda dává výsledky srovnatelné s metodou impact-echo, ale zároveň umožňuje automatizované kontinuální měření a navíc i zjišťování nelineárních vlastností vzorků, čímž metodu impact-echo překonává.

Závěry vyplývající z modelů popsanych v první části práce se uplatnily při zpracování dat získaných inovovanou metodou. Výsledkem jsou vypočtené materiálové charakteristiky a jejich závislost na vysoké teplotě, jíž byly cementové vzorky vystaveny.

Kapitola 3

Numerická simulace elastických vln

3.1 Modální analýza kvádrového vzorku

Pro získání představy o tom, co lze očekávat od výpočtů a měření, pokusme se nalézt co nejlepší shodu s experimentem za ideálních podmínek. Použijeme kvádr z hliníkové slitiny o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm, což je stejné jako velikost betonových vzorků. Menší variantu, $40 \times 40 \times 160$ mm protentokrát vynechme, protože všechna měření budou na velkém vzorku přesnější.

Pomocí frekvenčního analyzátoru bylo naměřeno několik rezonančních frekvencí, u kterých se postupně podařilo identifikovat, o jaký mód kmitání se jedná. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené frekvence v Hertzích:

	1	2	3	4
příčné	2818,2	6215	9931,5	13312,6
torzní	3548,9	7096,5	10638,4	14169,5
podélné	6514,5	12770,5		

Pomocí modální analýzy budeme hledat takovou dvojici materiálových konstant, u kterých bude shoda nejlepší u všech naměřených frekvencí. Modální analýza zahrnuje všechny jevy týkající se lineární elasticity a setrvačnosti hmoty. Zdrojem nepřesností u tohoto modelu bude především diskretizace a numerické chyby.

Vzorek ve tvaru kvádrů byl rozdělen na elementy, dále byla sestavena matice tuhosti a pomocí řešiče LOBPCG, viz [9], bylo nalezeno prvních dvacet vlastních tvarů a vlastních hodnot. Z nich byly následně vypočteny vlastní frekvence. Počet elementů byl nastaven tak, aby další zjemňování sítě nemělo na výsledky vliv. Ukázalo se, že vhodná velikost

je $120 \times 16 \times 16$ elementů, což vede na matici s téměř sedmi miliony nenulovými prvky. Všechny tyto úkoly byly řešeny pomocí programu SfePy.

Po několika iteracích bylo zjištěno, že nejlepší shody výpočtu a experimentu se dosáhne u materiálových konstant nastavených následovně:

$$E = 75 \text{ GPa} \quad \nu = 0,452 \quad \Rightarrow \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 25,8 \text{ GPa}$$

Jak je z těchto hodnot zjevné, modul pružnosti ve smyku je ve velmi dobré shodě s tabulkovou hodnotou 26 GPa. Podobné shody se podařilo dosáhnout i v předcházejícím rozboru torzních kmitů.

Bohužel, nelze říci totéž o modulu pružnosti v tahu, který, spolu s Poissonovým poměrem, vychází příliš velký. Hodnoty neodpovídají tabulkovým hodnotám $E=71$ GPa a $\nu=0,33$.

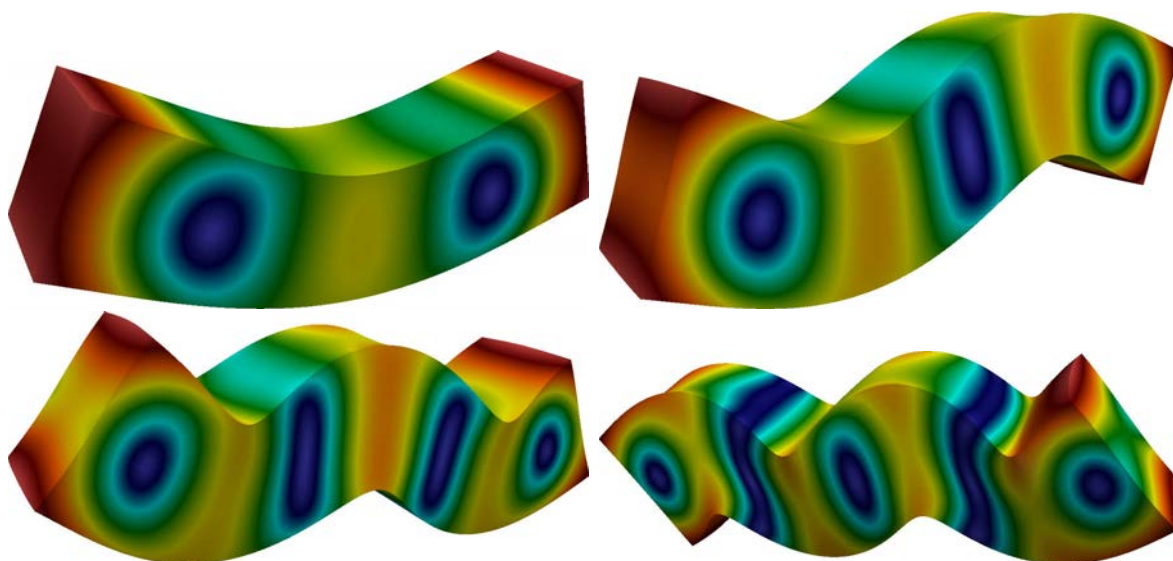
Těžko hledat vysvětlení pro tuto neshodu, protože vypočtené frekvence velmi dobře souhlasí s realitou. Následující tabulka obsahuje naměřené frekvence a jejich odchylku od vypočítaných. Frekvence jsou v hertzech a jsou seřazené podle velikosti, tj. podle pořadí vlastních hodnot:

mód	modální analýza	měření	odchylka (%)
1. příčný	2829,6	2818,2	0,41
1. torzní	3548,7	3548,9	-0,0044
2. příčný	6244,9	6215	0,48
1. podélný	6503,6	6514,5	-0,17
2. torzní	7096,6	7096,5	0,00073
3. příčný	9975,5	9931,5	0,44
3. torzní	10642,5	10638,4	0,038
2. podélný	12585,4	12770,5	-1,4
4. příčný	13349,3	13312,6	0,28
4. torzní	14185,4	14169,5	0,11

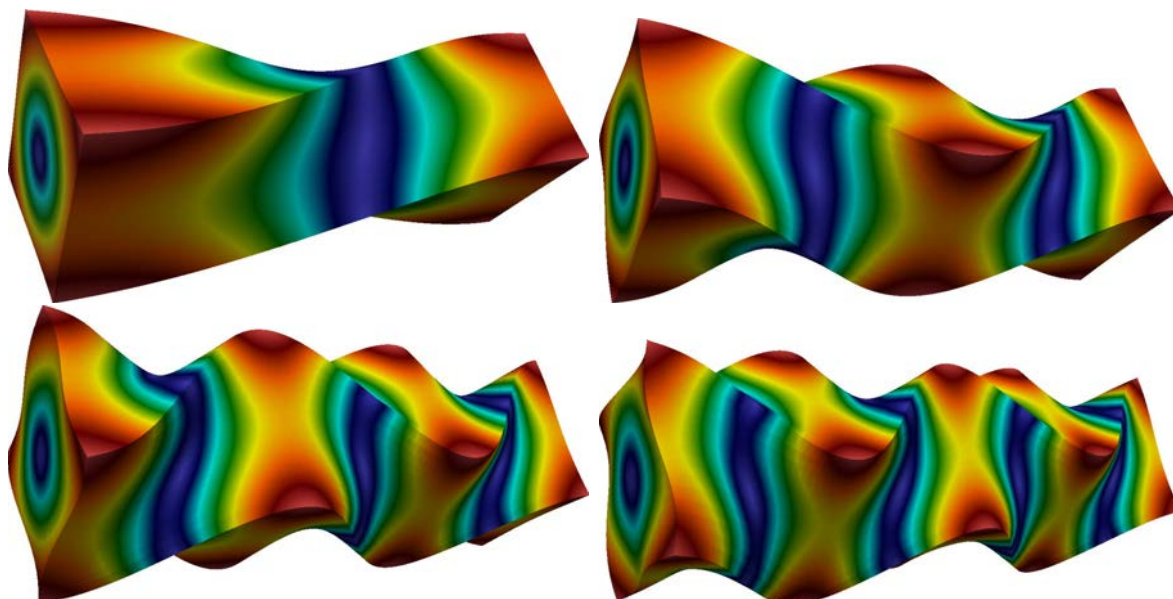
Největší odchylku najdeme u druhého podélného módu, a ta činí 1,4%. Kromě této největší anomálie souhlasí zbývajících devět hodnot s přesností lepší než pět promile. Jednoznačně nejlépe vycházejí torzní kmitů.

Na ilustracích 3.1 až 3.3 jsou zobrazeny vypočtené vlastní tvary pro všechny zkoumané módy. Barevná škála vypovídá o výchylce daného elementu z rovnovážné polohy. Výchylka byla mnohonásobně zvýrazněna pro lepší představu o tvaru zdeformovaného tělesa.

Závěrem lze říci, že výpočet byl ve většině případů velmi přesný a nevyjasněné odchylky prozatím ponechme stranou. Lze totiž očekávat, že u betonových vzorků vznikne řada potíží, které povedou k výrazně větším chybám.



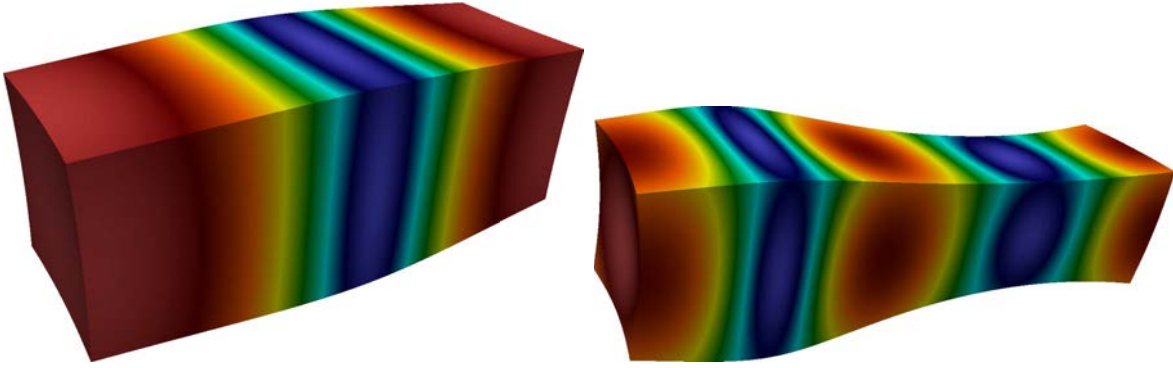
Obr. 3.1: Na obrázku jsou vlastní tvary prvních čtyř příčných kmitů. Jejich frekvence není možné uspokojivě vypočítat pomocí Euler-Bernoulliho teorie, protože ta platí jen pro tenkou tyč. Modální analýza zde dosáhla pro všechny módy přesnosti lepší než pět promile.



