

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV FYZIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICS

MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ PSEUDONÁHODNÉ SEKVENCE

MEASUREMENT OF ACOUSTIC PARAMETERS OF BUILDING MATERIALS BY PSEUDORANDOM
SEQUENCE

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. LADISLAV CARBOL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Mgr. JAN MARTINEK, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce se zabývá výzkumem pulzní komprese akustického signálu z hlediska možnosti použití ve stavebnictví. Na základě studia a rozboru těchto metod bylo navrženo a realizováno automatizované měřicí zařízení pro nedestruktivní testování pseudonáhodnou sekvencí maximální délky a následnou automatizovanou signálovou analýzu.

V jediném testovacím cyklu jsou získány tři parametry, které charakterizují lineární i nelineární chování vzorku. Nelineární parametr, čas průchodu ultrazvukových vln vzorkem, který je dále v práci porovnáván s konvenčním pulzním měřením ultrazvukových vln, a spektrální analýza, která je porovnávána s metodou impact-echo.

Funkčnost a optimalizace metody byla provedena na celkem třech sadách zkušebních vzorků zhotovených z různých stavebních materiálů. Provedené experimenty prokázaly jednoduchou interpretaci použité metody a vysokou citlivost na poruchy ve struktuře vzorků spojené s teplotním namáháním. Výsledky byly korelovány konvenčními nedestruktivními metodami a destruktivními metodami byla měřena změna pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Součástí práce je i kontinuální měření vlivu vlhkosti maltového vzorku na jeho základní frekvenci.

Využití pulzní komprese signálu je ve stavebnictví zcela neobvyklé. Teprve v posledních letech se zvyšuje četnost této problematiky v odborných časopisech. Velký potenciál se skrývá ve zmíněném spojení tří testovacích metod do jediné, ve vysoké testovací rychlosti a opakovatelnosti měření, ale také v teoretické možnosti testovat masivní prvky.

Klíčová slova

Sekvence maximální délky, pulzní komprese, signálová analýza, čas průchodu ultrazvukových vln, nelineární spektroskopie elastických vln, cementové materiály, teplotní namáhání, nedestruktivní testování

Abstract

The thesis deals with research of pulse compression of the acoustic signal in terms of applications in civil engineering. Based on the study and analysis of these methods, automated measuring equipment for non-destructive testing with pseudorandom sequence of maximum length and automated signal analysis, have been designed and implemented.

In a single test cycle are obtained three parameters that characterize the linear and nonlinear behavior of the sample. A nonlinear parameter, Time of Flight of ultrasonic wave in the sample is further in the work compared with the conventional pulse measuring, and spectral analysis is compared with the method impact-echo.

Functionality and optimization of the testing method was performed on a total of three sets of test pieces made of various building materials. The experiments proved simple result interpretation, and high sensitivity to structural damage associated with temperature loading. The results were correlated with conventional nondestructive methods and by destructive testing was measured change in compressive strength and flexural strength. This work also includes continual measurement of fundamental frequency influenced by moisture on a mortar sample.

Use of pulse compression signal is in the civil engineering quite unusual. Only in recent years this topic is discussed in scientific articles with increasing frequency. Great potential lies in the association of three test methods into a single. Beneficial is high test speed and measurement reproducibility, but also theoretical possibility of testing massive test elements.

Key words

Maximum length sequence, Pulse compression technique, Digital signal processing, Time of flight of ultrasound waves, Nonlinear elastic wave spectroscopy, cementitious materials, thermal loading, nondestructive testing

Bibliografická citace

CARBOL, Ladislav. Měření akustických vlastností stavebních materiálů pomocí pseudonáhodné sekvence: disertační práce. Brno, 2016, 131 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav fyziky. Vedoucí disertační práce Mgr. Jan Martinek, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
Ing. Ladislav Carbol

Poděkování

Děkuji vedoucímu své disertační práce Mgr. Janu Martinkovi, Ph.D. za odborné vedení a vstřícný přístup při zpracování práce. Děkuji také Mgr. Evě Carbolové za pomoc při gramatické kontrole práce. Také bych rád poděkoval rodičům za vytrvalou podporu a členům katedry za příjemné zázemí.

V Brně dne 1. listopadu 2016

OBSAH

1	Úvod	9
2	Současný stav problematiky.....	11
2.1	Nedestruktivní metody používané ve stavebnictví.....	11
2.2	Akustické nedestruktivní metody.....	12
2.2.1	Ultrazvuková pulzní metoda	12
2.2.2	Kladívková rezonanční metoda	15
2.2.3	Pevnost odvozená z odrazového čísla a rychlosti UZ vln	19
2.2.4	Nelineární ultrazvuková spektroskopie	20
2.3	Signál v časové a frekvenční doméně.....	22
2.4	Vliv vysokých teplot na běžné cementové betony	25
3	Cíle disertační práce	27
4	Zvolené metody zpracování	28
4.1	Použití MLS v NDT.....	29
4.2	Binární testovací signál.....	29
4.3	Perturbační signál: sekvence maximální délky.....	30
4.4	Způsoby generování bílého šumu	34
4.4.1	Bílý šum vytvořený pomocí inverzní Fourierovy transformace	34
4.4.2	Speciální případ bílého šumu – delta funkce	35
4.4.3	Binární generátor bílého šumu	36
4.5	Verifikační metody použité v této práci.....	38
4.5.1	Pevnost v tlaku zkušebních těles.....	39
4.5.2	Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.....	40
5	Experimentální část.....	41
5.1	Měřicí aparatura se signálem MLS.....	41
5.2	Signálová analýza, automatizované zpracování měření.....	43
5.3	Představení jednotlivých částí měřicí sestavy	47
5.3.1	Hardwarový generátor MLS s H mostem [A6].....	47
5.3.2	Záznamová karta NI PCI 6251	51
5.3.3	Binární zesilovač polomost.....	54
5.3.4	Analogové filtry.....	56
5.3.5	Sonda 10X	59
5.3.6	Stabilizovaný zdroj napětí.....	60
5.4	Výběr budiče a snímače.....	61
5.4.1	Piezobudič PZT disk [A7]	61

5.4.2	<i>Piezobudič Langevin</i>	67
5.4.3	<i>Piezosnímač MIDI</i>	71
5.4.4	<i>Kontaktní reproduktor jako budič</i>	73
5.4.5	<i>MEMS mikrofon</i>	75
5.4.6	<i>Měření přenosových charakteristik a impedancí budičů</i>	76
5.5	<i>Testování linearit měřicího řetězce bez měničů</i>	77
5.6	<i>Získání přenosové funkce měřicího řetězce a vzorku [A8]</i>	80
5.6.1	<i>Neparametrická metoda</i>	80
5.6.2	<i>Parametrická metoda</i>	80
5.6.3	<i>Experiment</i>	81
5.6.4	<i>Výsledky a závěr</i>	82
5.7	<i>Volba vazebního prostředku [A9]</i>	84
5.7.1	<i>Experiment a výsledky</i>	85
5.7.2	<i>Závěr</i>	89
5.8	<i>Kontinuální měření frekvence podélných kmitů schnoucího maltového vzorku [A10]</i>	90
5.8.1	<i>Experiment a výsledky</i>	90
5.8.2	<i>Závěr</i>	93
5.9	<i>Měření teplotně namáhaných maltových vzorků [A11]</i>	94
5.9.1	<i>Experiment</i>	94
5.9.2	<i>Výsledky</i>	95
5.9.3	<i>Závěr</i>	101
5.10	<i>Měření teplotně namáhaných betonových vzorků, receptura A [A12]</i>	102
5.10.1	<i>Experiment a výsledky</i>	102
5.10.2	<i>Výsledky</i>	103
5.10.3	<i>Závěr</i>	108
5.11	<i>Měření teplotně namáhaných betonových vzorků, receptura B</i>	108
5.11.1	<i>Experiment</i>	108
5.11.2	<i>Výsledky</i>	109
5.11.3	<i>Závěr</i>	115
5.11.4	<i>Srovnání s výsledky měřicí sestavy a klasických metod</i>	115
6	<i>Závěr</i>	118
7	<i>seznam použitých zdrojů</i>	120
8	<i>Seznam použitých zkratk a symbolů</i>	129

1 ÚVOD

Nedestruktivní testování je nedílnou součástí většiny odvětví průmyslu. Tento vědní obor našel uplatnění především ve strojírenství, což je zcela pochopitelné, protože kovy jsou materiály obecně homogenními a izotropními. Fyzikální jevy, na kterých jsou nedestruktivní metody postaveny, jsou proto z velké míry objasněné a výsledky se dají s vysokou přesností interpretovat. Samozřejmě vše záleží na typu nedestruktivní metody. Například ultrazvukové testování je po fyzikální stránce perfektně popsáno, ale i přesto množství dějů odehrávajících se ve stejný okamžik, situaci značně komplikuje [1]. Mnoho vědců zasvětilo svou kariéru pouze modelování za účelem hlubšího pochopení šíření, původu a interakce ultrazvukových vln s defekty. Samozřejmě existují další aspekty: vysoká přesnost, citlivost, inspekční hloubka a rychlost, ale právě porozumění fyzikálním dějům učinilo ultrazvukové testovací metody těmi nejrozšířenějšími.

Na opačné straně spektra nedestruktivního zkušebnictví stojí metody, které se osvědčily v inženýrské praxi, přestože jejich fyzikální principy nejsou zcela přesně popsány. Extrémním příkladem je Barkhausenův šum. Metoda, která je zpochybňována mnoha výzkumníky z oboru. Důvod je prostý. Simulace, která by mohla ověřit spojitost mezi Barkhausenovým šumem a zbytkovým napětím nebo celkové integritě vzorku na atomární úrovni, není proveditelná ani s tím nejlepším superpočítačem. Přesto se Barkhausenův šum začíná hojně uplatňovat v automobilovém průmyslu.

Podobný úděl sdílí i ultrazvukové testovací metody používané ve stavebnictví. Počínaje dřevem se silnou anizotropií v závislosti na orientaci vláken, po kompozitní materiály. Ale i ve stavebnictví nepostradatelný beton je velkou neznámou. Každá složka betonu má jiné vlastnosti, především co se rychlosti šíření zvuku týče. Důvodem je anizotropie, makroskopická nehomogenita, daná velikostí zrn plniva. Velké rozměry zrn způsobují mnohonásobné odrazy, následný útlum signálu, ale také pokles rychlosti v závislosti na vlnové délce [2]. Například v kovech je konvenční ultrazvuková defektoskopie schopna odhalit poruchy materiálu o rozměrech desetin milimetru, ovšem k tomu je zapotřebí vysokofrekvenční signál, který se v betonu téměř okamžitě rozptýlí a utlumí.

Stále rostoucí požadavky na kvalitu stavebních konstrukcí a kontrolu stavu během jejich životního cyklu vede k nepřetržitému vývoji nedestruktivních testovacích metod. Tyto metody mají za účel zjištění materiálových vlastností a strukturálních změn spíše, než detekci a lokalizaci defektu. Vlastnosti zvukových vln šířících se testovaným prostředím jsou měřeny a následně korelovány pomocí empirických vztahů k vlastnostem testovaného materiálu. Často jsou NDT metody označovány jako komparační, protože se výsledky srovnávají s referenčními vzorky se známými poruchami.

I přes veškeré nedostatky jsou nedestruktivní metody ve stavebnictví zcela nepostradatelné. Jak už z názvu vyplývá, vzorky jsou testováním nepoškozeny a mohou být nadále používány, proto je celý obor Monitorování stavu konstrukcí (SHM) založen právě na nedestruktivním testování. Pokud se má plně využít potenciál nedestruktivního zkušebnictví ve stavebnictví, je třeba se zaměřit na vývoj nových metod s lepší interpretovatelností výsledků. Dnešní výpočetní technika a dostupnost elektronických komponentů k tomu vybízí, přesto na trhu jsou přístroje, které se dočkaly minimálních změn za desetiletí své existence. Příklady uplatnění nových testovacích metod se dají najít i v blízkém strojírenském průmyslu. Například metoda fázového pole (Phased Array) je nyní označována jako nástupce klasického ultrazvukového testování. Ovšem stavební materiály jsou nehomogenní kompozity a vývoj zcela nových metod je velmi náročný. Z toho důvodu je vhodnější zaměřit se na vývoj metod, které navážou na současné metody, poskytnou další informace a zpřesní výsledky. Je zcela pochopitelné, že jsou v technické praxi preferované metody používané po desetiletí, pro které byly vytvořeny nespočetné empirické vztahy. Zavádění nových metod je vždy spojeno s rizikem a také je zdlouhavé, než se testovaná metoda rozšíří do obecného povědomí či dosáhne na úroveň standardu. Proto je klíčové novou nebo upravenou metodu porovnat s metodami již osvědčenými s vědomím, že některé nově získané informace nelze zavedenými testy ověřit.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Nedestruktivní metody používané ve stavebnictví

Komplexnost stavebních materiálů vede k velké rozmanitosti defektoskopických metod. Příkladem, na kterém se dá uvést největší množství metod, je beton. Tento kompozitní materiál má vlastnosti natolik unikátní, že je používán již od antiky. Samozřejmě postupem času a s rostoucími zkušenostmi se beton dočkal velkých změn. Dnes dostupné vysokopevnostní betony mají neuvěřitelné pevnosti v tlaku (C 110/150), ale v tahu dosahují jen desetiny tlakových hodnot. Proto se beton doplňuje v oblastech namáhaných tahem ocelovou výztuží s pevností řádově větší (až 600 MPa). Z terminologie biologie se jedná o perfektní příklad symbiózy. Ocelová výztuž přenáší tahová napětí, a tím zabraňuje vzniku trhlin betonu a na druhou stranu zásaditý charakter betonu ochraňuje ocelovou výztuž před korozí. Ovšem i tahle koexistence může být časem ohrožena. Zvýšené namáhání konstrukčních prvků vede k rozvoji trhlin, které mohou mít katastrofické následky, pokud naruší krytí výztuže. V dnešní době je stále aktuálnějším tématem vliv solení dopravních komunikací, protože agresivita prostředí urychluje degradaci betonových prvků a výztuže.

Každá z nedestruktivních metod má za účel zjistit určitý druh defektu a následně zhodnotit celkový stav konstrukce a risk spojený s dalším užíváním. Inženýrská praxe vždy vyžaduje použití minimálně dvou metod k dosažení objektivních výsledků. Vizuální inspekce (VT) je prvním krokem. Ve strojírenství je VT dotaženo ještě o krok dále, ke zkoušení kapilární metodou (PT). Ovšem betonové trhliny jsou totiž řádově větší než ty v kovech a nepotřebují další zvýraznění. Pro hodnocení stavu výztuže a pasivačních schopností betonu se používají elektrochemické metody (Half-cell Electrical Potential), nebo metody na zjištění hloubky karbonatace, testování permeability a rezistivity. Především pro lokalizaci výztuže se používá metoda vířivých proudů (Eddy Current - ET). Radiografické snímky slouží k lokalizaci a měření defektu výztuže. Hustota, vlhkost a hloubka prvku se dá zjistit z útlumu radioaktivního záření. Infračervená termografie a elektromagnetické metody (Ground-penetrating radar) se běžně používají při hledání delaminace u mostních konstrukcí. A nesmíme opomenout tvrdostní zkoušky jako Schmidtovo kladívko nebo více destruktivní Windsor test.

Výše vyjmenované, komerčně dostupné metody pro testování In-situ, mohou být doplněny o experimentální a čistě laboratorní testovací metody s obrovským potenciálem. Například počítačová tomografie, akustická emise, nebo impedanční spektroskopie.

2.2 Akustické nedestruktivní metody

2.2.1 Ultrazvuková pulzní metoda

Název metody napovídá, že testovacím signálem je krátký intenzivní ultrazvukový puls. Kvůli anizotropii stavebních materiálů je rychlost šíření ultrazvukových vln a útlum frekvenčně závislý. Pro testování se obecně preferují signály o vysokých frekvencích, pro jejich lepší rozlišovací schopnost. Na druhou stranu značný útlum ultrazvukového vlnění je způsoben pohlcováním a rozptylem [3] především od zrn kamenina. Proto je vhodné použít signál s vlnovou délkou větší než D_{max} kameniva. Ovšem vliv dispersivity, tudíž vznik tzv. Grupových rychlostí [4], může vést k mylným výsledkům. Masivní stavební prvky jako například hráze, musí být testovány nízkými frekvencemi (20 kHz), ale v běžných případech se používají frekvence 54 kHz nebo 82 kHz.

Analýza je v případě ultrazvukové pulzní metody prováděna zpravidla v časové doméně. To znamená, že se měří doba průchodu ultrazvukového vlnění (TOF). Aby se situace zjednodušila, měří se pouze to nejrychlejší, podélné vlnění. Vlivem mnohonásobných odrazů od stěn vzorku a zrn kamenina se nástup příčných a dalších vln nedá v časové doméně rozlišit [5].

Komerčně rozšířený přístroj využívající ultrazvukovou metodu nese název PUNDIT. Vzorkovací frekvence 10 MHz tohoto přístroje představuje rozlišovací schopnost 0,1 μ s. Ovšem přesnost měření je dána především dokonalostí kontaktu sond a vzorku. Z tohoto důvodu se na obě sondy aplikuje gelový spojovací prostředek (couplant) a za správný se považuje nejkratší naměřený čas. Měření se musí opakovat na několika místech, aby se skutečně měřila ta nejkratší dráha, tj. rozměr prvku. Přítomnost trhlin a pórů dráhu zvětšuje. Metoda obecně není vhodná pro železobetonové prvky. Nevhodně orientovaná výztuž slouží jako vlnovod, protože umožňuje rychlejší šíření akustických vln v betonu.

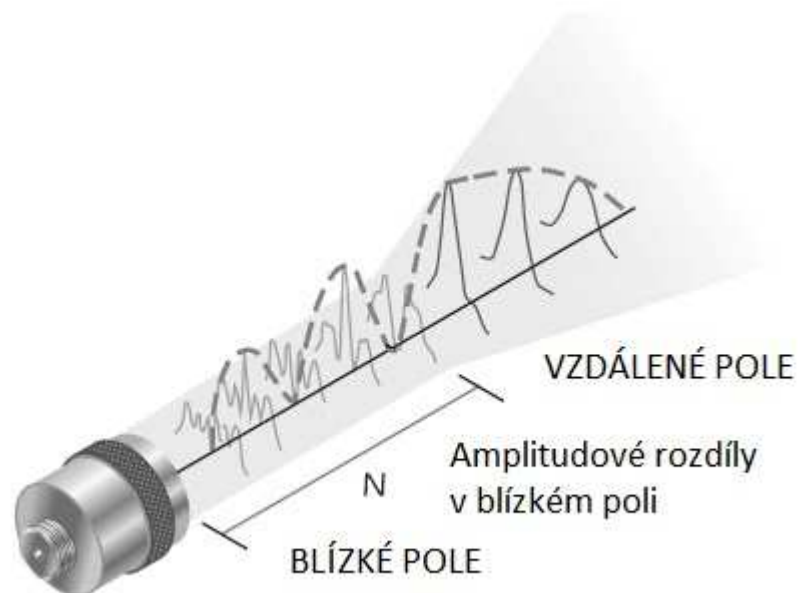
Citlivost obou nesměrovaných (unfocused) sond je dána úhlem rozptylu vlnění (beam spread). Úhel rozptylu α závisí na vlnové délce signálu λ a velikosti budiče D . Intenzita je největší podél osy signálu (beam axis).

$$\alpha = \sin^{-1}(0,514\lambda D) \quad (2.1)$$

Z toho důvodu metodika měření doporučuje umístit sondy na dva kolmé povrchy v jedné linii, takže podélné vlny s největší intenzitou putují nejkratší cestou. Měření „přes roh“ a nebo na stejné straně je také možné, ale vlivem povrchového vlnění (Rayleigh wave) a mnohonásobných odrazů je méně přesné.

Budič by se neměl používat pro měření krátkých vzdáleností, tj. v blízkém poli. V této oblasti kolísá amplituda vlnění vlivem interference. Jak vyplývá ze vztahu 2.2, oblast blízkého pole je řádově menší než velikost testovaných stavebních prvků (pro 82 kHz, $N < 1,1$ cm).

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.2)$$



Obr. 2-1: Fluktuace amplitudy signálu v blízkém poli [6]

Ve strojírenství se provádí inspekce z obou stran prvku, anebo se ubrušuje několik svrchních milimetrů po provedení zkoušky. Multi-frekvenční signál, např. MLS, má v tomto ohledu velký potenciál, protože kompletně eliminuje oblast blízkého pole.

Rychlost podélného vlnění v_L v materiálu se spočítá podle vztahu 2.3, kde L značí délku měřicí základny a T je celkový čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou. Před samotným měřením se provádí kompenzace mrtvého času přístroje na kalibrační tyči se známým časem průchodu (25 μ s). Především vlivem vysokonapěťových pulzů, které jsou nutné k zajištění dostatečně intenzivního signálu, vlastnosti piezoelektrické budiče degradují, a tím se mění mrtvý čas zařízení.

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (2.3)$$

Ultrazvukovou pulzní metodu je možné použít pro zjištění poškození mrazem nebo žářem, pro hodnocení stavu betonu, trvanlivosti, přítomnosti trhlin [7] anebo času odformování [8]. Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu slouží především k posouzení kvality, ale existují i empirické vztahy pro přepočítání rychlosti na pevnost a jiné charakteristiky betonu. Analytické vztahy vychází z harmonické vlnové funkce, rovnice 2.4, předpokládají vzorek homogenní a izotropní, tedy s konstantní hustotou a elastické konstanty nezávislé na směru. Podle Feynmana [9] tlak způsobuje posun a deformaci materiálu. S deformací je spojené napětí σ . Proto se podélné vlnění v angličtině často označuje jako napěťové (Stress Waves). Pro odvození analytických vztahů je nutné uvažovat s lineárně-elastickým materiálem.

$$u(x, t) = u_0 \cos(\omega t - kx) \quad \text{nebo} \quad u(x, t) = u_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.4)$$

Z výše uvedených předpokladů vyplývá, že rychlost podélného vlnění v tenké tyči z ideálního materiálu závisí pouze na hustotě ρ a modulu pružnosti E vztah 2.5.

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.5)$$

Tenká tyč reprezentuje 1D situaci. V případě 3D prvku se musí uvažovat i se změnou rozměru ve směru kolmém na napětí, tzn. s Poissonovým efektem. Výsledný vztah je doplněn o koeficient rozměrovosti k , který popisuje obě situace.

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (2.6)$$

$$\text{Pro 1D: } k_1 = 1 \qquad \text{pro } a \leq 0.2\lambda_L \qquad (2.7)$$

$$\text{Pro 2D: } k_2 = \sqrt{\frac{1}{(1+v_{dyn})-(1-v_{dyn})}} \qquad \text{pro } t > 0.2\lambda_L \qquad (2.8)$$

$$\text{Pro 3D: } k_2 = \sqrt{\frac{1-v_{dyn}}{(1+v_{dyn})-(1-v_{dyn})}} \qquad \text{pro } a, b \geq 2\lambda_L \qquad (2.9)$$

Rozměry prvku a , b kolmé k ose a t rovnoběžné k ose rozhodují, o kolika dimenzionální situaci se jedná [10]. Objemová hmotnost ρ_v , E_{cr} značí dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku, ν_{dyn} je dynamické Poissonovo číslo. Ultrazvukové vlny vyvolávají ve vzorku nepatrné deformace o velikosti přibližně několika jednotek pascalu, takže nevznikají mikrotrhliny a nenastává dotvarování, které je jinak zahrnuto v sečném statickém modulu pružnosti. Dynamický modul pružnosti je podstatně vyšší než statický a odpovídá počátečnímu tečnému modulu.

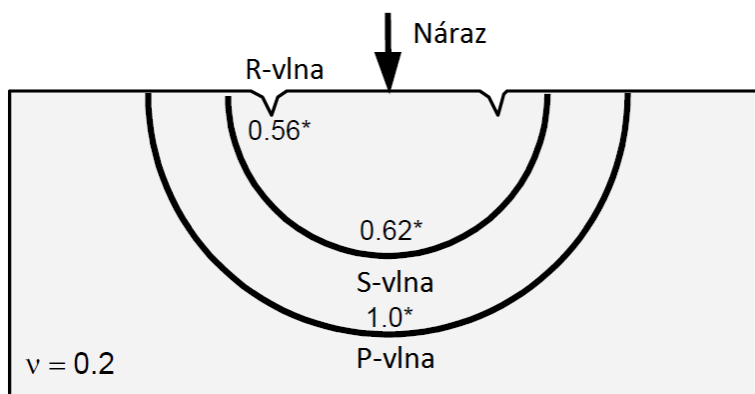


Obr. 2-2: Komerčně používané ultrazvukové pulzní testovací zařízení PUNDIT

2.2.2 Kladívková rezonanční metoda

Opravdový počátek kladívkové rezonanční metody se dá historicky jen stěží určit, protože je to metoda, kterou lidé používají od dob prvních keramických výrobků. Jednoduchý princip metody spočívá v poklepání na čerstvě vypálený keramický výrobek a poslechu zvuku, který vydává. Lidé věděli, jak zní výrobek bez interních vad, jako jsou praskliny, a tak zvukem posuzovali kvalitu výrobku. Z fyzikálního hlediska

dopad kladívka na testovaný materiál vytvoří různé druhy vln, které putují vzorkem s různou rychlostí (obr. 2-3) a odrážejí se od stěn a defektů. Odraz signálu na hranici materiálu je dán řádově odlišnou akustickou impedancí pevných látek a vzduchu (tab. 2-1). Pro představu jen 2×10^{-5} % signálu překoná hranici beton – vzduch. Praskliny jsou zpravidla vyplněny vzduchem, proto mají stejné odrazové vlastnosti jako stěny prvku.

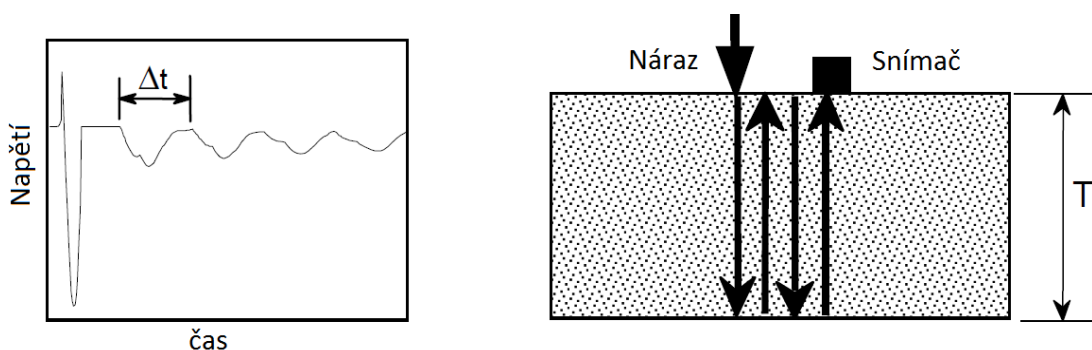


*číslo udává relativní rychlost

Obr. 2-3: Relativní rychlost šíření vln v betonu [11]

Tab. 2-1: Specifická akustická Impedance [11]

Materiál	Specifická akustická Impedance [kg/(m ² s)]
Vzduch	0,4
Voda	$0,4 \times 10^6$
Beton	$7 \text{ až } 10 \times 10^6$
Ocel	47×10^6



Obr. 2-4: Vlevo časový signál, vpravo testovací sestava IE [11]

Ultrazvukové vlny se stihnou několikrát odrazit od stěn vzorku, než jsou utlumeny pod hranici měřitelnosti, což se projeví jak v časové, tak ve frekvenční doméně (obr. 2-4), (rov. 2-10).

$$\Delta t = \frac{v_l}{2T} \qquad f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v_l}{2T} \qquad (2.10)$$

V časové doméně, (obr. 2-4 vlevo), se délka periody Δt určuje obtížně, protože amplituda odražených podélných vln je vlivem útlumu na delší dráze podstatně menší než amplituda povrchové vlny. Vhodnější je proto analýza frekvenčního spektra signálu. Zde se objeví frekvenční píky odpovídající rychlosti a dráze, kterou signál urazí, nejčastěji podélnému rozměru vzorku. Rayleighovy povrchové vlny dorazí k přijímači pouze jednou, než jsou zcela utlumeny, a proto je možné šum od povrchové vlny ze signálu odfiltrout pásmovou propustí.

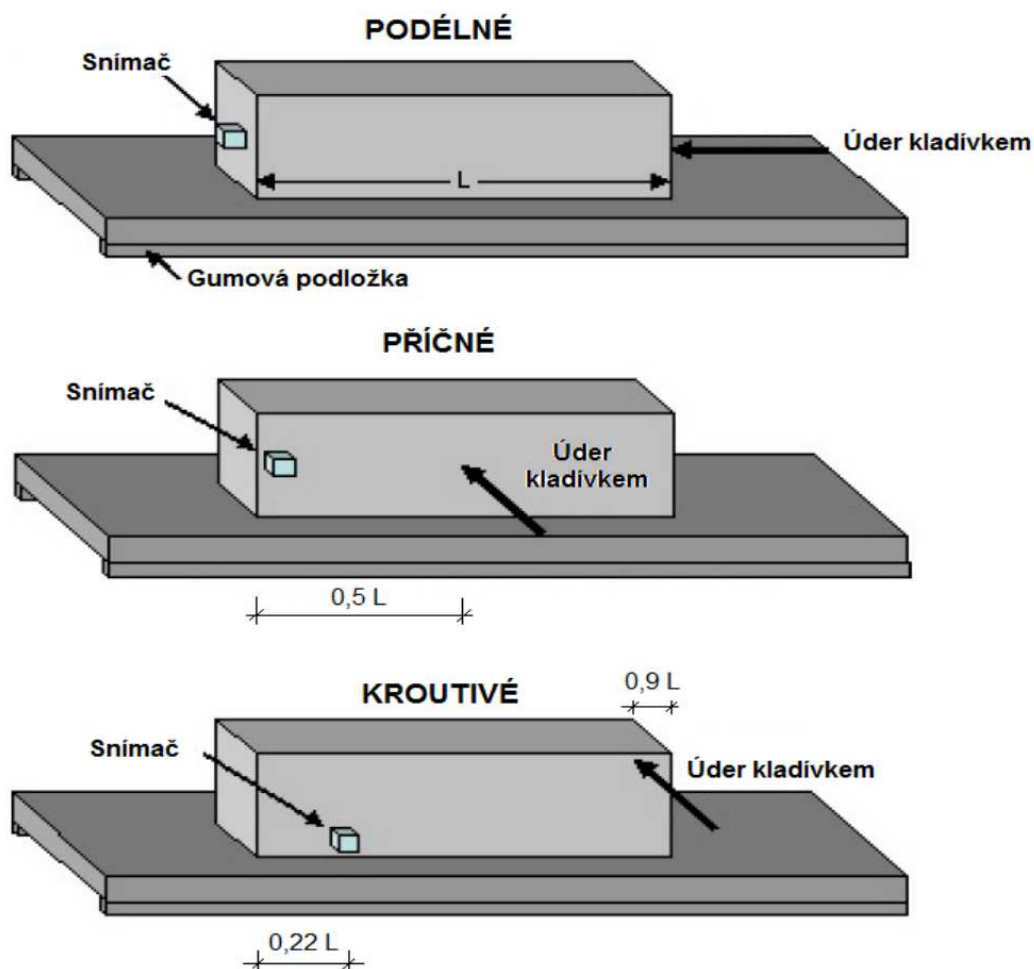
Signál, který vznikne nárazem kladívka na povrch testovaného vzorku, obsahuje velké množství frekvencí. V případě, že by byl puls nekonečně krátký, pak se může považovat za δ -funkci, tj. za signál s plochým frekvenčním spektrem. Samozřejmě tato podmínka nemůže být splněna při reálném testování. Maximální frekvence generovaná nárazem je nepřímo úměrná k délce pulsu, což je v případě metody IE doba kontaktu kladívka se vzorkem. V kapitole 2.3 vliv délky pulzu podrobněji vysvětlen.