Obr. 3.2: Na tomto obrázku jsou první čtyři vlastní tvary torzních kmitů. Frekvence torzních kmitů vycházejí velmi přesně v poměru 1:2:3:4 a téměř nezávisí na Poissonově poměru. Proto jsou torzní kmity vhodnou metodou pro měření modulu pružnosti ve smyku.

3.2 Model na bázi soustavy tlumených oscilátorů

Modální analýza popsaná v předchozí kapitole se ukázala jako použitelný nástroj pro předpověď rezonančních frekvencí, ale pro simulaci chování materiálů s komplikovanou



Obr. 3.3: Vlastní tvar prvního a druhého podélného módu vypovídá o tom, že kromě délkových změn dochází ještě k příčnému ztenčení či rozšíření. V důsledku těchto jevů přestává platit, že poměr frekvencí je jedna ku dvěma. U druhého podélného módu byl výpočet pomocí modální analýzy nejméně přesný ze všech módů. Chyba činila 1,4%.

mikrostrukturou bude vhodnější naprogramovat výpočetní software nový, který by umožňoval větší volnost při programování netriviálních materiálových vlastností, například nelineárních vazeb.

Základem vytvořeného programu byla soustava vázaných oscilátorů, u kterých jsou nadefinovány vzájemné interakce mezi elementy. U první testovací verze na každý element působily čtyři síly. Označme je F_1 až F_4 :

1. F_1 : Příčinou vzniku této síly je existence modulu pružnosti v tahu. Tato síla způsobuje šíření podélné vlny.
2. F_2 : Tato síla má původ v modulu pružnosti ve smyku. Díky ní se v materiálu šíří příčná vlna.
3. F_3 : Tato síla způsobuje tlumení podélné vlny.
4. F_4 : Spolu se silou F_3 se tato síla podílí na disipaci energie ze systému. Síla F_4 má za následek tlumení příčné vlny.

Pro element o hmotnosti m vyplývá z druhého Newtonova zákona

$$m \frac{\partial v_i}{\partial t} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

tedy

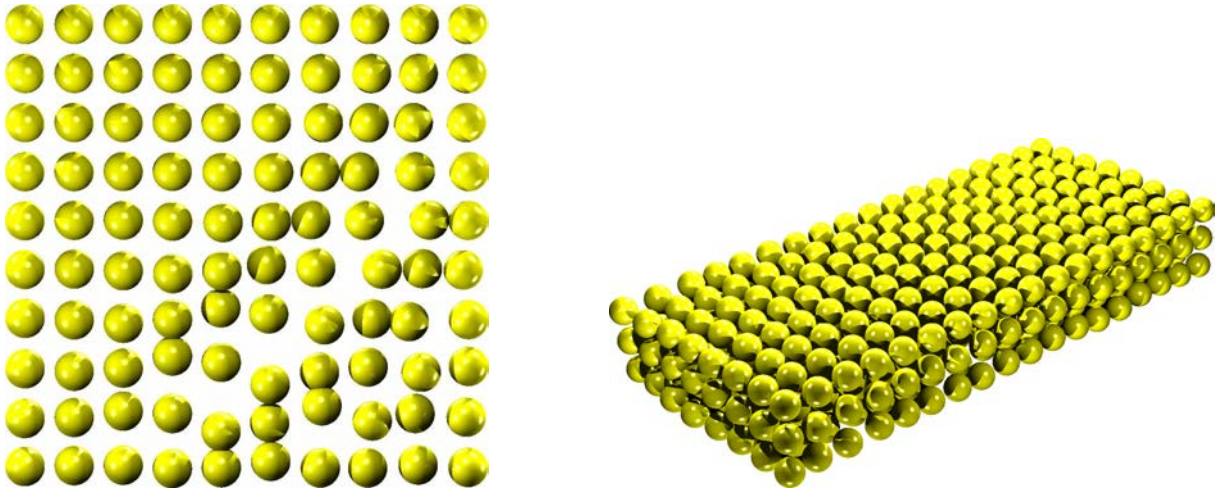
$$m \frac{\partial v_i}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 r_i}{\partial r_i^2} + \beta \left(\sum_{j=1}^N \frac{\partial^2 r_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^2 r_i}{\partial x_i^2} \right) + \gamma \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} + \delta \left(\sum_{j=1}^N \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Což lze přepsat na tvar

$$m \frac{\partial v_i}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 r_i}{\partial r_i^2} + \beta \left(\nabla^2 \mathbf{r} - \frac{\partial^2 r_i}{\partial x_i^2} \right) + \gamma \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} + \delta \left(\nabla^2 \mathbf{v} - \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} \right) \quad (3.2)$$

Numerické řešení této soustavy parciálních diferenciálních rovnic je hlavním úkolem simulačního programu a konstanty α , β , γ a δ lze určit z materiálových charakteristik.

Ukázka stavu systému v průběhu simulace je zachycena na obrázku 3.4, přičemž pomocí modelu bylo možné demonstrovat řadu typických vlnových jevů.



Obr. 3.4: Dvojměrný a trojměrný případ

Pomocí popsaného modelu bylo vypočteno chování záměrně poškozeného vzorku. Poškozením materiálu se myslí změna ve struktuře materiálu, která má za následek zhoršení vlastností. Ve stavebnictví se mezi sledované vlastnosti většinou řadí meze pevností, modul pružnosti v tahu a modul pružnosti ve smyku. Přítomnost trhlin snižuje všechny zmíněné parametry a dá se očekávat, že bude mít vliv i na šíření mechanického vlnění.

Poškození vzorku bylo simulováno nahodilým zeslabením vazeb mezi elementy. Koeficient každé vazby mezi elementy byl v celé struktuře vynásoben náhodným číslem z intervalu $\langle a; 1 \rangle$, kde a představuje maximální míru zeslabení.

Vzorek byl ve výsledku složen ze stejného počtu elementů, ale lze si představit, že jeho mikrostruktura byla narušena a makroskopicky se jevil téměř jako homogenní.

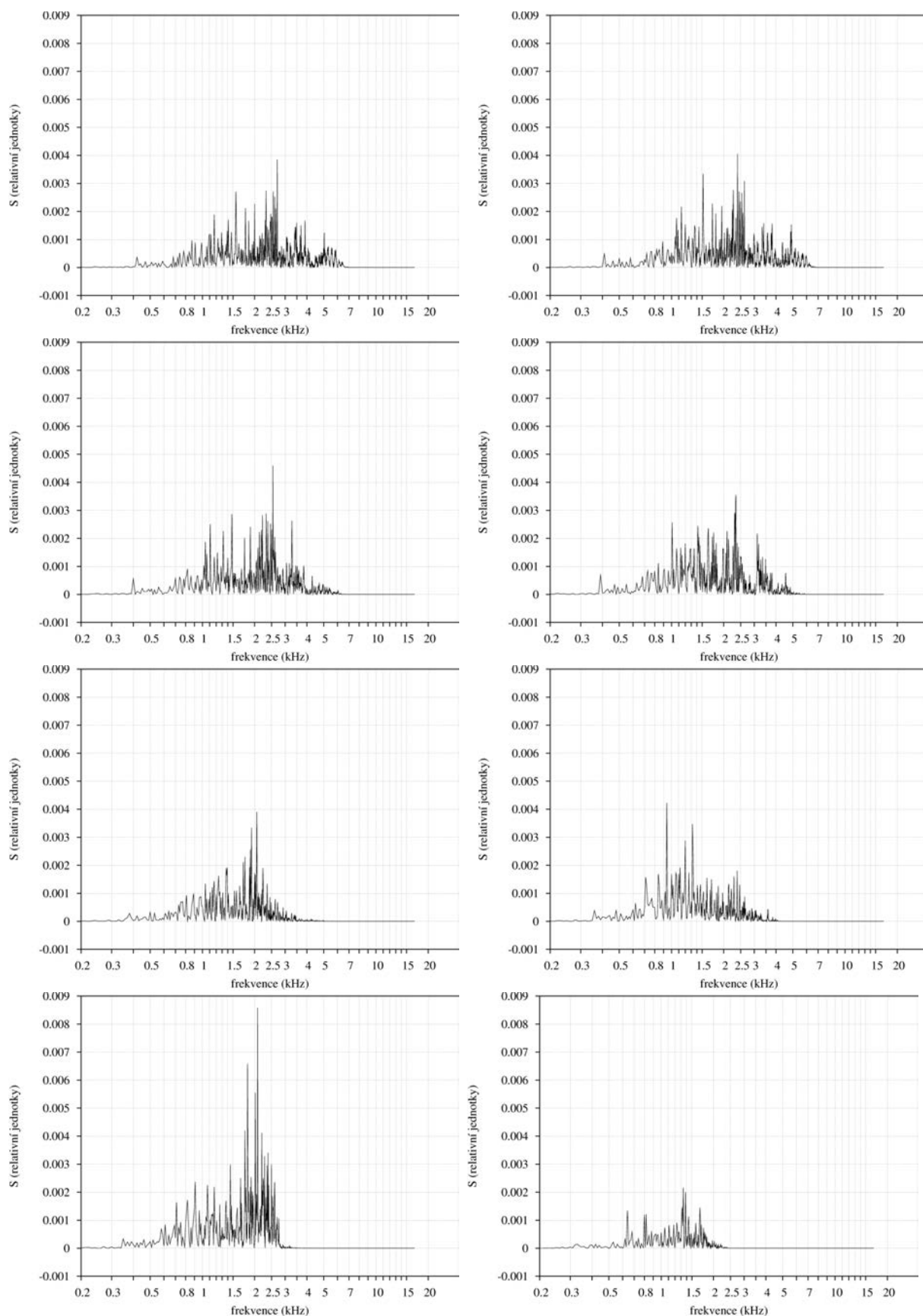
Byl naprogramován skript, který postupně snižoval koeficient a a v každém kroku spustil celou hlavní simulaci.

Výsledek simulace je patrný na obrázcích 3.5. Z grafů je patrné, že narůstající poškození vede ke snížení frekvence oscilací.

Byl naprogramován simulační software, který vypočítává časový vývoj trojrozměrné soustavy tlumených vázaných oscilátorů. Výsledky naznačují, že tento model je schopen simulovat základní jevy spojené s nedestruktivním testováním pomocí metody impact-echo. V těchto tezích jsou stručně uvedeny výsledky pro poškození materiálu zeslabením vazeb mezi elementy, nicméně v hlavní práci je popsáno též simulované poškození v důsledku přítomnosti dutiny krychlového tvaru uvnitř vzorku.

Detailní rozbor chování modelu, jeho další možnosti konfigurace a porovnání s experimentem je popsán v disertační práci¹ [12].

¹J. Martinek, Numerická simulace akustických kmitů v materiálu, disertační práce 2006



Obr. 3.5: Frekvenční spektra materiálu, u kterého bylo simulováno poškození náhodným zeslabením vazeb mezi elementy. Grafy odpovídají postupně narůstající míře poškození.