Doba kontaktu kladívka vzorku je naprosto kritická pro úspěšnost testu. Budící signál musí obsahovat frekvenční složku odpovídající vlastní frekvenci vzorku. Z tohoto pohledu je vhodné použít kladívko o malé hmotnosti, protože délka kontaktu roste s hmotností kladívka. Na druhou stranu, kladívko o nízké hmotnosti má menší kinetickou energii, tudíž vyvolá slabý signál s nízkým odstupem od šumu (SNR). S hmotností kladívka se začalo uvažovat až při využití moderních digitálních technologií, které mají v současné době limit v řádech THz. Přestože lidský sluch vnímá pouze nízké frekvence (do cca 20 kHz), dokáže snadno odhalit frekvenční disharmonie, které jsou defekty vytvářeny. Pro úplnost, není podmínkou, aby budícím prvkem bylo kladívko, může se požit dopadu kapek [12], nebo výstřelu [13].

Kladívková rezonanční metoda v dnešní době nachází uplatnění především pro laboratorní komparační měření, což je dáno nutností uniformních rozměrů vzorku. Využívá se při sledování namáhání zvýšenou teplotou, mrazem a jinými degradačními procesy, ale také je komerčně využívána v plně automatizovaných stanicích pro

testování brzdových kotoučů automobilů. Pro měření hloubky stavebních prvků, rychlosti podélných vln a detekce defektů se používá kladívková metoda impact-echo (IE). V měřicí sestavě IE (obr. 2-4 vpravo) je piezoelektrický přijímač umístěný na stejné straně vzorku, poblíž nárazu. Pro měření hloubky povrchových trhlin se používá sestava se dvěma čidly, jedno na každé straně trhliny (TOFD).

Obdobným způsobem jako u ultrazvukové metody je ze změřené vlastní frekvence a délky vzorku možné spočítat rychlost šíření podélných vln a dynamický modul pružnosti [14-15]. Navíc v závislosti na pozici úderu a snímače je možné analytickými a poloempirickými vztahy spočítat dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku při podélném E_{crL} nebo příčném kmitání E_{crf} , ale také dynamický modul pružnosti ve smyku G_r .



Obr. 2-5: Různé konfigurace pro měření dynamického modulu pružnosti kladívkovou rezonanční metodou [6]

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (2.11)$$

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (2.12)$$

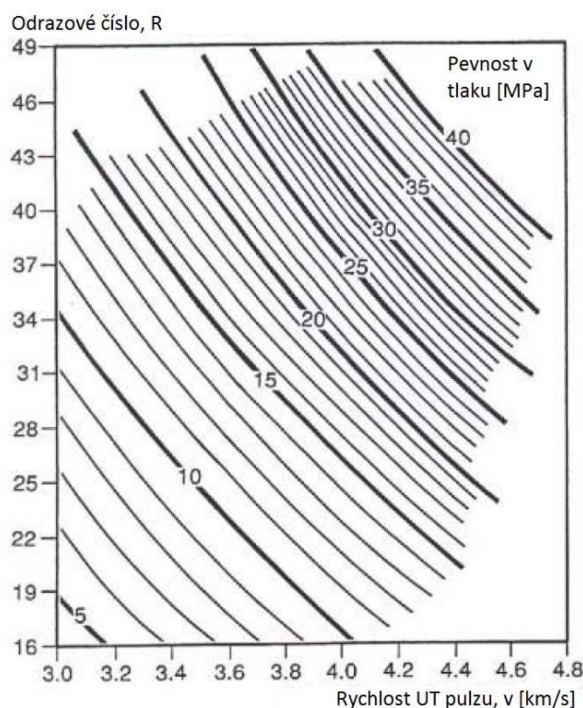
$$G_r = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_f^2 \cdot \rho \quad (2.13)$$

Kde c_1 je korekční součinitel zahrnující vliv smyku a momentů setrvačnosti. Pro hranol s poměrem stran 1:1:4 a $v = 0,2$ platí $c_1 = 1,426$. Poloměr setrvačnosti pro hranol je $i = \frac{a}{\sqrt{12}}$. Součinitel $k = 1,183$ pro hranol a charakterizuje tvar příčného řezu.

2.2.3 Pevnost odvozená z odrazového čísla a rychlosti UZ vln

Odrazové číslo získané Schmidovým tvrdoměrem má velkou vypovídací hodnotu o pevnosti betonu v tlaku, ale pouze za předpokladu, že je známo složení. Chyba odhadu pevnosti na základě obecných vztahů pro dané složení se pohybuje v rozmezí 15 až 20 % [16]. V případě známých pevností získaných z jádrového vzorku mají korelační vztahy menší chybu, a to 10 až 14 % [16].

Odrazovým tvrdoměrem se testuje pouze povrchová vrstva vzorku, na druhou stranu rychlost šíření ultrazvukových vln nese informaci o průměrném stavu celého vzorku. Proto je vhodné výsledky obou metod spojit, a tím eliminovat nekontrolovatelné proměnné.

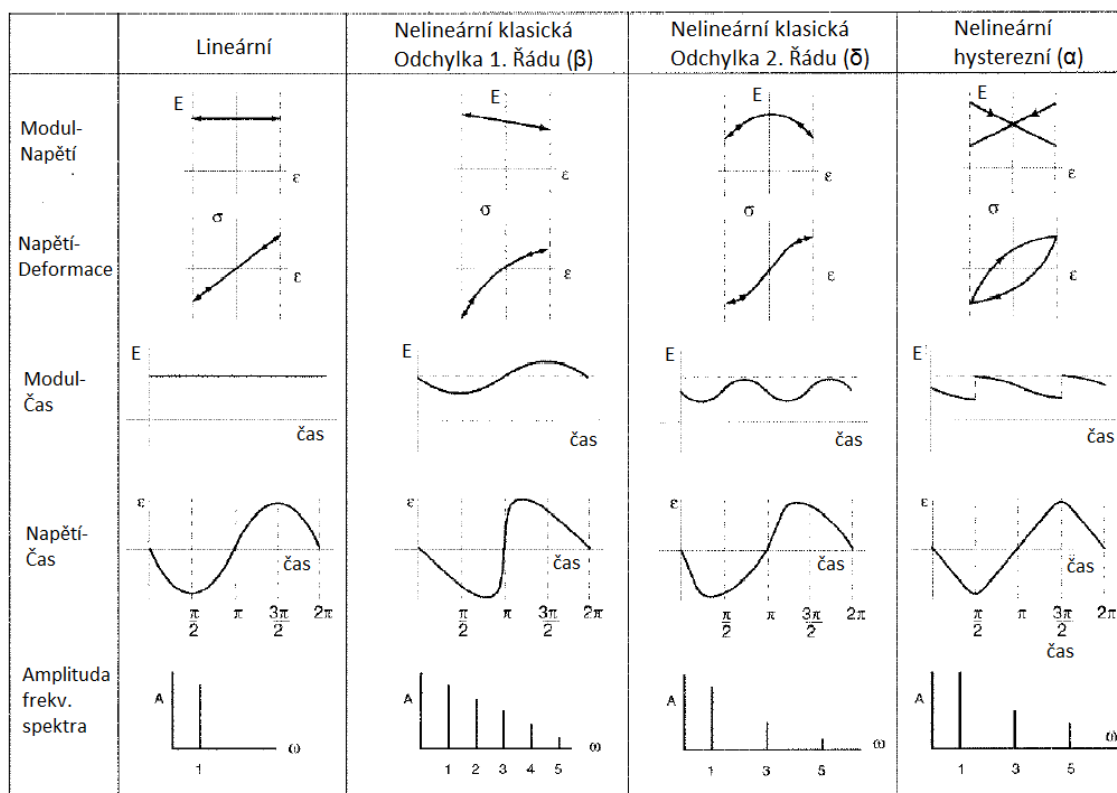


Graf 2-1: Pevnostní křivky pro referenční betonový vzorek. Metoda SONREB [16]

2.2.4 Nelineární ultrazvuková spektroskopie

Lineární posun rezonanční frekvence, kvadratická závislost amplitudy třetí harmonické frekvence, lineární zvýšení útlumu se zvyšující se úrovni buzení jsou typicky pozorovány u mezoskopických hysterezních materiálů. Jedná se o interakci na atomární úrovni, až do řádu nanometrů. Nelinearita se projevuje i jako vznik nových harmonických frekvencí, nebo vznik součtových a rozdílových frekvencí při interakčním buzení dvěma frekvencemi.

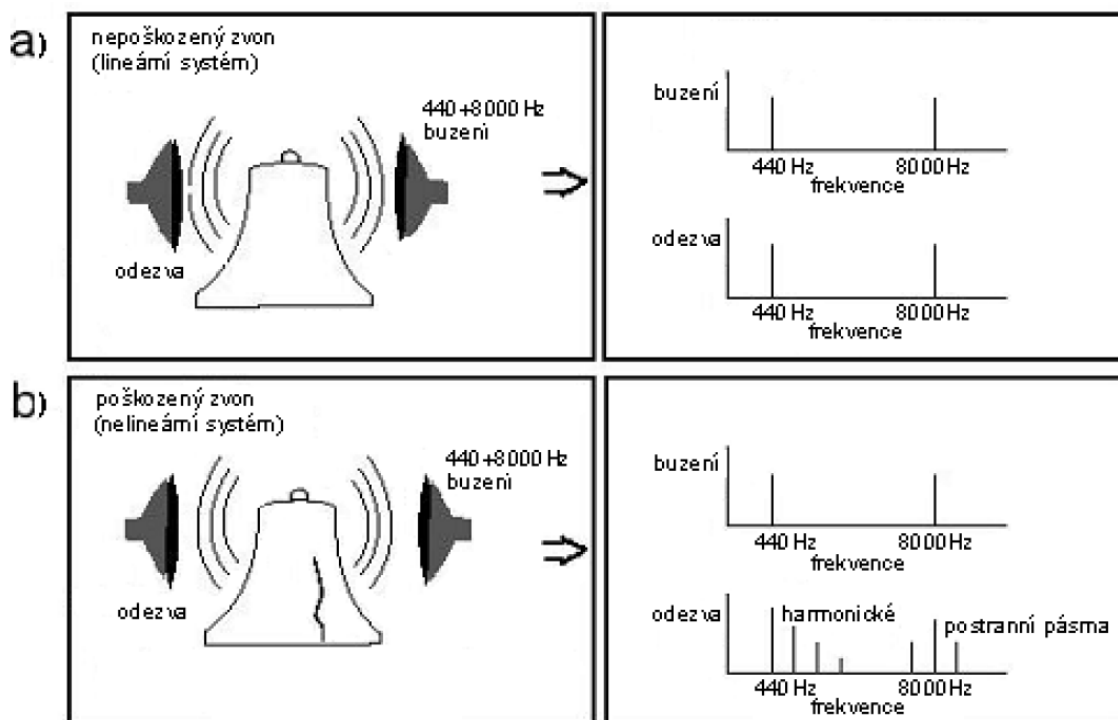
Z různých statických a dynamických experimentů je známo, že materiály obsahující mikrotrhliny nelze popsat pomocí lineární teorie popsané v předchozí kapitole. Popraskaný materiál se stane vysoce nelineárním, a/nebo vykazuje hysterezi a zpožděnou časovou paměť vztahu napětí – deformace. Nelineární parametry jsou velmi citlivé na přítomnost nehomogenit materiálu, tj. přítomnost a rozvoj mikrotrhlin, obsah pórů atd. Na obrázku 2-6 jsou vyobrazeny pracovní diagramy systému s různými druhy nelinearit a jejich vliv na mono-frekvenční signál.



Obr. 2-6: Schematický přehled vlivu nelinearit na monofrekvenční vlnu šířící se v jednodimenzionálním prostředí [17]

Nelineární ultrazvuková spektroskopie je kontrastem k rezonanční kladívkové metodě. U obou metod je sice sledováno frekvenční spektrum, ale budící signál je záměrně minimalizován, aby byl zachován předpoklad lineárně časově neměnného systému (LTI) a tím i platnost vztahů pro výpočet dynamických modulů pružnosti. Na druhou stranu nelineární ultrazvuková spektroskopie vyžaduje zpravidla signál s maximální amplitudou, aby se mohly projevit dynamické nelinearity.

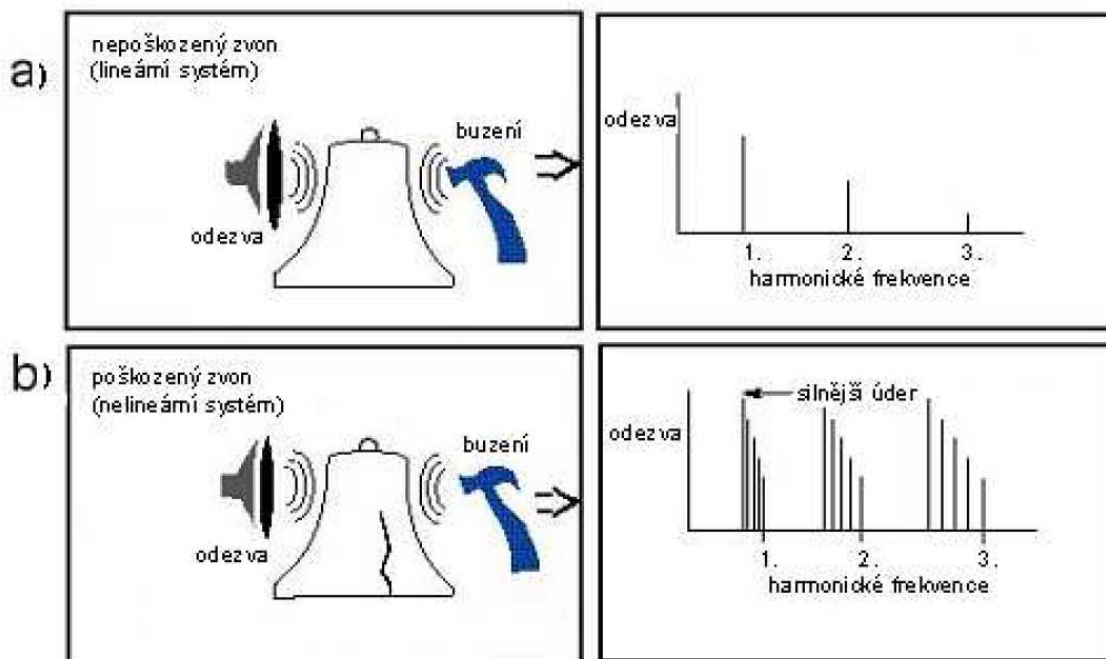
Jedna z metod ze skupiny nelineární ultrazvukové spektroskopie NEWS využívá dvoufrekvenční buzení. První frekvence je relativně nízká (řád 100 Hz) a druhá frekvence odpovídá rezonanční frekvenci budiče. Samozřejmě rezonanční frekvence systému se připevněním budiče ke vzorku změní. Přesto má signál dostatečnou amplitudu k tomu, aby ve vzorku vyvolalo napětí a potažmo i nelineární výchylky. Ve frekvenčním spektru se nelinearity projeví jako součtová a rozdílová postranní pásma, často i s jejich harmonickými násobky (obr. 2-7). Vhodně zvolenými pásmovými propustmi se odstraní intenzivní budící signál a nelineární složky jsou lehce pozorovatelné i na měřicí technice s nízkou rozlišovací schopností.



Obr. 2-7: Buzení dvěma frekvencemi a) nepoškozeného, b) poškozeného zvonu [18]

V úvodu byl zmíněn posun základních a vyšších harmonických frekvencí vlivem nelinearit [19]. Metoda je výstižně představena na obrázku 2-8, kde je intenzita signálu dána silou úderu kladivem. Zatímco u nepoškozeného vzorku jsou veškeré vlastní

frekvence nezávislé na intenzitě signálu, u poškozeného vzorku se s rostoucím signálem frekvence posouvají k nižším hodnotám. Budící signál musí obsahovat minimálně všechny vlastní frekvence vzorku, což splňuje nejen nárazové buzení kladívkem, ale i například MLS. Navíc je vhodné znát i intenzitu budícího signálu, což je při buzení kladívkem obtížněji proveditelné (přídavný akcelerometr na kladívků).



Obr. 2-8: Vliv nelinearit na frekvenční odezvu a) nepoškozeného, b) poškozeného zvonu [18]

Závažnost nelinearit je možné objektivně hodnotit pomocí α parametru [20].

$$\alpha = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (2.14)$$

kde f rezonanční frekvence naměřená při maximálních oscilacích a f_0 je rezonanční frekvence měřená při minimálních oscilacích [21].

2.3 Signál v časové a frekvenční doméně

Akustické nedestruktivní metody využívají různé typy perturbačních signálů za účelem zjištění materiálových vlastností, nebo lokalizace a měření defektů. U starších metod převažuje analýza signálu pouze v časové doméně, což je dáno výpočtovou náročností převodu signálu do frekvenční oblasti. Nejčastěji používaným algoritmem je Cooley-Turkey pro rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Jedná se o efektivní způsob

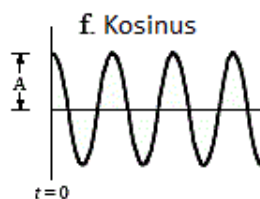
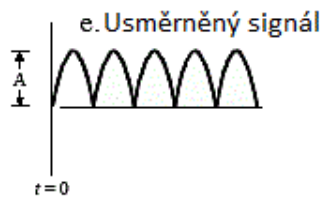
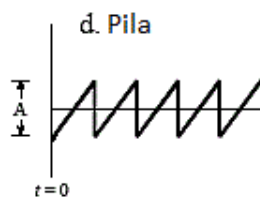
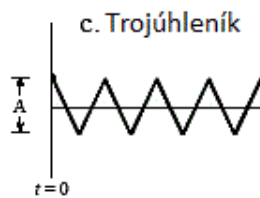
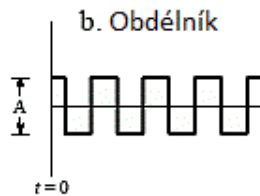
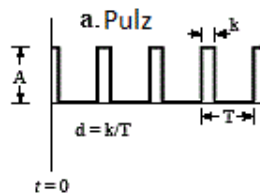
rozložení libovolného signálu na harmonické složky s fázovým posunem. Na podobném algoritmu je založena i krátko-časová Fourierova transformace (STFT), která umožňuje sledovat změnu frekvenčního spektra v čase. STFT má smysl pouze u dlouhého signálu [22], protože rozlišení ve frekvenční oblasti je dáno počtem vzorků v časové oblasti. Lepších výsledků se dosáhne vzorkováním s několikrát větší frekvencí, než která je v signálu očekávána (Multisampling nebo Oversampling). Ve spojení se Sekvencí maximální délky (MLS) je často zmiňována Rychlá Walsh-Hadamard transformace (WHT). Algoritmus, speciálně navržen pro zpracování obdélníkového signálu, je několikanásobně rychlejší než FFT. Ovšem rychlá Fourierova transformace pro vhodně zvolenou délku signálu trvá řádově desetiny sekundy i na běžných kancelářských počítačích, proto se v praxi od WHT opouští.

Výsledkem FFT řady reálných čísel, tj. akustického signálu, je řada komplexních čísel, které se mohou polárně interpretovat jako fáze (úhel vektoru) a amplituda (délka vektoru) v závislosti na frekvenci. Velké množství harmonických složek akustického signálu ztěžuje interpretaci z grafu fází, proto se upřednostňuje amplitudový graf. V některých případech je nutné před transformací signál vynásobit tzv. okny (window), čímž se redukuje rozptyl harmonických složek (Spectral Leakage). Pro kompletnost, algoritmus FFT předpokládá periodicky se opakující signál, proto je transformace pulzních nebo tlumených signálů nedokonalá.

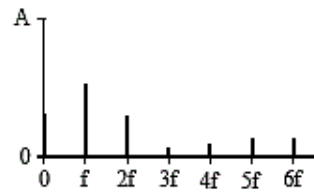
Na obrázku 2-9 jsou znázorněny různé periodické signály v časové a frekvenční doméně. Fourierovou transformací kosinového signálu dostaneme mono-frekvenční spektrum f). Transformací obdélníkového signálu dostaneme stejnou základní frekvenci f a zmenšující se liché harmonické frekvence b).

Na obrázku 2-10 je znázorněno frekvenční spektrum v závislosti na délce jednoho pulzu. Pokud budeme uvažovat nekonečně krátký puls, jedná se o diskrétní případ Diracovy δ -funkce, pak Fourierovou transformací získáme ploché frekvenční spektrum. Reálný pulz konečné délky má obálku frekvenčního spektra opisujícího funkci sinc^2 s minimy odpovídajícími celočíselným násobkům $1/\Delta t$. Protože reálné spektrum není rovné, pro testování se používá pouze jeho počáteční část, než signál klesne na polovinu maximální hodnoty (-6 dB). Na druhou stranu kratší pulz má nižší amplitudu (obr. 2-10).

Časová oblast



Frekvenční oblast

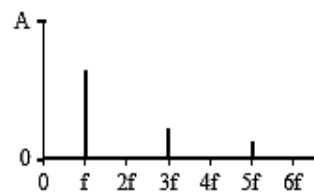


$$a_0 = A d$$

$$a_n = \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi d)$$

$$b_n = 0$$

($d = 0,27$ pro tento případ)

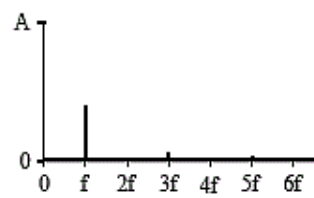


$$a_0 = 0$$

$$a_n = \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

$$b_n = 0$$

(všechny liché harmonické jsou nula)

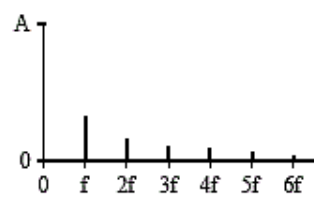


$$a_0 = 0$$

$$a_n = \frac{4A}{(n\pi)^2}$$

$$b_n = 0$$

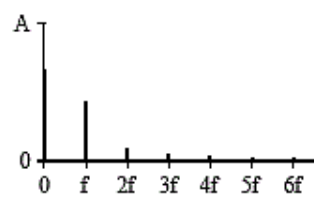
(všechny liché harmonické jsou nula)



$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0$$

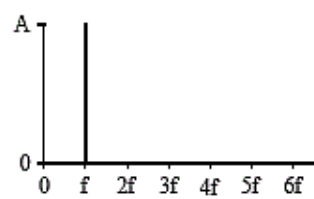
$$b_n = \frac{A}{n\pi}$$



$$a_0 = 2A/\pi$$

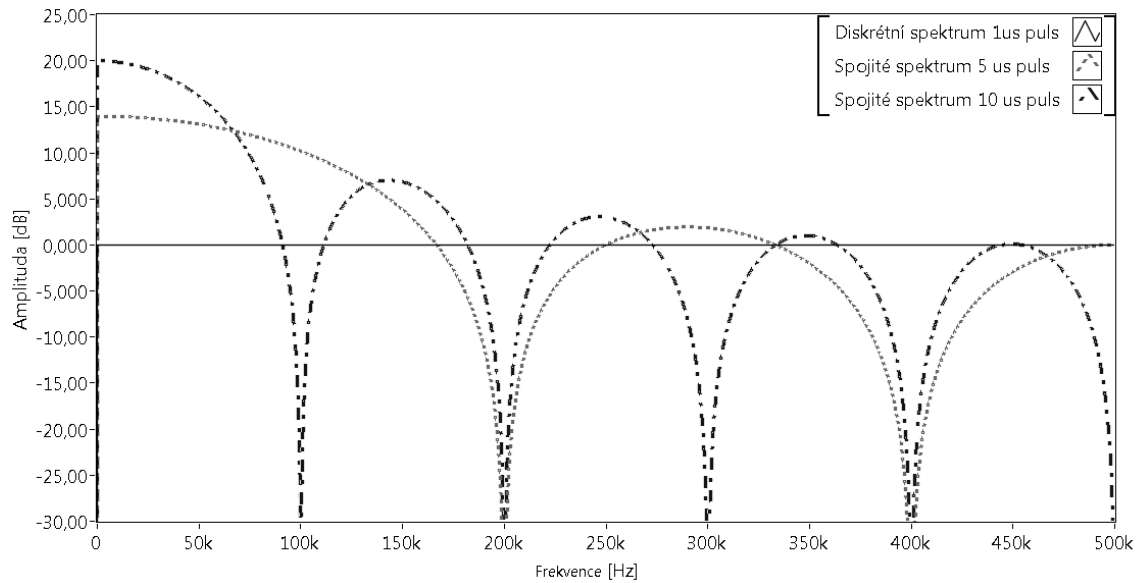
$$a_n = \frac{-4A}{\pi(4n^2 - 1)}$$

$$b_n = 0$$



$$a_1 = A$$

Obr. 2-9: Amplituda harmonických složek základních periodických funkcí [23]



Graf 2-2: Fourierova transformace neopakujícího se pulzu. Diskrétního spektra je dosaženo, je-li vzorkovací čas identický s délkou pulzu

2.4 Vliv vysokých teplot na běžné cementové betony

Schopnost odolávat vysokým teplotám a přitom si udržet svoji původní funkci je v určité míře požadována po každé železobetonové konstrukci vystavené riziku požáru. Působením vysokých teplot se v betonech odehrávají komplexní procesy, které ovlivňují jeho materiálové vlastnosti. Faktory, které ovlivňují odolnost betonu, jsou:

- složení (vodní součinitel, typ cementu a kameniva, ...);
- hutnost a homogenita
- intenzita a délka teplotního zatížení

Teplotním namáháním dochází v betonech k nevratným změnám, které mají za následek pokles pevností (v tlaku i v tahu). Zatímco poměr cementu a kameniva se výrazně podílí na ztrátě pevnosti, vodní součinitel má na původní pevnost vliv jen zanedbatelný. Obecně platí, že betony s vyšším obsahem cementu ztrácejí pevnost rychleji, než ty s menším obsahem cementu [24].

Vedle destruktivního zkoušení pevnosti teplotně zatížených vzorků se provádí i nedestruktivní testování za účelem zjištění dynamického modulu pružnosti. Ten je

nejvíce ovlivněný druhem kameniva. Například fázové přeměny křemičitého kameniva mají velmi negativní vliv na modulu pružnosti, na rozdíl od lehkého kameniva.

Zcela zásadním faktorem je vlhkost betonu. Zahříváním dochází k odparu vody, která nemá kam unikát, a nahromaděný tlak způsobí odprýsknutí svrchní vrstvy betonu. Tento jev je nejmarkantnější u betonů s nízkým vodním součinitelem, protože mají spíše uzavřenou mikrostrukturu a pára obtížněji uniká. Z důvodu eliminace odprýskávání se laboratorní testování provádí na důkladně vysušených vzorcích a při kontrolovaném nárůstu teplot.

Tab. 2-2: Přehled změn, mikrostruktury betonu při zahřívání [25]

Teplota [°C]	Změny v mikrostrukturu betonu
20 – 200	<i>Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti 80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu 150 °C – 170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Počátek dehydratace CSH gelu Ztráta fyzikálně vázané vody</i>
300 – 400	<i>Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody</i>
400 – 500	<i>Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$</i>
500 – 600	<i>573 °C – Přeměna křemene z fáze β na α</i>
600 – 800	<i>Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba β-C_2S</i>
800 – 1 000	<i>840 °C – rozklad dolomitického vápence 870 °C – Přeměna křemene z fáze α na b-trydimit 930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, uvolňováním oxidu uhličitého</i>
1000 – 1200	<i>Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) 1050 °C – tavení čediče</i>
1 300	<i>Celkový rozklad betonu, tavení některých složek</i>

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním tématem disertační práce je vytvoření ultrazvukové testovací metody založené na sekvenci maximální délky. Unikátní vlastnosti MLS signálu umožňují v jedné testovací sestavě zjištění několika proměnných, charakterizujících akustické materiálové vlastnosti, které by se jinak musely testovat samostatně. Cíle disertace lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Teoretické studium pulzní komprese signálů a jejich využití pro nedestruktivní testování
- 2) Návrh a výroba vlastního silového zesilovače testovacího signálu
- 3) Vytvoření metodiky pro měření a získání impulzní odezvy systému ze zachyceného systému. Vyhodnocení dat v časové i frekvenční oblasti. Metodika umožňuje určit čas průchodu (obdoba Ultrazvukové pulzní metody), frekvenční analýzu (obdoba kladívkové rezonanční metody) a nelineární parametry (obdoba NEWS).
- 4) Sestavení jednotlivých bloků měřicího zařízení
- 5) Návrh a následná realizace plně automatizovaného pracoviště pro kontinuální záznam, zpracování a vyhodnocení signálu, vývoj softwarového balíku s uživatelsky přívětivým rozhraním
- 6) Zjištění charakteristik dostupných piezobudičů a výběr toho nejvhodnějšího pro testování signálem MLS
- 7) Výběr vhodné sekvence maximální délky pro testování. Je známo, že některé sekvence jsou méně citlivé na nelinearity. Volbou vhodné sekvence bude dosaženo přesnějšího určení lineárně-časově-neměnného systému a minimalizace nelinearit daných měřicí sestavou.
- 8) Studium vlivu různých druhů vazby budiče a snímače se vzorkem, posouzení možnosti bezkontaktního testování
- 9) Určení přenosové funkce samotného vzorku
- 10) Výběr vzorků, na kterém budou naměřená data srovnána s akustickými NDT metodami: ultrazvuková pulzní metoda, kladívková rezonanční metoda a destruktivní zkoušky pevnosti

Navržená metoda bude umožňovat rychlé integrální nedestruktivní testování kvality stavebních materiálů. Spojením několika NDT metod do jedné se dá předpokládat vyšší popularita ultrazvukového testování. Unikátní vlastnosti MLS signálu umožní testovat masivní prvky a prvky s velkým útlumem ultrazvukových vln s minimálními náklady na hardwarové komponenty. Předpokládá se i přesnější určení rychlosti ultrazvukových vln v materiálu.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Zkoušení ultrazvukem je populární technikou pro nedestruktivní testování pevných látek. V závislosti na metodě mohou ultrazvukové vlny šířící se v testovaném médiu odhalit poruchy nebo mechanické vlastnosti [A1]. V konvenční ultrazvukové defektoskopii jsou nemodulované pulzní signály vytvořeny piezoelektrickým budičem. Amplituda šokového pulzu často dosahuje několika stovek voltů, aby vadové echo bylo rozlišitelné od šumu [26]. Z toho důvodu konvenční ultrazvukové metody pracují na hranicích fyzických možností generátoru, budiče a testovaného vzorku. To se projevuje na zkrácené životnosti piezoelektrických budičů a nutnosti časté kalibrace.