Kapitola 4

Vývoj měřicí metody

Hlavním zaměřením minulých kapitol byla snaha porozumět elastickému kmitání a vlnění ve zkoumaném vzorku a vypočítat vibrace pomocí několika modelů. Výsledkem byla numerická předpověď rezonančních frekvencí i mnoha jiných jevů.

Nyní se soustředíme na další část, která souvisí s nedestruktivním testováním, a tím je vývoj měřicích metod. Přestože i v předchozí části přišla ke slovu řada experimentů, jejich provedení ponejvíce připomínalo metodu impact-echo.

Při obecném rozboru metody impact-echo lze dokázat, že existují i jiné přístupy, které vedou k získání stejné informace jako využitím metody impact-echo. Rezonanční spektrum zkoumaného vzorku můžeme naměřit též pomocí deterministického generátoru bílého šumu. Zmiňovaný přístup je podrobně popsán v hlavní práci, ale zde jen uvedme základní vlastnosti.

4.1 Generátor na bázi posuvných registrů

Jednou z možností, jak generovat binární bílý šum je využití posuvných registrů a XOR hradla. Touto tematikou se velmi podrobně zabýval Solomon W. Golomb (1932-2016), který vytvořil rozsáhlou teorii týkající se zajímavých matematických vlastností takto vzniklých binárních řad. Jeho dílo se v současné době využívá v mnoha technologiích při zpracování signálu či digitálních dat (např. kontrolní CRC součty, 3G sítě, LTE, Wi-Fi, Bluetooth, GPS a další).

Základní představa generátoru je řada n binárních registrů. Označme je $a_{n-1} \dots a_0$. Kromě posledního registru a_0 jsou zapojeny tak, že výstup každého z nich je připojen na vstup registru následujícího. Některé vybrané registry jsou navíc přivedeny do více-vstupového XOR hradla, jehož výstup tvoří zpětnou vazbu a je připojen na vstup prvního

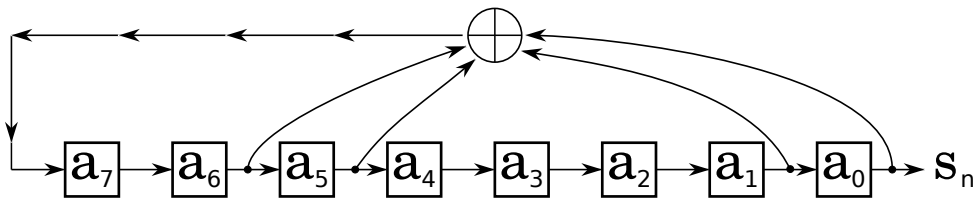
registru a_{n-1} .

Celý logický obvod pracuje v několika krocích:

1. Přečte se obsah registru a_0 , čímž získáme další bit patřící do sekvence.
2. Obsah všech registrů se posune o jedno doprava. Původní hodnota a_0 se přemaže.
3. Obsah registru a_{n-1} se naplní podle výsledku XOR operace z několika vybraných registrů.

Celý děj se opakuje, přičemž z posledního registru a_0 postupně čteme celou sekvenci bitů.

Je zjevné, že sekvence bitů je *deterministická*, tj. z každého stavu jednoznačně plynou další stavy. Po určitém počtu kroků se tedy každý stav musí nutně zopakovat, protože celkový počet všech stavů je omezen hodnotou 2^n . Ihned můžeme vyřadit možnost, že by všechny registry byly nulové. Z takového stavu by žádný další nebylo možno vytvořit, protože nulové vstupy XOR hradla by dávaly nulu i na jeho výstupu. Celkový počet variant je tedy o jedničku menší, tj. $2^n - 1$.



Obr. 4.1: Blokové schéma generátoru, který pomocí osmi posuvných registrů vytváří binární sekvenci. Protože čísla registrů připojených na vstup XOR hradla odpovídají primitivnímu polynomu, bude se výsledná sekvence bitů opakovat po maximální možné délce $2^8 - 1 = 255$ bitů.

Popsaný generátor vytvoří sekvenci maximální délky (Maximum Length Sequence, MLS), přičemž tato sekvence bude mít mnoho zajímavých matematických vlastností, z nich nejdůležitější je pro nás to, že její frekvenční spektrum bude ploché a bude se tedy jednat o generátor bílého šumu.

4.2 Softwarová implementace

Na základě popisu je poměrně jednoduché vyrobit generátor na bázi posuvných registrů, ale ještě snazší je chování celého procesu naprogramovat. Následující program v jazyce Python vytvoří MLS sekvenci a vypočte z ní frekvenční spektrum.

```

1  #!/usr/bin/python
2  from scipy import *
3  bits = 4
4  N = 2**bits - 1
5  a = 1
6  coefs_all = ((0,), (0,1), (0,1), (0,1),
7              (0,2), (0,1), (0,1), (0,1,5,6),
8              (0,4), (0,3), (0,2), (0,3,4,7),
9              (0,1,3,4), (0,1,11,12), (0,1), (0,2,3,5),
10             (0,3), (0,7), (0,1,5,6), (0,3))
11
12  mask_shifts = [(1 << x, bits-x) for x in coefs_all[bits-1]]
13  signal = zeros(N, int16)
14  for i in range(N):
15      signal[i] = (a & 1)
16      for m, s in mask_shifts:
17          a ^= (a & m) << s
18      a = a >> 1
19
20  print signal
21  print abs(fft(signal)[::(N//2 + 1)])

```

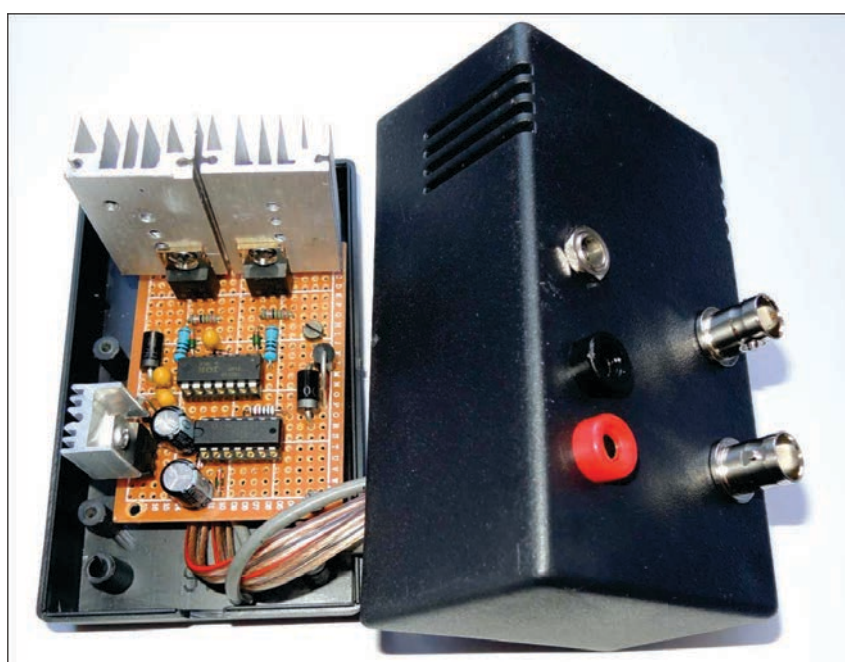
Po spuštění dostaneme výsledek:

```

[1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1]
[ 8.  2.  2.  2.  2.  2.  2.  2.]

```

Přičemž první řádek je MLS sekvence a druhý je příslušné frekvenční spektrum. Je zřejmé, že až na nultou hodnotu, která má význam stejnosměrné složky, jsou všechny ostatní hodnoty konstantní. V tomto případě má sekvence pouze 15 bitů, což je dáno třetím řádkem v programu, kde se počet bitů v posuvném registru nastavuje na $b = 4$. Platí, že celková délka sekvence je $N = 2b - 1$. V principu je algoritmus schopen generovat sekvence až do $b = 20$, tj. celkové délky $N = 1048575$. Získaná předvypočítaná sekvence byla vyslána do digitálního výstupu záznamové karty National Instruments 6251. Signál byl zesílen pomocí sestaveného zesilovače (viz obr. 4.2) a dále přiveden na piezoelektrický budič, který rozkmitával zkoumaný vzorek. Tatáž záznamová karta současně snímala vibrační odezvu získanou pomocí akcelerometru. Na základě znalosti vstupu a výstupu bylo vypočteno rezonanční spektrum vzorku.



Obr. 4.2: Na fotografii je vyrobený asymetrický zesilovač, který sloužil pro zesílení signálu z generátoru bílého šumu.

Kapitola 5

Měření cementových vzorků

Na základě popsaných principů byla sestavena měřicí aparatura, která umožňuje zjišťovat frekvenční odezvu zkoumaných vzorků a využívá při tom deterministický generátor binárního bílého šumu.

Je potřeba ověřit, zda tato nevyzkoušená metoda vede ke srovnatelným výsledkům s jinými akustickými metodami používanými v nedestruktivním testování. Především je důležité porovnání s metodou impact-echo, protože právě s touto metodou existuje značná podobnost.

Namísto úderu kladívka máme šumový generátor, který je výrazně pohodlnější, máme-li sestavit automatizované dlouhotrvající měření. Tato výhoda je zcela zjevná, ale ostatní vlastnosti, především rozlišovací schopnost, bude teprve potřeba ověřit.

5.1 Kontinuální měření frekvence kmitů schnoucího maltového vzorku

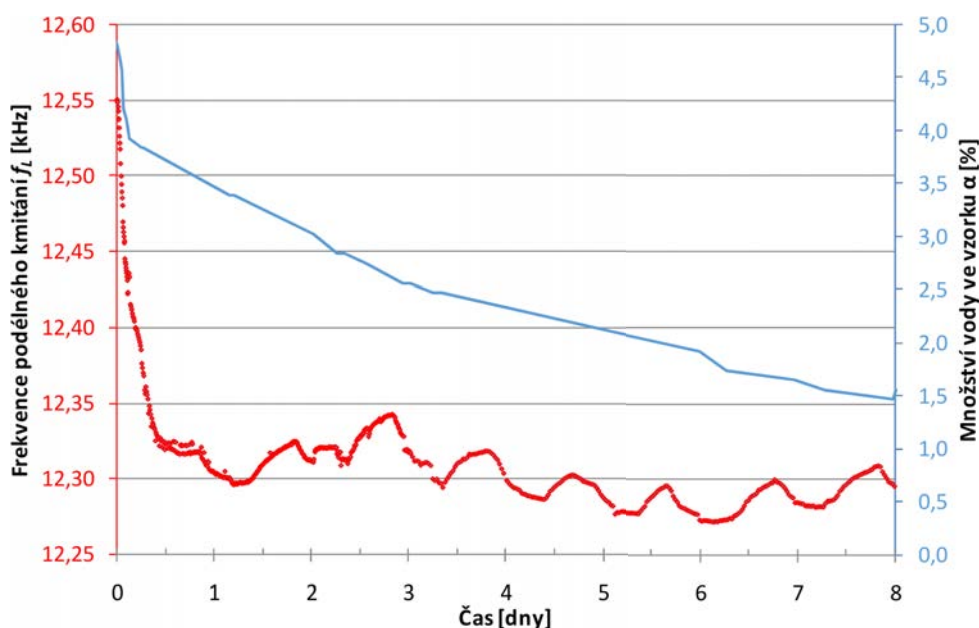
Jedním z prvních experimentů po sestavení aparatury bylo automatizované měření podélných kmitů, které bylo naprogramováno tak, aby v pravidelných intervalech spustilo generátor bílého šumu a zjišťovalo frekvenci podélných kmitů.

Testovaný maltový vzorek měl na počátku měření vysoký obsah vody a postupně vysychal v průběhu několika dní. Frekvence kmitů závisí především na hustotě a modulu pružnosti v tahu.

5.1.1 Experiment a výsledky

Testován byl jeden maltový vzorek o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm, připravený z cementové malty s vodním součinitelem $w/c=0,46$. Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I 42,5R z Českomoravského cementu, a.s. v Mokrém a zkušební křemenný písek pro přípravu malt ze společnosti Filtrační písky, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 72 1200, byly použity tři frakce písku o velikosti zrn 0–1, 1–3, a 3–4 mm, které byly míchány v hmotnostním poměru 1:1:1. Vyrobené těleso bylo odformováno po 24 hodinách a zrálo při teplotě 22°C a 55% relativní vlhkosti. Následně bylo těleso uloženo na 27 dní do vody a pak bylo sušeno po 2 dny při teplotě 60°C . Po vytažení ze sušičky byla změřena hmotnost suchého vzorku W_h a následně byl vzorek uložen do destilované vody po dobu 20 dnů.

Vzorek plně nasycený vodou byl umístěn na digitální váhu a na spodní stranu byl včelím voskem připevněn snímač MIDI. Horní strana vzorku byla vyhlazena a budič CONE zde byl volně položen, bez vazebního prostředku. Zatímco vzorek samovolně vysychal, jeho hmotnost W_m byla pravidelně zapisována a frekvenční spektrum bylo automaticky měřeno aparaturou s MLS signálem. Během osmidenního měření bylo zaznamenáno celkem 672 hodnot základní frekvence vzorku, viz graf 5.1.



Obr. 5.1: Na grafu vidíme závislost frekvence podélných kmitů na čase spolu s naměřeným množstvím vody ve vzorku v průběhu samovolného vysychání.

V prvním dnu probíhalo měření s 10 minutovým intervalem – viz graf 5.2, které se následně prodloužilo na půl hodiny. Pro ověření hodnot naměřených MLS signálem bylo

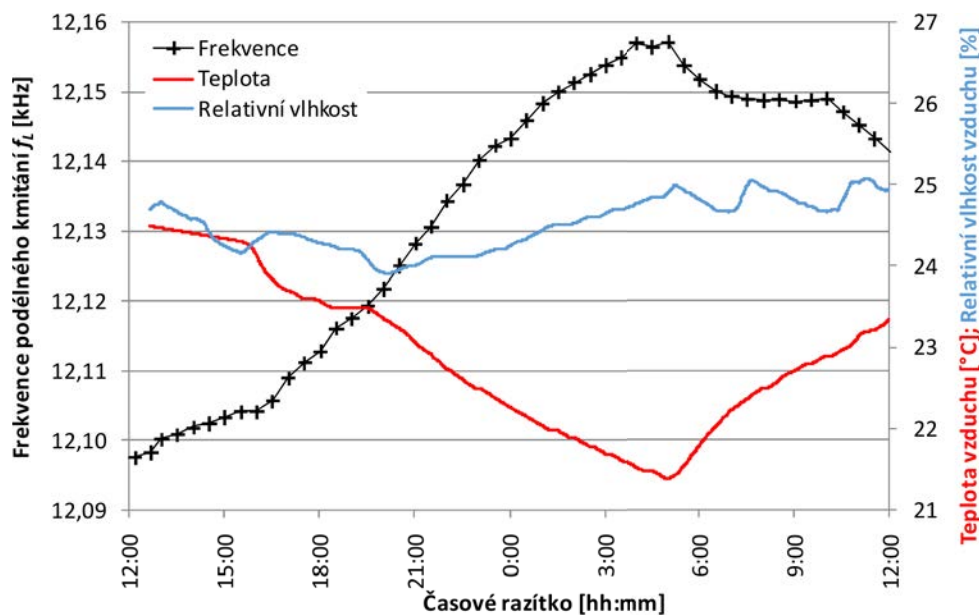
několikrát provedeno manuální měření metodou impact-echo. Poměr vody ve vzorku byl spočítán podle vztahu:

$$\alpha = \frac{W_m - W_h}{W_h} = \frac{W_m}{W_h} - 1$$

Z uvedeného grafu vyplývá, že k největšímu poklesu frekvence došlo v prvních 12 hodinách. Periodické oscilace, které následovaly, byly způsobeny poklesem teploty v nočních hodinách (teplota: 19,3–26,3 °C, RH: 19,3–31,8%). Vliv teploty na vlastní frekvenci vzorku byl následně sledován na již suchém a stabilizovaném vzorku.

Měřicí aparatura s MLS signálem umožnila kontinuální sledování frekvence podélných kmitů vzorku, která se změnila z 12551,1 Hz (mokrý vzorek) na 12097,7 Hz (suchý vzorek).

Výsledky experimentu poukazují na to, že je třeba během měření dbát na dodržení laboratorních podmínek. Metoda využívající MLS signál je natolik citlivá, že spolehlivě zaznamenala změnu teploty vzduchu o 2,5 °C, což vedlo na změnu frekvence podélného kmitání o 0,5%.



Obr. 5.2: Na tomto grafu je vynesena základní frekvence podélného kmitání spolu s teplotou a relativní vlhkostí v závislosti na čase.

5.2 Teplotně namáhané maltové vzorky 40×40×160 mm

Předchozí experiment se schnoucím maltovým vzorkem potvrdil možnost automatizovaného měření pomocí MLS aparatury.

Další měření mělo několik cílů:

1. otestovat použitelnost metody na malých trámčích 40×40×160 mm

Jak jsme již ukázali při rozboru tlumení kmitů, malé standardní vzorky jsou obtížněji měřitelné než velké. Nižší hmotnost má za následek vyšší frekvenci kmitání, z ní vyplývá i vyšší rychlost pohybu a tím i silnější útlum. Vyšší tlumení vede na nižší rozlišovací schopnost frekvence.

Přestože menší varianta zkušebního trámečku již byla úspěšně naměřena při vysychání, je vhodné experiment zopakovat opět s menšími trámečky. Podmínky měření tak budou méně příznivé a snáze odhalíme nedostatky metody.

2. porovnat výsledky měření s jinými ultrazvukovými metodami

Výsledky získané pomocí generátoru bílého šumu byly porovnány s metodou impact-echo. Piezoelektrický snímač MIDI byl u obou metod stejný, a byl připevněn pomocí včelího vosku. Vybuzení kmitů však bylo provedeno dvěma způsoby – šumových generátorem i úderem kladívka.

Současně byl použit i komerčně vyráběný ultrazvukový přístroj PUNDIT plus, který slouží ke zjištění doby průchodu akustického signálu. Tento údaj lze přepočítat na rychlost šíření podélné vlny a porovnat s ostatními metodami.

3. zjistit, zda dominantní frekvence závisí na intenzitě budícího signálu

Zajímavou vlastností, kterou můžeme automatizovaně zjišťovat, je nelineární chování vzorku. U ideálního lineárního vzorku očekáváme, že napětí je za všech okolností úměrné pouze deformaci. Reálný materiál však může vykazovat změny v tomto chování a s narůstající deformací může být vazba měknoucí anebo tuhnoucí. Zvýšíme-li amplitudu kmitů, dojde k posunu frekvenčního maxima.

Zavedme parametr α , který bude vypovídat o nelineárních vlastnostech. Vypočteme jej jako relativní změnu frekvence vůči relativní změně amplitudy:

$$\alpha = \frac{\frac{df}{f_0}}{\frac{dA}{A_0}} = \frac{df}{f_0} \frac{A_0}{dA}$$

přičemž změnu frekvence df zjistíme z posunu frekvence hlavního maxima a změnu amplitudy dA můžeme nalézt jako hodnotu v amplitudovém spektru pro danou frekvenci.

Dopředu nelze posoudit, zda vzorek bude vykazovat nelineární vlastnosti a pokud ano, zda citlivost aparatury a intenzita signálu bude dostatečná k jejich měření.

V teoretickém úvodu jsme pohlíželi na zkoumané vzorky jako na LTI systém, tj. *lineární, časově neproměnný*. Nyní hledáme nelineární vlastnosti, což se může jevit jako

protichůdné. Přesto lze očekávat, že nelineární vlastnosti lze měřit i popsanou aparaturou.

4. ověřit, zda lze odhalit poškození vzorků namáhaných vysokou teplotou

Při zahřívání betonových vzorků dochází k řadě změn, které budou mít za následek změnu dynamického modulu pružnosti v tahu a změnu hustoty, což se projeví na měřené frekvenci základního podélného módu. Není vyloučeno, že i parametr α bude záviset na míře poškození vysokou teplotou.

5.2.1 Materiál a metody

Měření bylo provedeno na několika vzorcích ze stejného materiálu, z nichž každý byl namáhán jinou teplotou. Vzorky o rozměrech ($40 \times 40 \times 160$ mm) byly připravené z cementové malty s vodním součinitelem $w/c=0,46$. Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I 42,5R z Českomoravského cementu, a.s. v Mokré a zkušební křemenný písek pro přípravu malt z Filtračních písků, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 72 1200 byly použity tři frakce písku o velikosti zrn 0–1, 1–3, a 3–4 mm, které byly míchány v hmotnostním poměru 1:1:1. Vyroběné těleso bylo odformováno po 24 hodinách a zrálo při teplotě 22°C a 55% relativní vlhkosti. Následně byla tělesa uložena na 27 dní do vody a pak byla sušena po 2 dny při teplotě 60°C . Vzorky byly individuálně zahřívány v peci na teploty 200°C , 400°C , 600°C , 800°C , 1000°C a 1200°C rychlostí $5^\circ\text{C}/\text{min}$, až do dosažení maximální teploty, na které se vzorek udržoval 60 minut. Po výpalu byly vzorky ponechány samovolně vychladnout. Vzorky byly zapůjčeny panem doc. Rovnaníkem.

Frekvenční oblast, ve které se provádí analýza pro vzorky o délce měřící základny 160 mm, se pohybuje na horní hranici slyšitelného pásma a pokračuje do cca 30 kHz. Pro tento rozsah byl použit budič CONE a snímač MIDI. Vazebním prostředkem obou piezoměničů byl včelí vosk. Testovacím signálem byla sekvence maximální délky, 17 bitů, s frekvencí generování 100 kHz. Měření na každém vzorku bylo provedeno signálem o amplitudě 10 až 90 V, 25krát opakováno a zprůměrováno. Signál byl digitalizován s frekvencí vzorkování 1 MHz. Výsledky naměřené navrženou aparaturou byly srovnány s metodou impact-echo (použitý snímač MIDI) a s ultrazvukovou impulzní metodou (54 kHz nosný signál).