Konvenční UT je dostatečná pro kovy, avšak NDT praxe vyžaduje i testování materiálů s vysokým útlumem. Například populární metoda impact-echo poskytuje užitečné informace pouze pro nízké frekvence (do 80 kHz), poté je signál ztracen v šumu.

Jediný způsob, jak překonat obtíže útlumu a zlepšit poměr signálu k šumu (SNR), je použít signál, který může přenést více energie do vzorku. Proto se v posledních letech rozvíjí techniky založené na pulzní kompresi signálů. V takových aplikacích kódovaný signál $x(t)$ s autokorelační funkcí podobnou Diracově δ -funkci vybudí testovaný LTI systém. Impulzní odezvy $h(t)$, nesoucí všechny charakteristiky systému LTI, jsou následně získány pomocí křížové korelace výstupního signálu $y(t)$ se vstupním signálem $x(t)$.

Vysoké energetické úrovně vložené do systému kódovanými signály poskytují zásadní zlepšení SNR a zároveň umožňují testování bez „vazebních prvků“ (couplants). Vzhledem k tomu, že akustická impedance vzduchu je mnohem nižší než v pevných látkách a ultrazvukový útlum ve vzduchu je mnohem větší než je ve vodě nebo gelu, signály s vysokou energií jsou jedinou možností pro testování přes vzduch (Air Coupling) [27-29].

4.1 Použití MLS v NDT

Během posledních několika desetiletí byly navrženy pulzně-kompresní techniky pro použití v oboru NDT. Většina z nich získává impulzní odezvu systému pomocí „Chirp“ signálů s neperiodickou autokorelací. Nicméně využívají se i pseudonáhodné posloupnosti s cyklickou autokorelací. Výsledkem těchto snah je eliminace kvantizačního šumu na straně generátoru, zlepšení SNR, snížení nákladů na hardware a snížení vlivu nelinearit.

V roce 1979 Schroeder definoval matematickou binární sekvenci maximální délky (MLS) s unikátními vlastnostmi. Krátce po tom, v roce 1982, představili Eysholdt a Schreiner nevídanou metodu získávání jednotlivých přechodových odezev při vysokých stimulačních rychlostech. Ve stejném roce Lam a Hui navrhli použít MLS v oblasti NDT [30-31]. Odtud MLS našla mnoho aplikací. V akustice prostoru se využívá pro měření dozvuku a ultrazvukových absorpčních koeficientů stavebních materiálů [32-33]. V oblasti elektrotechniky se jí testují výkonové spínané zdroje [34], anebo se jí získávají přenosové funkce analogových filtrů [35]. MLS se používá k ověření pracovních charakteristik piezoelektrických senzorů [36]. V impedanční spektroskopii se MLS signál používá pro rychlé měření v celém frekvenčním spektru [37], anebo při třídění kovových slitin [38].

Nedávno bylo v technické literatuře představeno extrémně přesné měření vzdálenosti ve vodě. Hrubé zpoždění signálu se určilo pomocí korelace a následně se hodnota zpřesnila z fázového posunu frekvenčních složek [39]. Techniky založené na korelaci signálu MLS mají potenciál dosáhnout vyšší přesnosti a eliminovat problém mnohonásobných odrazů, které snižují přesnost konvenčních pulzních metod.

4.2 Binární testovací signál

Binární signály vyžadují generátor/zesilovač s pouze dvěma úrovněmi napětí, na rozdíl od „Chirp“ signálu, „Tone bursts“ nebo bílých šumů, které potřebují digitální analogový převodník (D/A). Převodník spolu se zesilovačem jsou nejdražšími komponenty a zároveň zdroji kvantizačního šumu. Binární signál je možné snadno zesílit do velkých amplitud (až +1,2 kV) a zkratem téměř okamžitě vybit piezoelektrický měnič [26]. Kvůli špatným mechanickým vlastnostem piezokeramiky v tahu jsou ty nejvýkonnější měniče typu Langevin trvale stlačeny šroubem. Pro velké výkony je totiž

buzení klasickým signálem se střídavou polaritou zcela nevhodné. Navíc je často jeden z kontaktu budiče přímo v kontaktu s testovaným vzorkem. Pokud by se jednalo o elektricky vodivý materiál, střídavá polarita by ovlivňovala snímací část nebo ji dokonce mohla zničit.

Existuje mnoho druhů perturbačních signálů s fixním spektrem. Nicméně pouze MLS má vlastnost „shift-and-multiply“ (za předpokladu, že úrovně signálu jsou ± 1). Sekvence s autokorelací totožnou s MLS jsou: „quadratic residue binary“ (QRB), „Hall binary“ (HAB) a „Twin Prime binary“ (TPB). Všechny jmenované sekvence mají rovné frekvenční spektrum, kromě celočíselných násobků délky sekvence N . Sekvence nemají harmonické potlačení [40-41].

Poslední binární signál, který je podstatný v souvislosti s MLS je inverzně opakovaná sekvence (IRS). Sekvence je generována obrácením hodnot a vložením zpět do původní sekvence. Z toho vyplývá dvojnásobná délka řady, uniformní spektrum v lichých harmonických frekvencích (s výjimkou celočíselných násobků N) a s nulou v sudých harmonických frekvencích [42].

4.3 Perturbační signál: sekvence maximální délky

Vhodnost testovacího signálu závisí na mnoha faktorech. Iterační metody dokáží přesně odhadnout frekvenční odezvu lineárního systému skrytého pod nelinearitami. Avšak iterační metody striktně vyžadují, aby byly fáze mnohofrekvenčního signálu náhodně rozloženy. Tento požadavek je platný pouze v případě bílého šumu, nebo pseudonáhodných sekvencí, jako MLS [35].

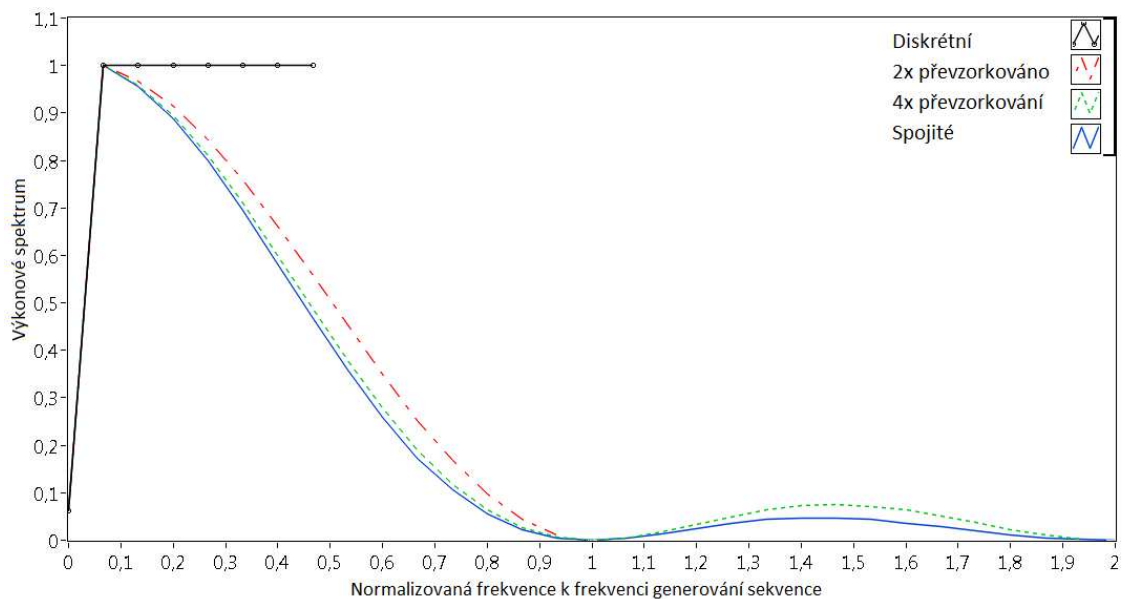
Pro zjednodušení se v NDT praxi většinou uvažuje LTI systémem, což je rozumný předpoklad, protože nelinearity se projevují u vyšších signálových amplitud. Proto by ideální perturbační signál měl mít minimální činitel výkyvu (crest faktor) a zároveň maximální výkonové spektrum v testované oblasti. Tím se dosáhne zlepšení SNR a sníží se projevy nelinearit.

Činitel výkyvu roven 1, dobře definované výkonové spektrum a vynikající korelační vlastnosti činí MLS vhodným signálem pro NDT. Nicméně pokud se zvolí jako testovací signál sekvence maximální délky, musí být splněno několik požadavků. Perioda sekvence N musí být delší než doba ustálení systému, jinými slovy, délka

očekávané IR). Tato podmínka zabrání časovému aliasingu a je vyjádřena rovnicí 4.15, kde n odpovídá počtu bitů posuvného registru.

$$N = 2^n - 1 \geq f_{gn} \cdot T \quad (4.15)$$

Druhý požadavek se týká frekvence generování signálu. V technické literatuře je výkonové spektrum MLS často nesprávně považováno za diskrétní, tudíž ploché. V reálném použití se vzorkovací frekvence f_s liší od frekvence generace f_{gn} . Obálka výkonového spektra po převzorkování má tvar funkce Sinc^2 , tzn. klesá k nule v místech odpovídajících celočíselným násobkům f_{gn} (viditelné v bodech 1 a 2 na grafu 4-3). Energie MLS je jasně rozložena přes harmonické frekvence neuniformním způsobem. Dále je na grafu 4-3 viditelné, že délka frekvenčního spektra se zvyšuje s vyšší frekvencí vzorkování, což je zcela v souladu s Nyquistovým teorémem: maximální pozorovatelná frekvence je rovna polovině vzorkovací frekvence. MLS může být vzorkována vyšší frekvencí za předpokladu, že je podíl f_s/f_{gn} celé číslo.



Graf 4-3: Vliv poměru vzorkovací a generační frekvence na výkonové spektrum MLS

U testovacího signálu se požaduje, aby měl přibližně stejné množství energie ve frekvenčních oblastech, kde má být systém identifikován. V případě MLS, obdobně jako u neopakovaného pulzu, se výkonové spektrum považuje za ploché, dokud neklesne na -3 dB, (přibližně polovina f_{gn}). Energie jediné periody MLS závisí na délce sekvence podle rovnice 4.16 [43]. Takže delší MLS má více energie nejen v inspekčním pásmu, ale i v neuniformním pásmu.

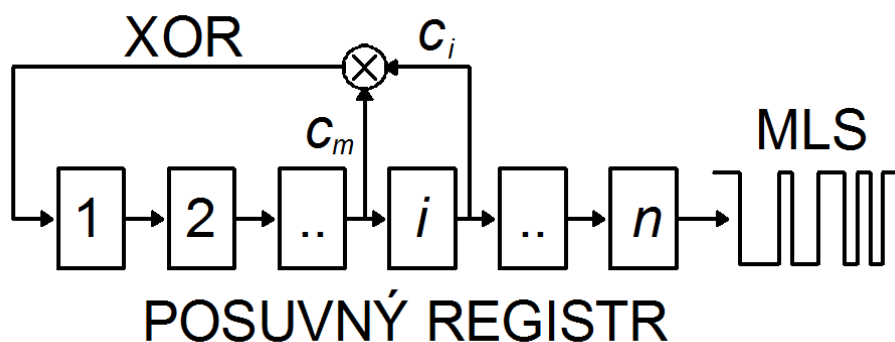
$$E = (2^n - 1)V_{cc}^2 \quad (4.16)$$

$$f_{min} = \frac{f_s}{2^n} \quad (4.17)$$

kde $\pm V_{cc}$ je úroveň napětí odpovídající ± 1 z původní sekvence [29].

Rozlišení ve frekvenční oblasti závisí na délce sekvence (rov. 4.17). Pseudonáhodné binární sekvence (PRBS) maximální délky jsou generovány n -stupňovým posuvným registrem s exkluzivním, nebo (XOR) zpětnovazebním řízením, v souladu s lineárním opakováním (rov. 4.18 a obr. 4-10).

$$a_n = (\sum_{i=1}^n c_i a_i) \text{mod}(2) \quad (4.18)$$



Obr. 4-10: Generování Sekvence maximální délky pomocí n -stupňového posuvného registru a XOR zpětné vazby

V praxi digitálního zpracování signálu (DSP) jsou hodnoty 0 a 1 vygenerované posuvným registrem (obr. 4-10) mapovány na ± 1 . Tak se vytvoří symetrická MLS s téměř nulovým průměrem. Deterministická povaha a jednoduchost generování kódu umožňuje, aby byla sekvence generována v reálném čase při měření. Příklad generátoru na bázi mikrokontroleru spolu s H-mostovým zesilovačem je uveden v kapitole 5.3.1 [A2].

Pokud vezmeme v úvahu normalizovanou sekvenci s amplitudami $\pm V$, pak je teoretická amplituda impulzní odezvy rovna V^2 . Stejnosečná (DC) chyba je rovna V^2/N , která je zanedbatelná u dlouhých signálů. Znalost korelačních vlastností MLS je nezbytná pro odhad impulzní odezvy systému $h(t)$, která se získává křížovou korelací výstupního signálu $y(t)$ s původním signálem $x(t)$ (rov. 4.19) [44-46].

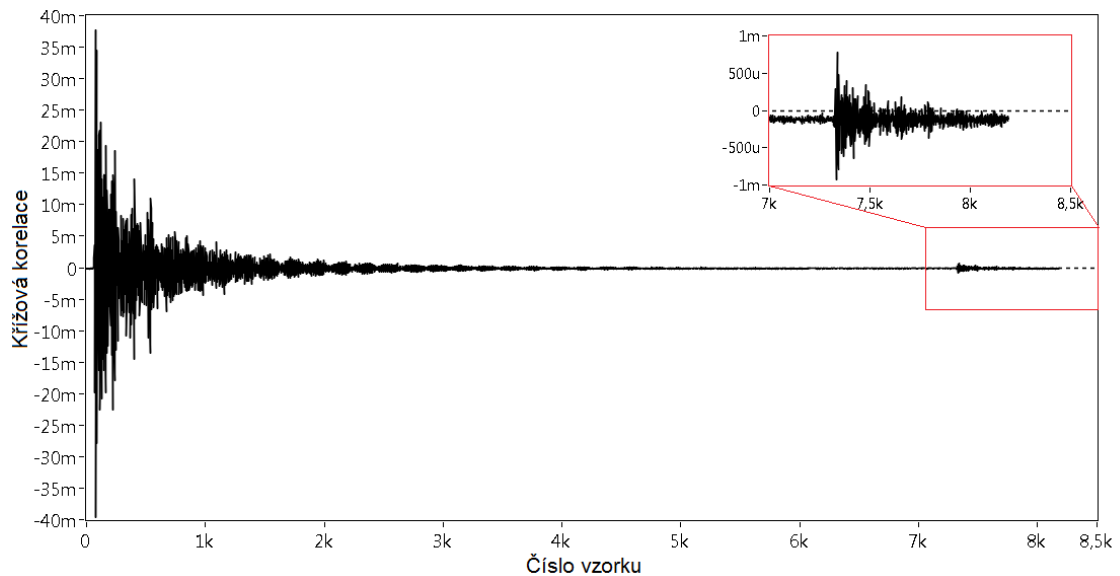
$$y(t) = \mathcal{L}\{x(t)\} = h(t) * x(t) \rightarrow R_{x,y} = R_{x,x} * h(t) \simeq h(t) \quad (4.19)$$

kde $R_{x,y}(t)$ je křížová korelace proměnných x a y , a operátor $*$ označuje konvoluci [29]. Výpočet křížové korelace se provádí zpravidla ve frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace \mathcal{F} komplexně sdruženého budícího signálu x^* a odezvy y .

$$R_{x,x} = (\mathcal{F}\{x\})^* \cdot \mathcal{F}\{y\} \quad (4.20)$$

Odstup signálu od šumu při testování na standardním, 140 mm dlouhém vzorku, touto metodou dosahuje perfektních hodnot, a to 80 dB. Nicméně nelinearity zkušebního systému mají znatelný vliv na výslednou impulzní odezvu (graf 4-4) [A3].