5.2.2 Výsledky a závěr

U vzorků byla zjištěna rychlost šíření podélné vlny a také rezonanční frekvence třemi různými metodami. Cílem bylo ověřit, zda sestavená aparatura vede k výsledkům srovnatelným s metodou impact-echo, ale také s údajem získaným pomocí přístroje PUNDIT.



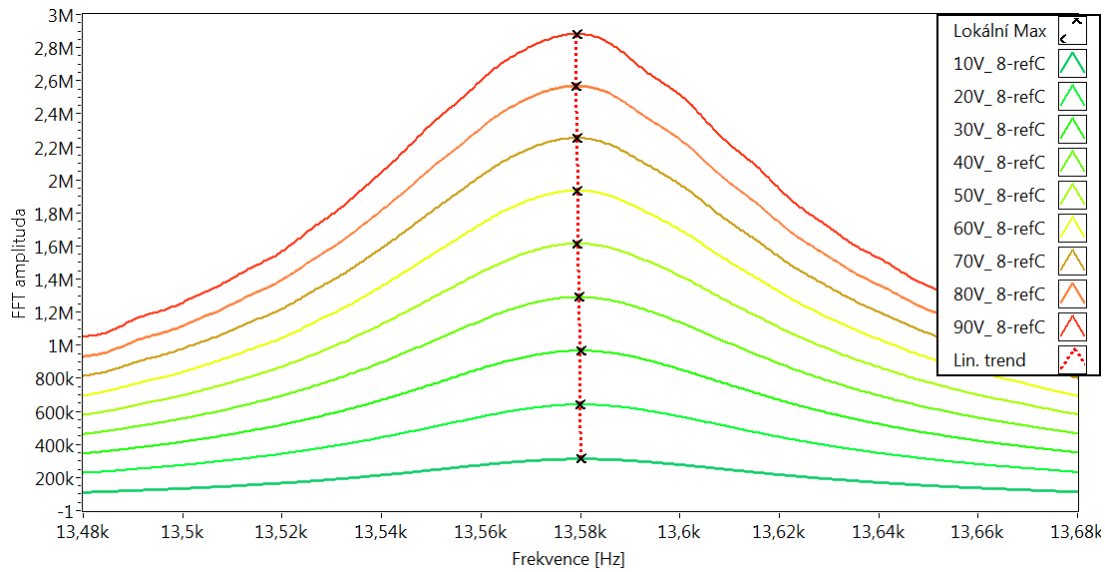
Obr. 5.3: Teplotně namáhané vzorky vyrobené z cementové malty.

Testované vzorky byly namáhány vysokou teplotou. Výsledky všech metod jsou vyneseny na grafech 5.6, přičemž jako doplňující měření byla použita modifikace vstupního signálu, kdy byl vyslán jednorázový puls namísto MLS sekvence.

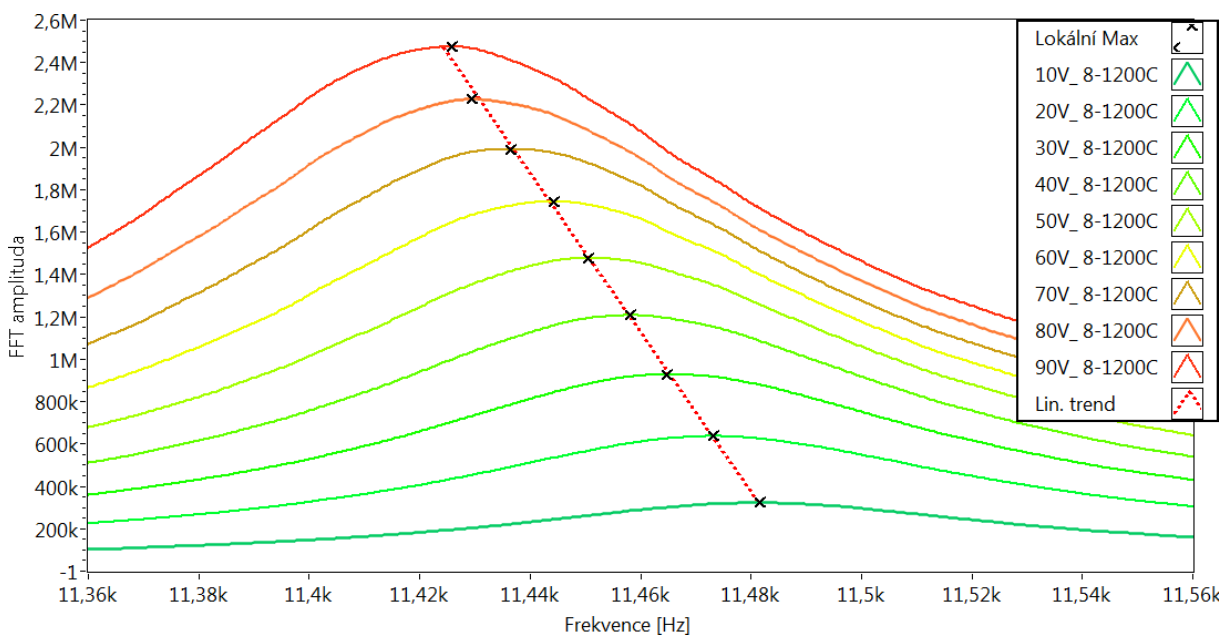
Dalším parametrem, který je možno měřicí sestavou zjistit, je parametr α , který slouží pro klasifikaci nelinearity vzorku. K tomuto experimentu je nutné měření opakovat s narůstající intenzitou signálu, přičemž výsledkem je lineární závislost frekvence na amplitudě FFT. Příímka proložená všemi maximy ve spektru slouží k přesnému určení nelineárního koeficientu α . Pro stručnost je zde uveden pouze graf 5.4 vztahující se k referenčnímu vzorku a graf 5.5, který představuje měření vzorku namáhaného teplotou 1200°C. Je zjevné, že referenční vzorek nevykazuje žádnou změnu rezonanční frekvence, zatímco poškozený vzorek je zcela zřetelně nelineární. Velmi důležitou skutečností je to, že pomocí metody impact-echo nelze obdobné měření získat a je nutno tyto výsledky chápat jako výraznou výhodu testované metody na bázi šumového generátoru.

Výrazný pokles všech měřených ukazatelů pro vzorek namáhaný 1200 °C je zcela neočekávaným jevem. Zde poněkud předbíháme, ale vzorky s recepturou A a B popsané v následující kapitole, se od těchto maltových lišily pouze v kamenivu a vykazovaly naopak zlepšení vlastností. Alternativní píky frekvence podélného kmitání obou metod umožňují

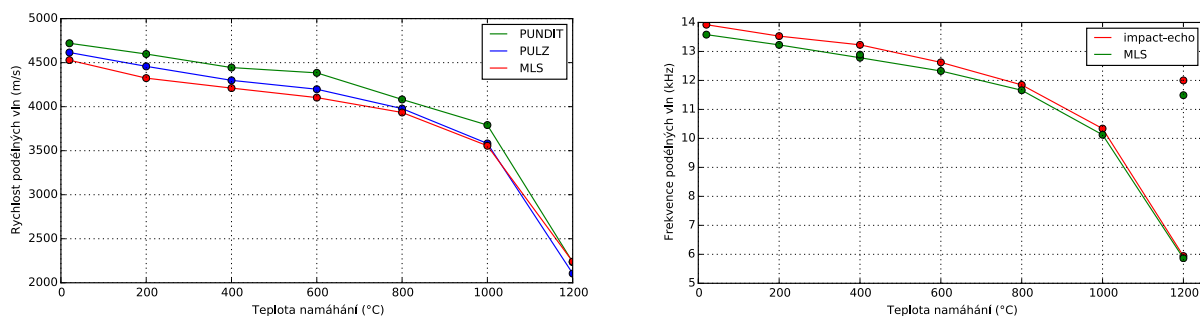
i takovou interpretaci, ale to bylo vyvráceno měřením rychlosti ultrazvukových vln.



Obr. 5.4: Referenční vzorek – posun f_l se zvyšující se amplitudou budícího signálu



Obr. 5.5: Vzorek namáhaný teplotou 1200°C a posun rezonanční frekvence dominantního maxima v závislosti na amplitudě budícího signálu.



Obr. 5.6: Novou metodu založenou na MLS signálu je nutno porovnat se stávajícími zavedenými metodami, a tak rychlost podélných vln i rezonanční frekvence byly zjištěny též metodou impact-echo a impulzním přístrojem PUNDIT. Grafy potvrzují shodu u všech metod. Křivka označená PULZ odpovídá měření, kdy se namísto MLS sekvence vyslal pouze jediný pulz.

5.3 Měření teplotně namáhaných betonových vzorků

Za účelem srovnání výsledků měřicí aparatury s klasickými metodami a pro ověření použitelnosti na velkých standardních trámcích (100×100×400 mm) bylo provedeno měření na identických vzorcích namáhaných různou teplotou. Oproti předešlému experimentu byl použitý kontaktní reproduktor jako budič a MEMS mikrofon, protože tato kombinace je vhodnější pro nižší frekvence, které se u větších vzorků očekávají. Mikrofon nebyl upevňován ke vzorku, takže příprava měření trvala jen zlomek času.

Pro srovnání byly použity dvě receptury pro výrobu betonu, které budeme označovat *A* a *B*, a které byly navrženy a vyrobeny panem prof. Helou. V přepočtu na 1 m³ byly vzorky připraveny v následujících poměrech jednotlivých složek:

receptura A

345 kg Portlandského cementu CEM I 42,5 R – Mokrý
 848 kg křemenného písku s frakcí 0/4 mm – Žabčice
 980 kg kameniva 8/16 – Olbramovice
 2,8 kg superplastifikátoru Sika ViscoCrete 2030
 160 kg vody ($w = 0,46$)

výsledná konzistence: 550 mm sednutí kužele.

receptura B

345 kg Portlandského cementu CEM I 42,5 R – Mokrý
896 kg křemenného písku s frakcí 0/4 mm – Žabčice
521 kg kameniva 8/16 – Olbramovice
391 kg kameniva 11/22 – Olbramovice
2,5 kg superplastifikátoru Sika ViscoCrete 2030
153 kg vody ($w = 0,44$)

výsledná konzistence: 150 mm sednutí kužele.

Obě směsi byly vloženy do forem o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm a zavibrovány. Následně byly betonové vzorky uloženy na 28 dní do vody. Po vytažení byly vysušeny v horkém vzduchu v sušičce při teplotě 110°C po dobu dvou dnů. Poté se vzorky individuálně zahřívaly v peci Rhode KE 130B na teploty 200°C , 400°C , 600°C , 800°C , 1000°C a 1200°C rychlostí $5^\circ\text{C}/\text{min}$, až do dosažení maximální teploty, na které se vzorek udržoval 60 minut. Po výpalu jsme vzorky nechali samovolně vychladnout.