Zdroji nelinearit v ultrazvukovém testování jsou samotný vzorek, ale i testovací sestava. Nízká amplituda signálu daná minimálním činitelem výkyvu binárních sekvencí, vede k eliminaci dynamických nelinearit vzorku i sestavy. Problematická je ale část měřicí sestavy, kde se převádí elektrický binární signál na mechanické vibrace, protože původní diskrétní signál se změní na kontinuální vlnu. Dalšími zdroji nelinearit na vysílací straně mohou být D/A převodník a zesilovač.



Graf 4-4: Hlavní a sekundární impulzní odezva vlivem nelinearit zkušebního systému.

4.4 Způsoby generování bílého šumu

4.4.1 Bílý šum vytvořený pomocí inverzní Fourierovy transformace

Pod pojmem bílý šum se rozumí takový signál či funkce, který obsahuje všechny frekvence ve stejné míře, tj. má ploché frekvenční spektrum. Ploché, také nazývané bílé, frekvenční spektrum dalo název obecné variantě bílý šum. Kdybychom takový signál rozložili na jednotlivé harmonické složky, budou mít všechny stejnou amplitudu. Tato úvaha ale nikterak nevyovídá o fázi jednotlivých složek. Fáze mohou být libovolné, a přesto se bude stále jednat o bílý šum. Náhodnosti fází jednotlivých frekvenčních složek s úspěchem využívají některé algoritmy pro zjištění přenosových funkcí [47-51]. Kdybychom chtěli vytvořit bílý šum, bylo by možné sečíst harmonické funkce se stejnými amplitudami, libovolnými fázemi a všemi frekvencemi. Takový postup je v principu možný, ale je zdlouhavý, ve srovnání s inverzní Fourierovou transformací, která provádí přesně totéž. Zde je vhodné připomenout, že se nebude jednat o všechny existující frekvence, ale pouze o diskrétní řadu frekvencí odstupňovaných podle určitého frekvenčního kroku, tudíž diskrétní spektrum. Libovolnost fázového posunu jednotlivých harmonických složek naznačuje, že binárních sekvencí splňujících podmínku plochého diskrétního frekvenčního spektra existuje nekonečně mnoho.

Vytvořit příklad bílého šumu lze snadno pomocí inverzní Fourierovy transformace. Víme totiž, že frekvenční spektrum musí být ploché (konstanta). I zde máme libovůli, která odpovídá vzájemnému fázovému posunu jednotlivých složek. Frekvenční spektrum je vypočteno jako absolutní hodnoty z komplexních čísel. Jestliže chceme naopak vytvořit komplexní číslo s danou absolutní hodnotou, máme nekonečně mnoho variant, jaká může být reálná a imaginární část. Na základě této myšlenky lze vytvořit program, který vygeneruje bílý šum, jehož všechny frekvenční složky budou rovny jedné. Stačí zvolit komplexní čísla, která mají absolutní hodnotu rovnu jedné, například tato tři:

$$(0,8 + 0,6i); (0,936 - 0,352i); (0,96 + 0,28i)$$

Tuto sekvenci zopakujeme ještě jednou, ale v opačném pořadí a komplexně sdružené. Tento krok zajistí, že po provedení inverzní Fourierovy transformace bude výsledný signál ryze reálný. A ještě na úplný začátek vložíme nulu, která má význam

nulové frekvence, tj. střední hodnoty signálu. Takto vytvořenou sekvenci vidíme v následujícím programu na třetím řádku.

```
#!/usr/bin/python
from scipy import *
flat = [0, 0.8 + 0.6J, 0.936 - 0.352J, 0.96 + 0.28J, 0.96 - 0.28J, 0.936 + 0.352J, 0.8 -
0.6J]
signal = ifft(flat)
print signal
N = len(signal)
spectrum = abs(fft(signal)[::(N//2 + 1)])
print spectrum
```

Program vypočte inverzní Fourierovu transformaci a tím vznikne signál, který představuje bílý šum. Pro kontrolu se na předposledním řádku zpětně vypočte spektrum takového signálu. Výsledkem je:

```
[8.88178420e-16 1.00000000e+00 1.00000000e+00 1.00000000e+00]
```

Tyto hodnoty přesně splňují naše požadavky. První položka je (téměř) nula, což je v pořádku, protože jsme chtěli, aby střední hodnota signálu byla nulová. Další tři čísla jsou jedničky, to znamená, že frekvenční spektrum je ploché, čímž jsme ověřili, že se skutečně jedná o bílý šum.

Současně jsme ukázali, jakým způsobem lze v programovacím jazyce Python vypočítat frekvenční spektrum daného signálu. Tento postup lze využít i v dalších úvahách.

4.4.2 Speciální případ bílého šumu – delta funkce

Bílý šum můžeme vytvořit pomocí výše popsaného postupu i mnohem jednodušeji. Provedeme inverzní Fourierovu transformaci ze sekvence obsahující samá stejná ryze reálná čísla, například jedničky. Ryze reálné číslo je samo k sobě komplexně sdružené, takže máme jistotu, že výsledek bude též reálný. První hodnota v sekvenci není nulová, takže vzniklý signál nebude mít střední hodnotu nulovou, ale to obvykle příliš nevádí. V Pythonu můžeme vyzkoušet, že například:

```
print ifft([1,1,1,1,1,1,1,1])
```

dává výsledek:

```
[ 1.+0.j 0.+0.j 0.+0.j 0.+0.j 0.+0.j 0.+0.j 0.+0.j 0.+0.j]
```

což je signál, který jsme vytvořili tak, aby měl ploché frekvenční spektrum, a jedná se tak o bílý šum. Na první pohled je vidět, že jde o speciální případ. Pouze první hodnota v sekvenci je nenulová, všechny další jsou nulové. Jedná se o impuls, který připomíná delta funkci. Platí totiž identita, že Fourierova transformace delta funkce je konstanta. Delta funkce (impuls) je speciální případ bílého šumu a v praxi se skutečně využívá, jestliže není k dispozici jiný generátor bílého šumu. Při zjišťování akustiky místností se jako počáteční vybudení používá tlesknutí, výstřel z pistole, prasknutí balónku a podobně. Krátký intenzivní puls je také základem pro metodu impact-echo, při které se úderem na zkoumaný předmět vybudí kmity a zkoumá se frekvenční odezva. Všechny tyto metody jsou založeny na skutečnosti, že impuls má ploché frekvenční spektrum. Nevýhodou je, že veškerá energie dodaná do systému je soustředěna do jediného impulsu, který musí být velmi krátký. Jeho amplituda je proto velká - často tak, že značně komplikuje měření. Není snadné pořídít dobrou nahrávku výstřelu z pistole v uzavřené místnosti s velkou ozvěnou. Tato technika klade velké nároky na dynamický rozsah měřicí sestavy.

4.4.3 Binární generátor bílého šumu

Existuje zajímavý případ bílého šumu, kdy sekvence vstupních hodnot obsahuje pouze dvě diskrétní hodnoty. Takový binární bílý šum má velkou výhodu v tom, že elektronika generátoru může pracovat pouze se dvěma stavy, zcela odpadají analogové obvody a konstrukce se tím zjednodušuje. Binární sekvence, která má vlastnosti bílého šumu, je třeba MLS. V literatuře [52-53] jsou popsány návody, jak vytvořit generátor této sekvence pomocí oscilátoru, posuvných registrů a XOR hradel. To je samo o sobě poměrně jednoduché (ve srovnání s jinými typy generátorů), ale po hardwarové stránce je ještě snazší celý proces naprogramovat do jednočipového mikropočítače a svěřit mu výpočetní algoritmus. Jednočipový mikropočítač lze zakoupit za několik desítek Kč a mnoho dalších součástí není potřeba – nepočítáme-li výkonovou část. Následující program v jazyce Python vytvoří MLS sekvenci a vypočte z ní frekvenční spektrum.

```

#!/usr/bin/python
from scipy import *
bits = 4
N = 2**bits - 1
a = 1
coefs_all = ((0,), (0, 1), (0, 1), (0, 1),
              (0, 2), (0, 1), (0, 1), (0, 1, 5, 6),
              (0, 4), (0, 3), (0, 2), (0, 3, 4, 7),
              (0, 1, 3, 4), (0, 1, 11, 12), (0, 1), (0, 2, 3, 5),
              (0, 3), (0, 7), (0, 1, 5, 6), (0, 3))

mask_shifts = [(1 << x, bits-x) for x in coefs_all[bits-1]]
signal = zeros(N, int16)
for i in range(N):
    signal[i] = (a & 1)
    for m, s in mask_shifts:
        a ^= (a & m) << s
    a = a >> 1
print signal
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.

Po ověření funkčnosti pomocí jazyka Python byl algoritmus přepsán do jazyka Assembler, aby mohl být spuštěn na jednočipovém mikropočítači. Níže uvedená ukázka implementace pro procesory řady Atmel AVR je záměrně naprogramovaná na úrovni strojového kódu. Každý řádek odpovídá jednomu cyklu časovače procesoru, což umožňuje spočítat frekvenci generování sekvence a zároveň zajistit shodný čas výpočtu pro oba binární stavy. To je důležité, protože výstupní hodnoty sekvence přímo, bez ukládání do mezipaměti, ovládají obvod pro generování signálu. Uvedený

algoritmus generuje MLS sekvence o délce $N=1048575$. Celý výpočetní proces se podařilo zestručnit na pouhých 18 strojových cyklů. Jestliže bude taktovací frekvence jednočipového mikropočítače 18 MHz, což je běžné, bude generátor bílého šumu vytvářet binární sekvenci rychlostí 1 Mbit/s.

loop:

```
mov r17, r23
andi r17, 1
out _SFR_IO_ADDR(PORTB), r17
lsl r17
lsl r17
lsl r17
lsl r17
eor r21, r17
mov r17, r23
andi r17, 8
lsl r17
eor r21, r17
lsl r20
ror r21
ror r22
ror r23
rjmp loop ;18 cycles
```

4.5 Verifikační metody použité v této práci

Jelikož se práce zabývá měřením akustických vlastností stavebních materiálů, pro ověření výsledků naměřených pomocí aparatury s MLS signálem byly primárně použity metody akustické. Ty byly podrobně popsány v kapitole 2.2.

Konkrétně to jsou:

- 1. Kladívková rezonanční metoda (impact-echo) pro podélné kmitání**
- 2. Pulzní ultrazvuková metoda**

Níže popsané destruktivní zkoušky slouží k absolutnímu srovnání naměřených parametrů s reálným stavem materiálu.

4.5.1 Pevnost v tlaku zkušebních těles

Pevnost v tlaku zkušebních betonových těles byla stanovena dle ČSN EN 12390-3 [54] (Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles). Tato norma uvádí metodu pro stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles ze ztvrdlého betonu.

- Zkušební postup:

Dotykové plochy tlačných desek lisu se otřou a také se odstraní všechny zbytky písku nebo jiného uvolněného materiálu z povrchu zkušebního tělesa na plochách v dotyku s tlačnými deskami. Kromě přídavných desek nebo středících bloků se nesmí použít žádná podložka mezi těleso a tlačené desky zkušebního lisu. V případě použití přídavné desky, se musí osadit na spodní i horní plochu zkušebního tělesa [55].

Při zatěžování se nastaví konstantní rychlost zatěžování od $0,6 \pm 0,2$ MPa/s s přípustnou odchylkou ± 10 %. Po nastavení počátečního zatížení, do 30 % zatížení při porušení, zatěžuje se plynule a bez nárazu.

Pokud se použije ručně ovládaný zkušební lis, je třeba upravovat vhodným kontrolním zařízením tendenci ke snižování stanovené rychlosti zatěžování před porušením tělesa. Zaznamenaná se dosažená maximální zatížení v kN.

Pevnost v tlaku je dána následujícím vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (4.21)$$

Kde:

f_c ... pevnost v tlaku [MPa],

F ... maximální zatížení při porušení [N],

A_c ... průřez. plocha zkušeb. tělesa, na kterou působí zatížení [mm²].

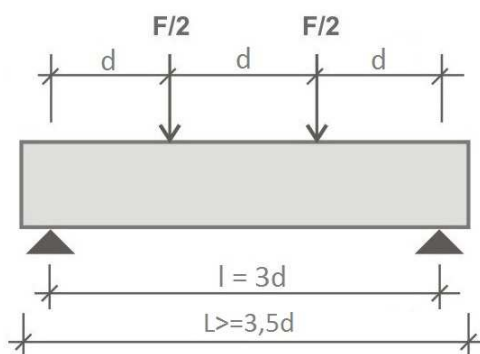
Pevnost v tlaku se dle ČSN EN 12390-3 [54] zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa.

4.5.2 Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena dle metodiky ČSN EN 12 390-5 [56] (Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles). Hranolová zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Největší dosažené zatížení se zaznamená a vypočte se pevnost v tahu ohybem.

- Zkušební postup:

Zkušební těleso se položí na dva podpěrné válečky. Vzdálenost mezi podpěrnými válečky musí být rovna $3d$, kde d je vzdálenost mezi zatěžovacími válečky. Zatěžovací válečky musí být umístěny uprostřed mezi podpěrnými válečky. Při zatěžování se nastaví konstantní rychlost zatěžování v rozsahu od $0,04 \text{ MPa/s}$ do $0,06 \text{ MPa/s}$. Po nastavení počátečního zatížení, do 20 % zatížení při porušení, zatěžuje se plynule a bez nárazu a se stanovenou konstantní rychlostí $\pm 1 \%$ až do porušení.



Obr. 4-11: Schéma čtyřbodového ohybu

Pevnost v tahu ohybem je dána následujícím vztahem:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (4.22)$$

kde:

- f_{cf} ... pevnost v tahu ohybem [MPa],
 F ... maximální zatížení při porušení [N],
 d_1 a d_2 ... rozměry příčného průřezu tělesa [mm].

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší $0,1 \text{ MPa}$ [56].

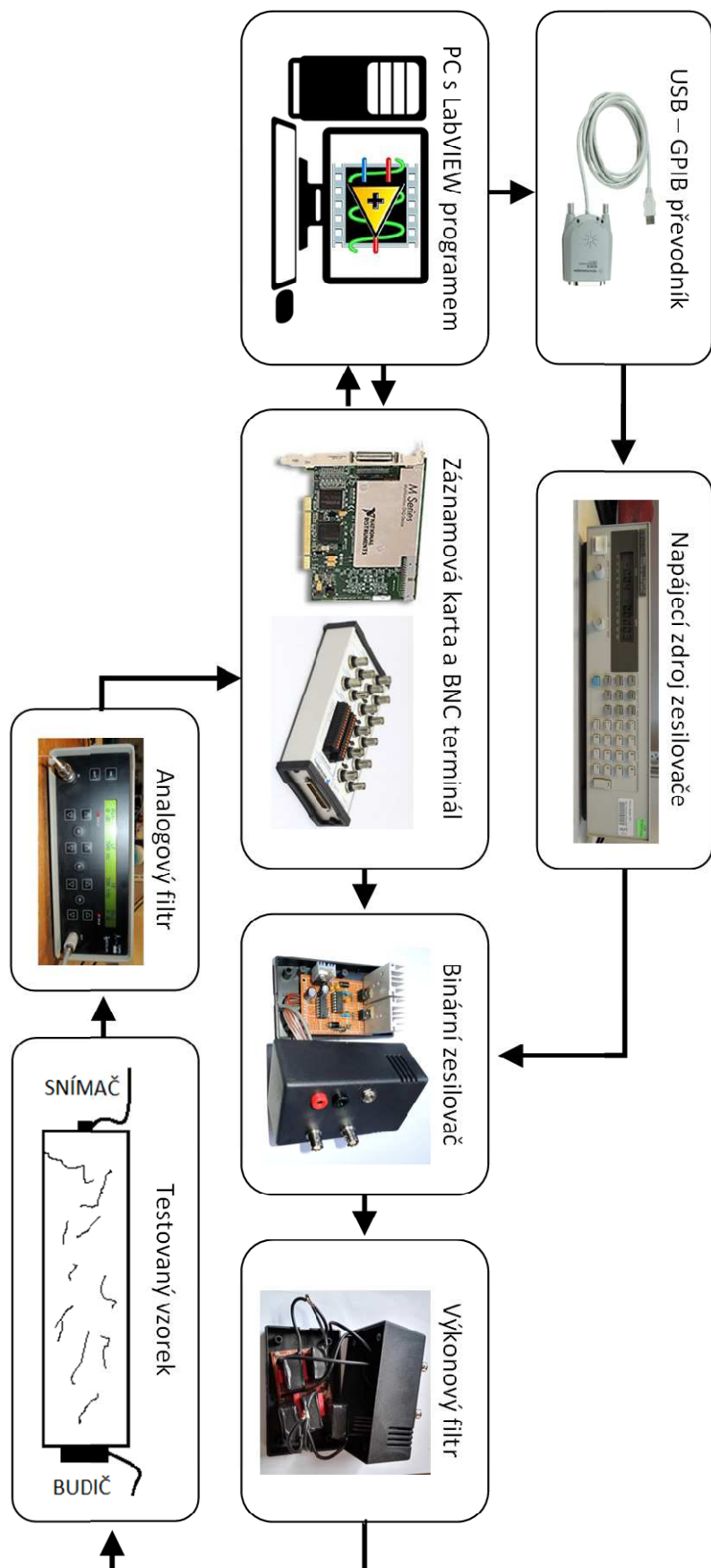
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Měřicí aparatura se signálem MLS

Na základě studia využití pulzní komprese pro získání impulzní odezvy systému byla navržena měřicí aparatura s budícím ultrazvukovým signálem maximální délky. Blokové schéma měřicí sestavy je uvedeno na obrázku 5-12. Klíčovým prvkem sestavy je záznamová PCI karta NI 6251, která je ovládána programem navrženým v prostředí LabVIEW. Pomocí převodníku USB na GPIB (Keysight Technologies 82357B) program komunikuje s laboratorním zdrojem (HP 6645A), který slouží pro napájení binárního zesilovače s polomostovým zapojením. Digitální testovací signál se zesílí z logicky vysoké hodnoty (2 až 2,7 V) na úroveň napájecího napětí zesilovače (až 90V) a pro logicky nízkou hodnotu na vstupu (méně než 0,8 V) zapříčiní vybití náboje budiče zkratem. Zesílený binární signál s kontinuálním frekvenčním spektrem je dodatečně ořezán výkonovým dolnopropustným LC filtrem. Akustický měnič přenáší do vzorku mechanické vibrace pomocí vhodného vazebního prostředku. Signál, zachycený snímačem na protilehlém konci vzorku, je zbaven DC složky frekvenčního spektra filtrací v pásmové propusti 300 Hz až 300 kHz. Výstupní filtr (3S Sedlák AM 22) obsahuje předzesilovač a zesilovač výstupního signálu, ovšem amplitudy MLS signálu ve většině případů nepotřebují zesilovat. Posledním krokem je digitalizace záznamovou kartou a signálová analýza.

Měřicí aparatura je sestavena pro funkci pouze v průchodovém režimu, tzn. budič a snímač jsou umístěny v protilehlých koncích zkoušeného vzorku. Teoreticky je ale možné získat impulzní odezvu, i pokud jsou oba měniče umístěné na stejné straně [43]. Pro provozování v režimu pulz-echo je potřeba velmi krátká testovací sekvence a záznamová karta s řádově rychlejším vzorováním.

Pro úplnost je vhodné dodat, že měřicí aparatura není limitována pouze na testování sekvencí maximální délky, ta se pouze ukázala jako nejvhodnější. Obecně je možné použít jakoukoliv pseudonáhodnou binární sekvenci, viz kapitola 4.2. V programu je možné vybrat MLS o délce 3 až 20 bit, nebo inverzně opakovanou sekvenci (IRS) o stejné délce.



Obr. 5-12: Blokové schéma automatizované měřicí sestavy

5.2 Signálová analýza, automatizované zpracování měření

Schéma znázorněné na obrázku 5-13 představuje nejdůležitější procesy, které automatiky provádí navržený program v prostředí LabVIEW. Testovací signál o zvolené bitové délce je načten ze souboru a doplněn o vzorky podle vybrané frekvence generování sekvence. Testovací signál se skládá ze dvou identických MLS sekvencí a pulzu s dostatečnými ustalovacími prodlevami. První MLS sekvence, na základě empirického měření, není vhodná pro další zpracování, proto se nezahrnuje do výpočtu. Důvodem může být neočekávané chování v neustáleném stavu kmitání tělesa, nebo může být i chyba na straně měřící sestavy. Pulz na konci testovací sekvence slouží pouze k srovnání a ověření synchronizace. Protože hardware měřící sestavy není schopen vytvořit pulz dostatečně krátký, aby se mohl považovat za Diracovu delta funkci, což ani není záměrem. V měření je sledován pouze příchod náběžné hrany pulzu. Amplituda odezvy na pulz je malá a zkreslená, ale dostatečná pro určení času průchodu ultrazvukové vlny. Zcela zásadním prvkem pro měření MLS je perfektní synchronizace budícího a snímaného signálu. Digitální výstup a analogový vstup záznamové karty mají nezávislé časovače (přesnost 50 ppm), které jsou spuštěny synchronizačním pulzem.

Testovací sekvenci, spolu se zaznamenaným signálem, je možné před ukládáním do strukturovaného souboru binárního typu několikrát zopakovat a následně zprůměrovat všechny průběhy pro ještě lepší SNR.

Výše popsaná měřící subrutina se několikrát opakuje se narůstající amplitudou signálu v každém měření. Sedm měření s různými napěťovými úrovněmi poskytuje dostatečně přesnou aproximaci lineární závislosti. Díky kompletní automatizaci čistý čas měření jednoho vzorku trvá pouhých 30 sekund.

Následujícím krokem je hromadné zpracování signálu a signálová analýza. To se provádí až po dokončení měření, především kvůli časové náročnosti. V první řadě je potřeba digitálně odstranit stejnosměrnou složku budícího i zaznamenaného signálu. Následně se provede rychlá Fourierova transformace obou signálů a jejich vzájemná křížová korelace, jejímž výsledkem je impulzní odezva systému. Dále je nutné provést aproximaci obálky IR, empiricky stanovit limitní úroveň šumu a určit začátek a konec IR. Protože je budící signál i zaznamenaný signál perfektně synchronizovaný, začátek impulzní odezvy odpovídá času průchodu podélného ultrazvukového vlnění. Mrtvý čas

aparatury, získaný z měření na kalibračním vzorku, je nutné odečíst pro získání pravé hodnoty času průchodu měřeného vzorku. Rychlost šíření nejrychlejších podélných vln se spočítá ze známé vzdálenosti vysílače a přijímače (rov. 2-3).