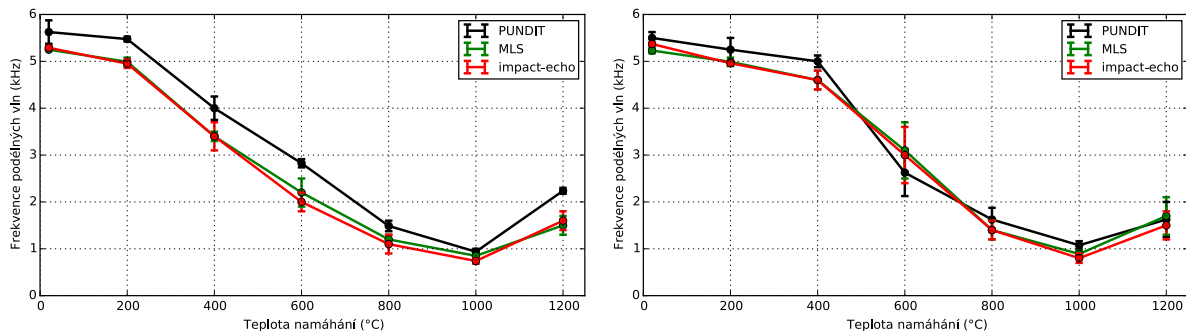
Frekvenční oblast, ve které se provádí analýza pro vzorky o délce měřící základny 400 mm, se pohybuje do cca 15 kHz. Pro tento rozsah byl použit kontaktní reproduktor jako budič EX60S a bezkontaktní mikrofonní snímač MEMS. Vazebním prostředkem reproduktoru byl Sono gel. Testovacím signálem byla sekvence maximální délky 17 bitů a každá sekvence se proto opakovala každých $2^{17} - 1 = 131071$ bitů.

Frekvence generování byla nastavena na 100 kHz, a tak se signál opakoval přibližně každých 1,3 sekund. Měření na každém vzorku bylo provedeno signálem o amplitudě 1 až 31 V. Signál byl digitalizován s frekvencí vzorkování 1 MHz. Výsledky naměřené navrženou aparaturou byly srovnány s metodou impact-echo (použitý snímač MIDI) a ultrazvukovou impulzní metodou (54 kHz nosný signál).

5.3.1 Naměřené vlastnosti vzorků

Vyhodnocení nalezených parametrů rozdělme do dvou skupin, z nichž první bude souviset nejen se zkoumaným materiálem, ale také s tvarem vzorku. Patří mezi ně hmotnost, rezonanční frekvence a čas průchodu ultrazvukového signálu. Z těchto parametrů nelze pro testovaný materiál nic vyvozovat, ale přesto mohou posloužit pro vzájemné porovnání použitých metod. Metoda impact-echo a metoda na bázi MLS signálu umožňují nalézt rezonanční frekvenci, zatímco ultrazvukový přístroj PUNDIT měří dobu průchodu signálu mezi budičem a senzorem. Čas průchodu τ byl přepočten na frekvenci vztahem $f = 1/(2\tau)$.

Závislost všech tří frekvencí na teplotě, jíž byl vystaven testovací vzorek, vidíme na grafech 5.7.



Obr. 5.7: Frekvence podélných kmitů u vzorků receptury A (vlevo) a B (vpravo). Vzorky byly namáhány vysokou teplotou a měřeny metodami impact-echo, pomocí MLS a přístrojem PUNDIT.

Závislosti získané metodou impact-echo a měřením pomocí bílého šumu si velmi dobře odpovídají, zatímco údaje z přístroje PUNDIT se poněkud odchyľují od obou zbývajících metod. Především u vzorku s recepturou A vychází frekvence přístrojem PUNDIT systematicky vyšší, ale přitom budič i senzor tvořily větší přidanou hmotnost, která by měla frekvenci snižovat. Přístroj možná provádí korekce, které nejsou na první pohled zcela zřejmé. Mimo to používá ultrazvukový signál o frekvenci 54 kHz, což je o řád vyšší, než obě zbývající metody.

Tyto nesrovnalosti vedly k tomu, že pro další výpočty již nebudeme údaj z přístroje PUNDIT využívat a v následujících dvou tabulkách jsou uvedeny frekvence z obou zbývajících metod.

Tabulky odpovídají vzorkům receptury A a receptury B a kromě hmotnosti a frekvencí obsahují též parametr α , kterému se budeme věnovat později.

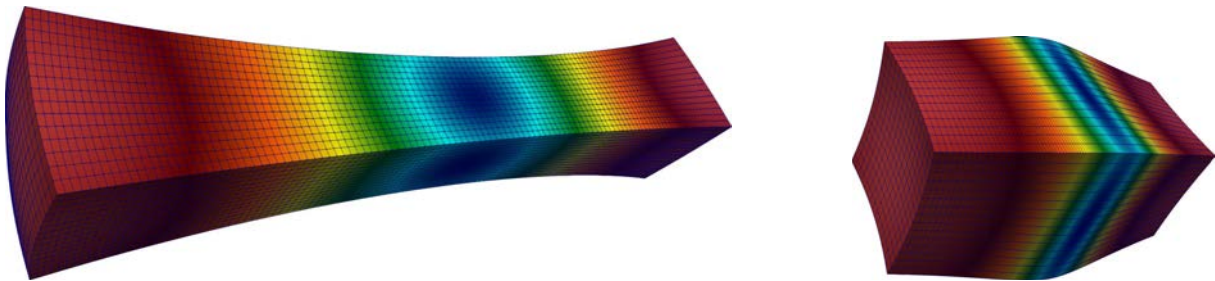
vzorek	m (kg)	f_{IE} (Hz)	f_{IE} (Hz)	f_{MLS} (Hz)	f_{MLS} (Hz)	$\alpha \cdot 10^5$	err.
A02-20	9,414	5316		5230		-3	
A03-20	9,37	5328	5324 ± 3	5252	5247 ± 6	8	5 ± 3
A04-20	9,43	5328		5258		9	
A08-200	9,206	4959		4982		27	
A09-200	9,393	5042	4960 ± 30	5082	4990 ± 30	5	29 ± 9
A10-200	9,296	4869		4908		54	
A14-400	9,302	3260		3349		91	
A15-400	9,2095	3111	3270 ± 60	3241	3380 ± 60	57	73 ± 7
A17-400	9,124	3433		3536		72	
A20-600	9,139	1645		1932		473	
A21-600	9,209	2253	2000 ± 100	2447	2200 ± 100	336	400 ± 30
A22-600	8,742	2217		2321		383	
A27-800	8,838	912		1035		2120	
A28-800	8,9795	1072	1000 ± 30	1285	1180 ± 50	1086	1400 ± 200
A30-800	8,7585	1025		1228		1102	
A34-1000	9,3065	750		860		845	
A46-1000	8,775	778	760 ± 6	852	846 ± 7	852	870 ± 10
A47-1000	8,9716	752		826		910	
A38-1200	8,798	1561		1608		255	
A39-1200	8,894	1222	1470 ± 80	1280	1530 ± 80	478	330 ± 50
A40-1200	8,6195	1622		1689		243	

vzorek	m (kg)	f_{IE} (Hz)	f_{IE} (Hz)	f_{MLS} (Hz)	f_{MLS} (Hz)	$\alpha \cdot 10^5$	err.
B01-20	9,542	5382		5257		8	
B02-20	9,628	5406		5305		2	
B04-20	9,491	5388	5364 ± 9	5272	5230 ± 20	7	10 ± 5
B05-20	9,415	5334		5173		49	
B06-20	9,523	5340		5184		0	
B07-20	9,444	5334		5188		-5	
B10-200	9,166	4977				5039	
B11-200	9,245	5018	4950 ± 20	5091	4990 ± 20	25	7 ± 4
B12-200	9,127	5006		5059		13	
B13-200	9,036	4911		4935		8	
B14-200	9,163	4917		4946		7	
B15-200	8,971	4875		4870		4	
B19-400	9,073	4726	4580 ± 70	4739	4610 ± 70	4	8 ± 1
B20-400	9,082	4923		4926		16	
B21-400	9,153	4673		4672		4	
B22-400	8,997	4458		4485		7	
B23-400	9,056	4577		4634		5	
B26-400	8,858	4130		4209		9	
B28-600	8,908	2038	3000 ± 200	2209	3100 ± 200	342	160 ± 40
B29-600	8,866	2360		2464		307	
B33-600	8,914	2968		3087		157	
B34-600	8,784	3445		3512		62	
B35-600	8,868	3415		3486		48	
B36-600	8,925	3773		3830		18	
B40-800	8,917	1508	1300 ± 40	1662	1360 ± 50	719	1000 ± 100
B41-800	8,84	1406		1469		846	
B42-800	8,737	1329		1335		528	
B43-800	8,87	1198		1270		1241	
B44-800	8,783	1217		1199		1067	
B45-800	8,76	1162		1251		1619	
B46-1000	8,676	703	790 ± 20	829	890 ± 20	987	960 ± 80
B47-1000	8,936	804		982		1031	
B48-1000	8,933	810		835		824	
B49-1000	8,731	816		968		522	
B50-1000	8,616	865		878		1003	
B53-1000	8,859	745		820		1365	
B55-1200	8,614	1371	1490 ± 100	1540	1700 ± 100	435	510 ± 90
B56-1200	8,599	906		1021		1149	
B57-1200	8,56	1353		1484		660	
B58-1200	8,705	1573		1822		317	
B61-1200	8,748	1853		2012		290	
B63-1200	8,687	1865		2053		225	

5.3.2 Vypočítané vlastnosti materiálu

Nyní se budeme věnovat vlastnostem, které souvisejí se zkoumaným materiálem, přičemž na tvaru vzorku nezávisí. Provedeme tedy přepočítání z hmotnosti a frekvence na hustotu, rychlost šíření podélných vln a Youngův modul pružnosti v tahu. Hustotu zjistíme snadno jako podíl hmotnosti a objemu. Rychlost vlnění vypočítáme za předpokladu, že v základním módu je délka vzorku rovna polovině vlnové délky a tudíž platí jednoduchý vztah $v = 2lf$.

Youngův modul pružnosti v tahu byl vypočten pomocí modální analýzy. Do modelu, jehož rozměry odpovídaly skutečným vzorkům, bylo nutno dodat hustotu materiálu, modul pružnosti v tahu a Poissonův poměr. Sledovaným výsledkem modelování byla frekvence základního podélného kmitání, přičemž příslušný vlastní tvar vidíme na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: Na této ilustraci je vypočtený vlastní tvar vzorku kmitajícího v základním podélném módu. Obrázky odpovídají dvěma mezním tvarům při natažení a smrštění. Výchylka elementů je záměrně zvýrazněna, aby byly efekty při deformacích lépe patrné.

Vzhledem k tomu, že Poissonův poměr neznáme, byl výpočet proveden pro jeho mezní hodnoty, které můžeme odhadnout. Ukázalo se, že v intervalu $\nu = 0,15$ až $\nu = 0,25$ má Poissonův poměr jen malý vliv na výsledek a v nejhorším případě se dopustíme chyby asi osm promile. Při modelování byla použita hodnota $\nu = 0,2$.

Ve zcela obecném případě by bylo nutno pro každou naměřenou hustotu zkoušet různé hodnoty modulu pružnosti, dokud vypočtená frekvence nebude odpovídat naměřené. Vzorků je několik desítek a frekvence jsou naměřeny dvěma metodami. Každé modelování by si vyžádalo několik iterací, což by ve výsledku vedlo na velmi zdlouhavý proces.

Pomocí několika modelů byl prokázán zjevný předpoklad, že frekvence je úměrná $\sqrt{E/\rho}$ a postačí pouze nalézt konstantu úměrnosti a model bude přenositelný na všechny vzorky.

V následujících dvou tabulkách najdeme kromě hustoty též rychlosti podélných vln zjištěné dvěma metodami – pomocí impact-echo a využitím MLS signálu. Údaje z obou metod jsou též přepočteny na Youngův modul pružnosti v tahu.

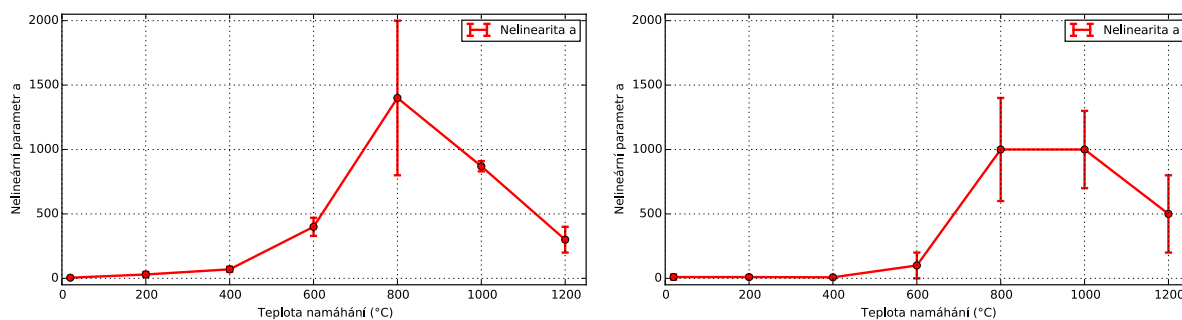
vzorek	ρ kg m ⁻³	v_{IE} (m/s)	v_{MLS} (m/s)	E_{IE} (GPa)	E_{IE} (GPa)	E_{MLS} (GPa)	E_{MLS} (GPa)
A02-20	2353	4252	4184	42,57	42,65 ± 0,06	41,20	41,4 ± 0,1
A03-20	2342	4262	4201	42,56		41,35	
A04-20	2357	4262	4206	42,83		41,71	
A08-200	2301	3967	3985	36,22	36,6 ± 0,6	36,56	37,1 ± 0,6
A09-200	2348	4033	4065	38,21		38,81	
A10-200	2323	3895	3926	35,26		35,83	
A14-400	2325	2608	2679	15,82	15,8 ± 0,6	16,69	16,8 ± 0,5
A15-400	2302	2488	2592	14,26		15,48	
A17-400	2280	2746	2828	17,20		18,25	
A20-600	2284	1316	1545	3,96	6,1 ± 0,7	5,46	7,3 ± 0,7
A21-600	2302	1802	1957	7,48		8,82	
A22-600	2185	1773	1856	6,87		7,53	
A27-800	2209	729	828	1,18	1,43 ± 0,09	1,51	2,0 ± 0,2
A28-800	2244	857	1028	1,65		2,37	
A30-800	2189	820	982	1,47		2,11	
A34-1000	2326	600	688	0,84	0,833 ± 0,007	1,10	1,03 ± 0,02
A46-1000	2193	622	681	0,85		1,02	
A47-1000	2242	601	660	0,81		0,98	
A38-1200	2199	1248	1286	3,43	3,1 ± 0,3	3,64	3,3 ± 0,3
A39-1200	2223	977	1024	2,13		2,33	
A40-1200	2154	1297	1351	3,63		3,93	

vzorek	ρ kg m ⁻³	v_{IE} (m/s)	v_{MLS} (m/s)	E_{IE} (GPa)	E_{IE} (GPa)	E_{MLS} (GPa)	E_{MLS} (GPa)
B01-20	2385	4305	4205	44,22	43,8 ± 0,2	42,19	41,6 ± 0,3
B02-20	2406	4324	4244	45,02		43,35	
B04-20	2372	4310	4217	44,08		42,21	
B05-20	2353	4267	4138	42,86		40,31	
B06-20	2380	4272	4147	43,45		40,95	
B07-20	2360	4267	4150	42,99		40,67	
B10-200	2291	3981	4031	36,33	35,8 ± 0,3	37,24	36,3 ± 0,4
B11-200	2311	4014	4072	37,25		38,34	
B12-200	2281	4004	4047	36,60		37,37	
B13-200	2258	3928	3948	34,87		35,21	
B14-200	2290	3933	3956	35,45		35,86	
B15-200	2242	3900	3896	34,11		34,04	
B19-400	2268	3780	3791	32,42	30 ± 1	32,60	30,8 ± 0,9
B20-400	2270	3938	3940	35,22		35,26	
B21-400	2288	3738	3737	31,98		31,97	
B22-400	2249	3566	3588	28,61		28,96	
B23-400	2263	3661	3707	30,35		31,11	
B26-400	2214	3304	3367	24,17		25,11	
B28-600	2226	1630	1767	5,92	13 ± 2	6,95	14 ± 1
B29-600	2216	1888	1971	7,90		8,61	
B33-600	2228	2374	2469	12,56		13,59	
B34-600	2195	2756	2809	16,68		17,33	
B35-600	2216	2732	2788	16,55		17,24	
B36-600	2231	3018	3064	20,33		20,95	
B40-800	2229	1206	1329	3,24	2,4 ± 0,1	3,94	2,7 ± 0,2
B41-800	2209	1124	1175	2,80		3,05	
B42-800	2184	1063	1068	2,47		2,49	
B43-800	2217	958	1016	2,04		2,29	
B44-800	2195	973	959	2,08		2,02	
B45-800	2189	929	1000	1,89		2,19	
B46-1000	2168	562	663	0,69	0,88 ± 0,03	0,95	1,11 ± 0,05
B47-1000	2233	643	785	0,92		1,38	
B48-1000	2233	648	668	0,94		1,00	
B49-1000	2182	652	774	0,93		1,31	
B50-1000	2153	692	702	1,03		1,06	
B53-1000	2214	596	656	0,79		0,95	
B55-1200	2153	1096	1232	2,59	3,2 ± 0,4	3,27	4,0 ± 0,5
B56-1200	2149	724	816	1,13		1,43	
B57-1200	2139	1082	1187	2,51		3,02	
B58-1200	2176	1258	1457	3,45		4,62	
B61-1200	2186	1482	1609	4,81		5,67	
B63-1200	2171	1492	1642	4,83		5,86	

5.3.3 Nelineární odezva

Nelineární chování vzorků bylo zjišťováno na základě vyhodnocení parametru α , který je podílem relativní změny frekvence základního módu vůči relativní změně jeho amplitudy. Po drobných úpravách této definice bychom mohli nalézt parametr α tak, aby byl materiálovou vlastností, ale bylo by nutné další ověření. Proto raději považujeme naše výsledky za nepřenositelné.

Měření bylo provedeno tak, že postupně narůstala úroveň budícího signálu v rozsahu 1 až 31 V a při každém zvýšení se vypočítala základní frekvence a současně se zaznamenala úroveň amplitudy. Z těchto údajů se vypočítal parametr α , jehož závislost na tepelném poškození vzorků je vynesena na grafech 5.9 a číselné hodnoty jsou uvedeny v předešlých tabulkách.



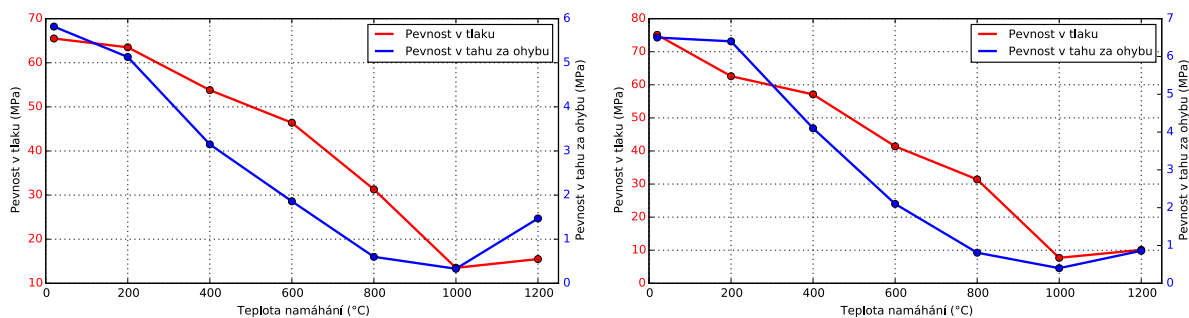
Obr. 5.9: Pomocí MLS byla zjišťována nelineární odezva na narůstající intenzitu budícího signálu. Na grafu je vynesena parametr α pro teplotně namáhané vzorky receptury A (vlevo) a receptury B (vpravo).

Parametr α by byl nulový pro takový materiál, který vykazuje zcela lineární odezvu a frekvence jeho vibrací nezávisí na amplitudě.

To se však nestalo a výsledky uvedené na grafech poukazují na to, že nelineární odezva nejenže je aparaturou velmi dobře měřitelná, ale také dobře vystihuje míru poškození vzorků. Porovnání s metodou impact-echo zde nepřipadá v úvahu, protože ta neumožňuje nelineární odezvu zjistit. Využití bílého šumu pro budící signál zde představuje velkou výhodu.

5.3.4 Destruktivní testy

U některých vzorků byly provedeny též destruktivní testy, jejichž cílem bylo naměřit skutečnou hodnotu pevnosti betonu tlaku a pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na teplotě, které byl daný vzorek vystaven. Výsledky měření jsou uvedeny na grafech 5.10.



Obr. 5.10: Výsledky destruktivního zkoušení teplotně degradovaných vzorků vyrobených podle receptury A (vlevo) a receptury B (vpravo).

Hlavní smysl nedestruktivního testování je předpovědět výsledek testů destruktivních, které by pak nebylo nutno provádět. Pro stanovení kvantitativní korelace mezi pevností betonu a naměřenými akustickými vlastnostmi nemáme dostatek dat. Avšak zběžný pohled na grafy 5.10 a předešlé výpočty vede k přesvědčení, že souvislost zde existuje.

Především bylo cílem ukázat, že nová metoda založená na využití deterministického bílého šumu si zaslouhuje další pozornost.

Kapitola 6

Závěr

V této habilitační práci s názvem *Využití modelování a bílého šumu ve stavební akustické defektoskopii* byly rozebrány různé přístupy k porozumění jevů spojených s akustickými nedestruktivními metodami, a také byla popsána měřicí metoda, která v některých aspektech překonává tradiční metodu impact-echo.

Přibližně polovina práce se věnuje teorii a modelování elastických vln v materiálu, a to především s ohledem na standardní betonové vzorky. Ukazuje se, že přestože je tvar vzorků na první pohled jednoduchý kvádr, z hlediska kmitání a vlnění lze vypočítat a upozorovat řadu komplikovaných jevů. Tuto první část práce nelze považovat za ryze teoretickou, protože mnohé odvozené závěry byly zároveň ověřeny experimentem, byť jednoduchým. Výpočetní postupy a modely tak nezůstávaly pouhým matematickým odvozením, ale vedly například k měření podélných kmitů, příčných kmitů, torzních kmitů, ale také ke zjišťování teplotní závislosti frekvence při zahřívání.

Ukázalo se, že u tenké kmitající tyče lze frekvenci všech druhů kmitů úspěšně matematicky předpovědět, byť za cenu vyřešení netriviálních diferenciálních rovnic. Nebylo však jisté, do jaké míry lze poznatky aplikovat na standardní betonové trámce. Velkým mezníkem bylo pořízení hliníkových bloků o stejných rozměrech, jaké tyto trámce mají. Při stejné geometrii, ale výrazně nižším útlumu kmitů se experimentálně ověřilo, že pouze torzní kmity lze vyjádřit analyticky, přičemž řešení vede na nekonečnou řadu. Výpočetní postupy pro podélné a příčné kmity nedávaly uspokojivé výsledky. Teprve použití numericky náročné metody, modální analýzy, se podařilo s velmi dobrou přesností předpovědět správné frekvence, a to současně pro všechny měřené módy.

Tvorba modelů pokračovala dále s cílem vytvořit časovou simulaci vlnění v různě poškozeném nehomogenním vzorku. Vznikl tak simulační software, jehož princip byl založen na trojrozměrné soustavě vázaných tlumených oscilátorů, který dával výsledky alespoň v prvním přiblížení kvalitativně srovnatelné s očekáváním.

Dále jsem se zaměřil na nahrazení tradiční a odzkoušené metody impact-echo novým přístupem, který byl odvozen z matematického rozboru metody impact-echo. To mne vedlo k návrhu a výrobě generátoru deterministického bílého šumu, který byl sice již popsán v šedesátých letech minulého století, ale jehož využití ve stavebnictví bývá spíše ojedinělé. Vývoj celé nové měřicí aparatury probíhal v úzké spolupráci s doktorandem Ladislavem Carbolem, v jehož závěrečné práci jsou mnohé detaily popsány.

Vlastnosti zmiňované metody byly ověřeny na cementových vzorcích a hlavním závěrem mělo být, zda ob stojí při srovnání jinými akustickými metodami. Kontinuální měření rezonanční frekvence schnoucích maltových vzorků ukázalo velkou citlivost nové aparatury a současně možnost automatizace, čímž například metodu impact-echo překonává.

Následně jsem zkoumal sérii maltových zkušebních trámečků $160 \times 40 \times 40$ mm, přičemž každý z nich byl před měřením vystaven různě vysoké teplotě až do 1200°C . Výsledky měření souhlasily s metodou impact-echo i s ultrazvukovým přístrojem PUNDIT. Současně se však pomocí nové aparatury podařilo naměřit i nelineární odezvu vzorků, která velmi dobře korespondovala s jejich poškozením. Metoda impact-echo toto měření ani neumožňuje.

Další měření opět využívalo teplotní namáhání. Několik desítek betonových vzorků dvou výrobních receptur a různou mírou poškození bylo zkoumáno metodou impact-echo, ultrazvukovým přístrojem PUNDIT a také pomocí nové aparatury. Na závěr byla u některých vzorků destruktivně zjištěna pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Opět se ukázalo, že metoda na bázi deterministického bílého šumu dává srovnatelné výsledky s metodou impact-echo, ale především ji překonává ve své reprodukovatelnosti, možnosti automatizace, zjištění nelineární odezvy a mnoha dalších vlastnostech.

V rámci této habilitační práce vznikly desítky počítačových programů pro nejrůznější účely a jejichž popisu se zde ani nelze věnovat. Drobné skripty usnadňovaly zpracování dat či řešení transcendentních rovnic, měřicí software v reálném čase nahrával zvuk, zobrazoval jeho spektrum a vyhledával maxima, jiný zase generoval bílý šum a zpracovával jeho akustickou odezvu a další prováděl modální analýzu metodou konečných prvků. Několik programů bylo napsáno pro účely modelování, například řešení soustavy spřažených oscilátorů. Samostatnou kapitolou by bylo i programování jednočipových mikropočítačů ve strojovém kódu, což vedlo na prototyp generátoru deterministického šumu.

Současně vznikla i řada elektronických řešení a často je s podivem, jak nízkou cenu mohou mít značně pokročilé elektronické technologie. Nízké náklady na software spolu se snadnou dostupností elektroniky vedou k myšlence, že řada postupů se může uplatnit i při výuce studentů na Stavební fakultě.

Lze předpokládat, že tato práce i její vedlejší výsledky budou užitečné pro další rozvoj v oblasti akustické defektoskopie.

Literatura

- [1] Wätzig H.: Peak recognition technique by a computer program copying the human judgment, *Chromatographia*, Vol. 33, 1992
- [2] Steinbach, J. and Vey, E., 1975, “Caisson Evaluation by Stress Wave Propagation Method,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, GT4, April, pp. 361-378.
- [3] Sansalone, M., Lin, J. M., and Streett, W. B., 1997b, “A Procedure for Determining Concrete Pavement Thickness Using P-Wave Speed Measurements and the Impact-Echo Method” *Innovations in Nondestructive Testing, SP-168*, S. Pessiki and L. Olson, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, pp.167-184.
- [4] Brdička M., Samek L., Sopko B., *Mechanika kontinua*, Academia Praha 2000, druhé vydání, ISBN 80-200-07772-5
- [5] Abraham, O., Léonard, C., Côte, P, and Piwakowski, B, 2000, “Time Frequency Analysis of Impact-Echo Signals: Numerical Modeling and Experimental Validation,” *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 6, November-December, 2000, pp. 645-657.
- [6] Morse, The Velocity of Compressional Waves in Rods of Rectangular Cross Section, *The journal of the acoustical society of America*, Vol. 22, March 1950
- [7] ACI 228.1R, “In-Place Methods to Estimate Concrete Strength,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [8] Brepta, R., *Modifikace metody konečných prvků pro nestacionární problémy dynamiky*, Praha, 1982
- [9] A. V. Knyazev (2001), Toward the Optimal Preconditioned Eigensolver: Locally Optimal Block Preconditioned Conjugate Gradient Method. *SIAM Journal on Scientific Computing* 23, no. 2, pp. 517-541. <http://dx.doi.org/10.1137/S1064827500366124>
- [10] ASTM C 1074, 1998, “Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method,” *2000 Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.02*, ASTM, West Conshohocken, PA.

- [11] ASTM C 1383, "Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method," 2000 Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
- [12] Martinek J., 2006, Numerická simulace akustických kmitů v materiálu, Disertační práce.
- [13] Bracewell, R., 1978, The Fourier Transform and its Applications, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., 444 p.
- [14] Cheng, C. and Sansalone, M., 1995a, "Determining the Minimum Crack Width that can be Detected Using the Impact-Echo Method, Part 1: Experimental Study," Materials and Structures, Vol. 28, No. 176, March 1995, pp. 74-82.
- [15] Carbol L., Měření akustických vlastností stavebních materiálů pomocí pseudonáhodné sekvence, 2016, disertační práce
- [16] Cheng, C. and Sansalone, M., 1995b, "Determining the Minimum Crack Width that can be Detected Using the Impact-Echo Method, Part 2: Numerical Fracture Analyses," Materials and Structures, Vol. 28, No. 177, April, pp. 125-132.
- [17] Cheng, C., and Sansalone, M., 1993b, "Effects on Impact-Echo Signals Caused by Steel Reinforcing Bars and Voids Around Bars," ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, Sept-Oct., pp. 421-434.
- [18] Jaeger, B.J., Sansalone, M.J., and Poston, R.W., 1996, "Detecting Voids in Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method," ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 4, July-August, pp. 462-472.
- [19] Lin, J. M., and Sansalone, M., 1997, "A Procedure for Determining P-wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a Rayleigh Wave Speed Measurement Technique," Innovations in Nondestructive Testing, SP-168, S. Pessiki and L. Olson, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.137-165
- [20] Lin, J.M. and Sansalone, M.J., and Poston, R., 1996, "Impact-Echo Studies of Interfacial Bond Quality in Concrete: Part II—Effects of Bond Tensile Strength," ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 4, July-August, pp.318- 326.
- [21] Lin, Y., and Sansalone, M., 1992b, "Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91. No.2, February 1992, pp. 885-893.
- [22] Lin, Y., and Sansalone, M., 1992c, "Transient Response of Thick Rectangular Bars Subjected to Transverse Elastic Impact," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 5, May 1992, pp. 2674-2685.

- [23] Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N.J., 1991a, "Finite Element Studies of the Impact-Echo Response of Plates Containing Thin Layers and Voids," *Journal of Non-destructive Evaluation*, Vol. 9, No. 1, pp. 27-47.
- [24] Pessiki, S.P. and Carino, N.J., 1998, "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-echo Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No.5, Sept.-Oct., pp. 389-399.
- [25] Poston, R. and Sansalone, M, 1997, "Detecting Cracks in Beams and Columns of a Post-Tensioned Parking Garage Using the Impact-Echo Method," *Innovations in Non-destructive Testing*, SP-168, S. Pessiki and L. Olson, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.199-219.
- [26] Pratt, D. and Sansalone, M., 1992, "Impact-Echo Signal Interpretation Using Artificial Intelligence," *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 2, March-April, pp. 178-187.
- [27] Proctor, T.M., Jr., 1982, "Some Details on the NBS Conical Transducer," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 1, No. 3, pp. 173-178.
- [28] Sansalone, M, 1997, "Impact-Echo: The Complete Story," *ACI Structural Journal*, Vo. 94, No. 6, November-December, pp. 777-786.
- [29] Sansalone, M. and Carino, N.J., 1991, "Stress Wave Propagation Methods," in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Ed. V.M. Malhotra and N.J. Carino, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 275-304.
- [30] Sansalone, M. and Carino, N.J., 1989, "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 86, No. 2, March, pp. 175-184.
- [31] Lew, ACI SP-112, American Concrete Institute, pp. 1-20.
- [32] Sansalone, M., and Carino, N.J., 1987, "Transient Impact Response of Plates Containing Flaws," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 92, No. 6, Nov.-Dec., pp. 369-381.
- [33] Sansalone, M.; Carino, N. J.; and Hsu, N. N., 1987b "A Finite Element Study of the Interaction of Transient Stress Waves with Planar Flaws," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, July-Aug., 1987, pp. 279-290.
- [34] Sansalone, M., Lin, J.M., and Streett, W.B., 1997a, "A Procedure for Determining P-Wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-Wave Speed Measurement Technique," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 6, November-December 1997, pp. 531-539.