Kromě času průchodu ultrazvukových vln je možné z impulzní odezvy zjistit i útlumový koeficient. Fluktuační vlny v tloušťce gelové vazby, vyvinutém tlaku na budič, vazbě snímače a uložení vzorku, znemožňuje spolehlivé měření koeficientu útlumu. Posledním akustickým parametrem, který je možný získat z časové domény signálu, je maximální amplituda. Bohužel i ta je zatížena stejnými zkreslujícími faktory, a proto se následná část programu věnuje analýze frekvenčního spektra signálu.

Před převedením signálu z časové domény do frekvenční, rychlou Fourierovou transformací, je nutné signál upravit. V praxi DSP se používá násobení okny jako Butterworth, Gauss a mnoho dalších. Ovšem pro filtraci signálu impulzní odezvy je nejvhodnější exponenciální a obdélníkové okno (Force window) [57-59] [A4]. Váhové faktory exponenciálního okna je možné určit tak, aby kopírovaly obálku impulzní odezvy signálu, a tak minimalizovat vliv šumu a nelinearit. Pro silové okno je váhový faktor roven nule všude, kromě oblasti s IR. Přesné určení začátku a konce IR je proto zcela zásadní [A5]. Vzhledem k tomu, že signál byl dříve zbaven stejnosměrné složky, je možné použít silové okno a ještě zvětšit frekvenční rozlišení doplněním nul k IR (Zero Padding). Po provedení FFT je možné frekvenční spektrum vyhladit klouzavým průměrem.

Stěžejní část programu se stará o vyhledávání lokálních maxim frekvenčního spektra. Pro určení maxima se používá druhá derivace, čili strmota píku, kvadratické MNČ aproximace n-přilehlých hodnot a také podmínka relativní amplitudy. Pro kontrolu označení lokálních maxim program vyhledává i lokální minima a porovnává rozdíl amplitudy přilehlých extrémů. Nalezená lokální maxima pro různé intenzity budících signálů se prokládají přímkou a výsledkem je lineární závislost frekvence na amplitudě FFT. Lineární závislost je ideální, protože obsahuje pouze dva parametry, průsečík na frekvenční ose a sklon.

$$y = A + Bx \tag{5.23}$$

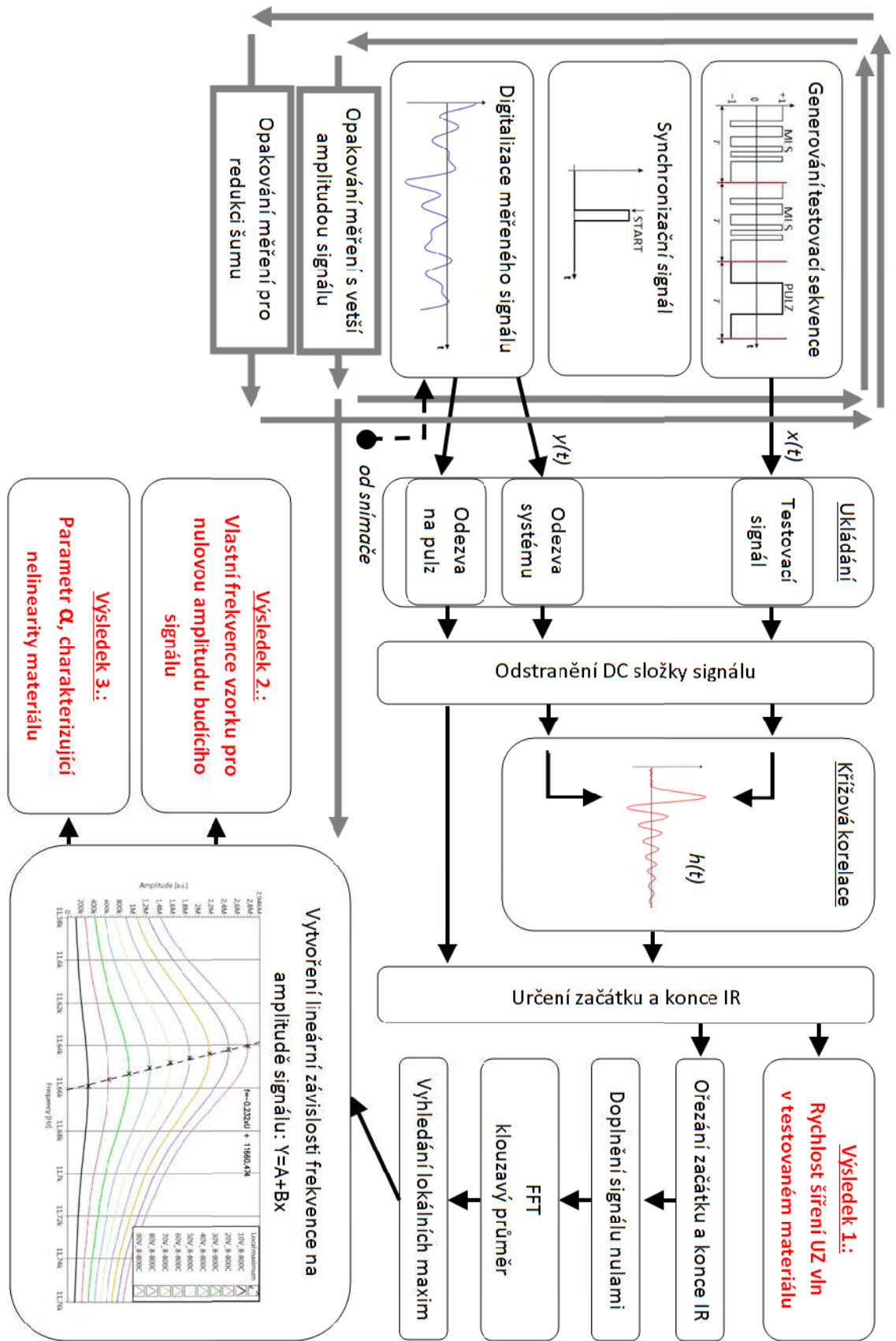
Podle teorie NEWS by bylo vhodnější použít polynom druhého stupně, ale vzhledem k relativně malým deformacím způsobeným ultrazvukovými vlnami je lineární aproximace dostačující. Průsečík aproximované přímky s osou x má význam vlastní

frekvence vzorku pro budící signál s nulovou intenzitou, tudíž charakterizuje lineární chování vzorku a z průsečíku lineární závislosti s FFT křivkou o maximální amplitudě je vypočítán parametr α , který charakterizuje nelinearity vzorku. Vztah pro výpočet parametru α vyplývá z rovnice 2-14, ovšem díky lineární aproximaci na místo Δf je mnohem spolehlivější.

$$\alpha = \frac{A - f_{\min}}{A} \quad (5.24)$$

Na závěr signálové analýzy program vygeneruje souhrnnou tabulku výsledků všech vzorků, i měření na jednotlivých vzorcích spolu s grafy lokálních maxim, podle níž testovací technik potvrdí výběr vlastní frekvence.

Program byl experimentálně upraven pro získání přenosových funkcí, viz kapitola 5.7, anebo byla použita krátko-časová Fourierova transformace místo FFT. Ovšem impulzní odezva získaná křížovou korelací je příliš krátká pro efektivní uplatnění STFT, a proto není v této práci déle rozebíraná.



Obr. 5-13: Blokové schéma signálové analýzy

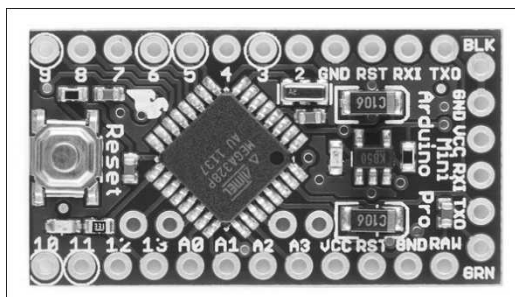
5.3 Představení jednotlivých částí měřicí sestavy

5.3.1 Hardwarový generátor MLS s H mostem [A6]

Jednoduchost generování sekvence MLS pomocí mikrokontroleru a následného zesílení signálu vedla k výchozímu záměru vytvořit nízkonákladové, přenosné testovací zařízení. V předchozích kapitolách byly popsány charakteristické vlastnosti MLS, její výhody a způsob, jakým je možné sekvenci maximální délky generovat. Pro připomenutí, binární signál nabývá pouze dvou napěťových úrovní, což umožňuje zesílení s minimálním zkreslením pomocí dvou aktivních členů. Naproti tomu zesilovače obecného signálu jsou mnohem komplikovanější a zpravidla nedosahují takových výstupních napětí (do 40 V) a výkonů. Dále je nutné uvažovat s nelineárním průběhem voltampérové charakteristiky, šířkou přenášeného pásma a účinností. Kvalitní zesilovače obecného signálu stojí stovky tisíc korun, zatímco cena komponentu níže navrženého zesilovače je o dva řády nižší.

5.3.1.1 Jednočipový mikropočítač

Kód binárního generátoru, popsany v kapitole 4.4.3, je nahrán do komerčně vyráběného modulu Arduino Pro Mini s mikrokontrolerem ATmega328. Frekvence čipu je oscilátorem nastavena na 16 MHz. Modul obsahuje stabilizátor napětí, 14 digitálních vstupně/výstupních pinů a 8 analogových vstupů. Komunikace mezi mikrokontrolerem a PC je realizována externím převodníkem FT232RL. Strojový kód, popsany v předchozí kapitole 4.4.3, byl upraven tak, aby se výstupní hodnota objevovala na pinech 10 a 11 a jejich inverze na pinech 8 a 9. Signály jsou zpracovány řídicími obvody pro MOSFET tranzistory které budí plný H-most. Protože jsou všechny čtyři piny součástí stejného portu, mikrokontroler odesílá jejich hodnotu simultánně a tak zkrátí čas, kdy jsou tranzistory H-mostu ve zkratu. Délka cyklu se přidanými instrukcemi prodloužila na 3 μ s, z toho plyne $f_{gn} = 1/3$ MHz.

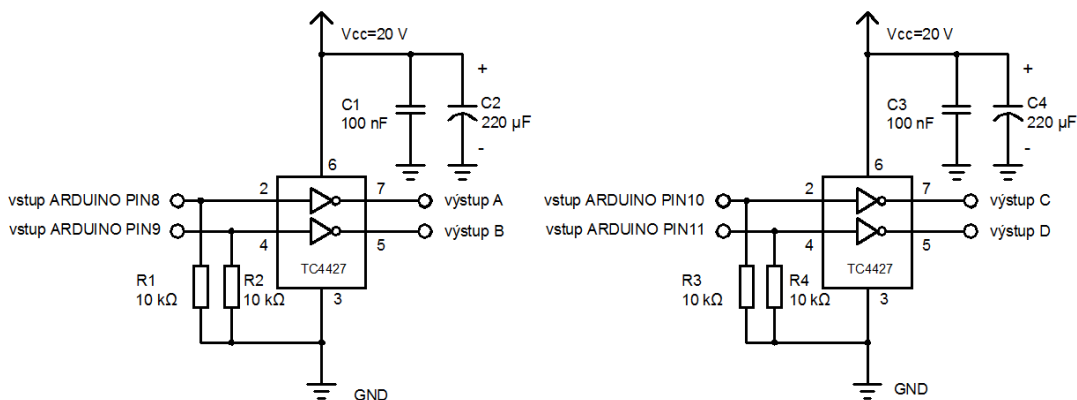


Obr. 5-14: Mikrokontroler: Arduino Pro Mini

5.3.1.2 MOSFET řídicí obvody

Silová část H-mostu se skládá z tranzistorů typu MOSFET, které musí být vhodně řízeny, aby dosáhly typických hodnot. Proto byl při výběru budičů kladen důraz na nízké zpoždění a schopnost dodat krátkodobě vysoké proudy, vyplývající z kapacity tranzistoru. Podle údajů výrobce dokážou použité integrované obvody TC4427 sepnout tranzistory o kapacitě 1000 pF pod 30 ns.

Schéma na obrázku 5-15 zobrazuje zapojení řídicích obvodů pro čtyři silové MOSFET tranzistory tvořící H-most. Jedná se o úpravu doporučeného zapojení výrobce. Kondenzátory C1 až 4 slouží k vyrovnání odběrových špiček při spínání tranzistorů, odpory R1 až 4 eliminují nežádoucí záchvěvy na výstupních pinech mikrokontroleru.

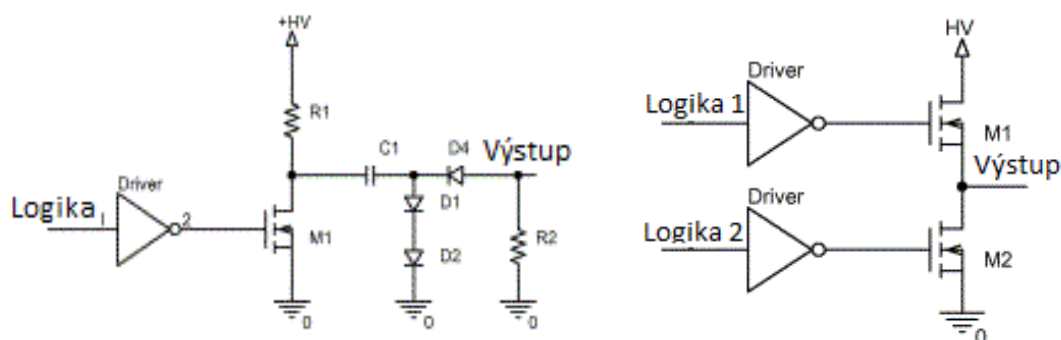


Obr. 5-15: Schéma zapojení řídicího obvodu MOSFET tranzistorů

5.3.1.3 H-most

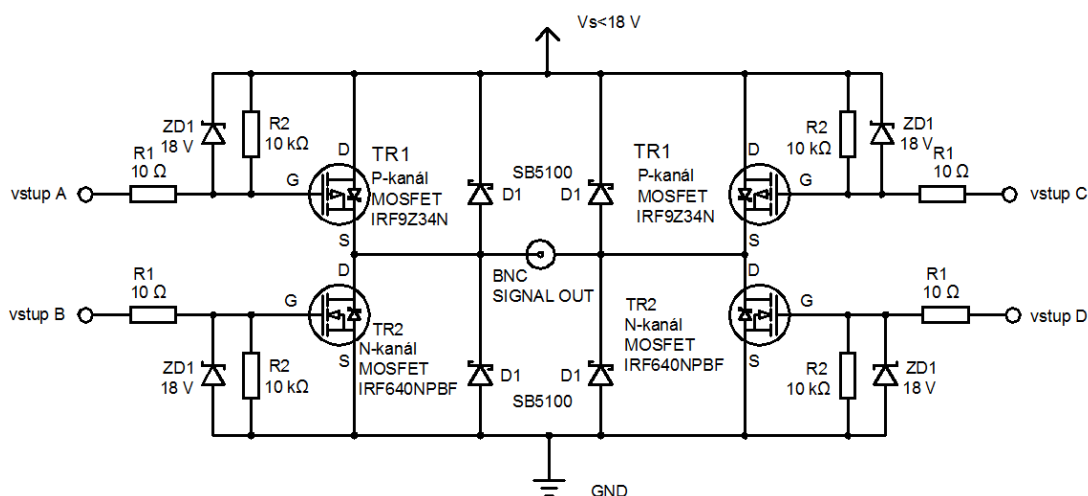
Nejčastěji používané generátory vysokých frekvencí fungují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrické měniče vykazují v elektrickém obvodu

především vysokou kapacitanci, která se musí při každé změně stavu vybit. Z toho důvodu se generátory s jedním aktivním komponentem vlivem velkých ztrát přehřívají. Jako vhodnější se ukazuje zapojení do polomostu, protože se měnič vybíjí zkratováním [9].



Obr. 5-16: Schéma generátoru s jedním aktivním prvkem (vlevo), s dvěma aktivními prvky (vpravo) [12]

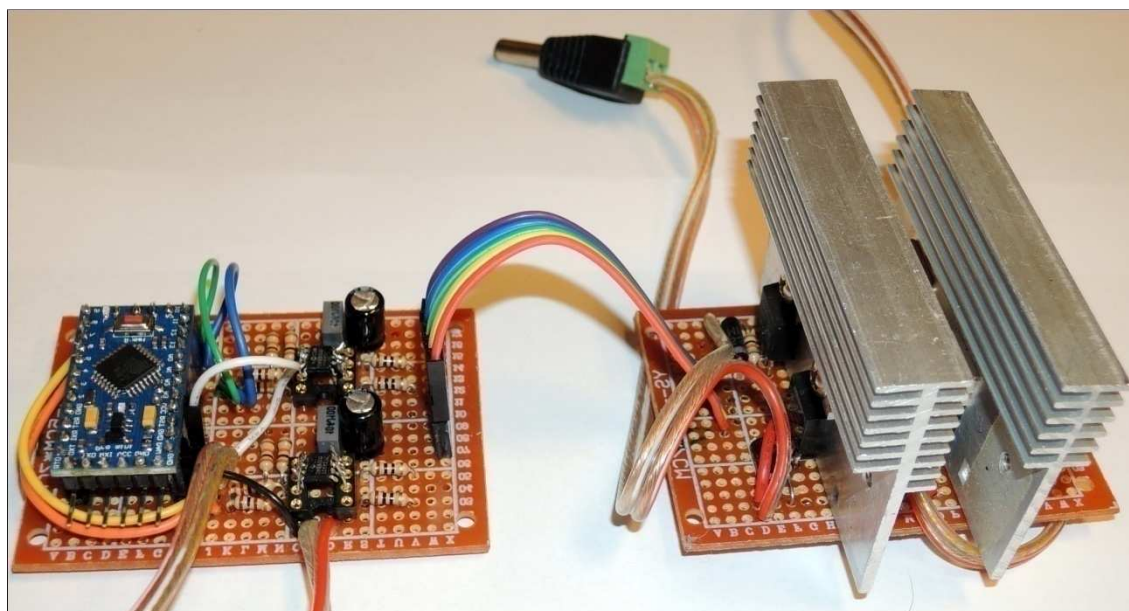
Silová část navrženého generátoru využívá tzv. plného H-mostu. Tento systém našel uplatnění v průmyslu pro řízení směru otáček DC motoru. Hlavní výhodou plného H-mostu je schopnost otočit polaritu na výstupu. Amplituda vzniklých oscilací odpovídá dvojnásobku napájecího napětí po odečtení ztrát. Horní strana H-mostu se skládá ze dvou P-kanálových tranzistorů a spodní ze dvou N-kanálových tranzistorů. Použité tranzistory mají především nízkou vstupní kapacitanci do 1100 pF a rychlé spínací časy; v součtu do 100 ns.



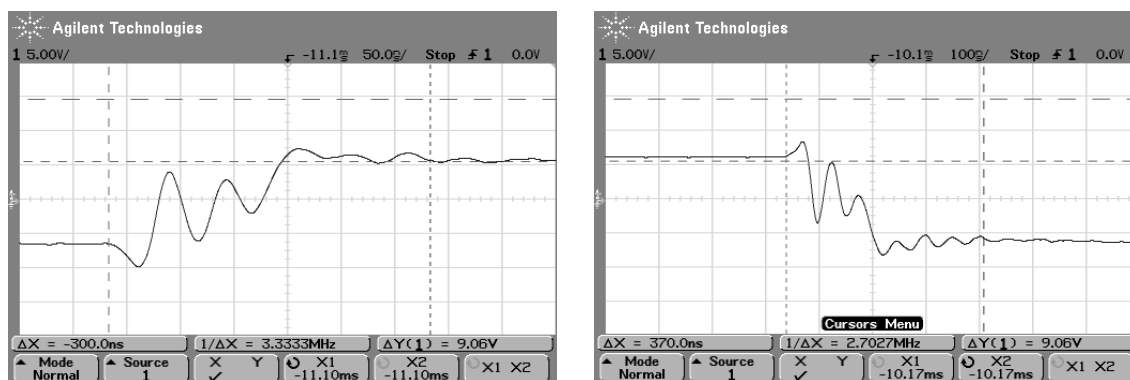
Obr. 5-17: Schéma zapojení plného H-mostu

5.3.1.4 Vlastnosti hardwarového generátoru MLS s H-mostem

Generátor MLS signálu složený z mikrokontroleru, MOSFET řídicích obvodů a plného H-mostu (obr. 5-18) byl otestován na odporové zátěži, pomocí osciloskopu Agilent 54622D se vzorkovací frekvencí 100 MHz.



Obr. 5-18: Vlevo: mikrokontroler, který generuje MLS „za letu“ a MOSFET řídicí obvody. Vpravo H-most pro zesílení budícího signálu



Graf 5-5: Vzestupná (vlevo) a sestupná hrana (vpravo) MLS signálu

Zjištěné časy přechodových stavů (cca 180 ns) potvrdily schopnost zařízení pracovat s frekvencemi do 1 MHz. Záchvěvy signálu u přechodových jevů jsou velkou měrou způsobeny parazitními kapacitami a indukčnostmi kabelového vedení. Vhodným umístěním stabilizačních kondenzátorů, podobně jako v návrhu řídicích obvodů, by bylo možné část kmitů eliminovat.

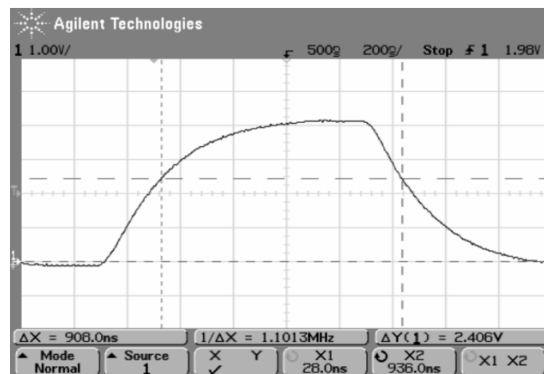
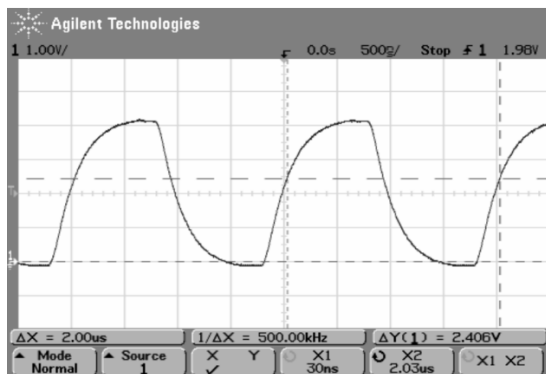
V případě zájmu vyrobit přenosné kompaktní testovací zařízení MLS je navržený generátor nepravděpodobněji cestou.

5.3.2 Záznamová karta NI PCI 6251

Zkušenosti získané testováním hardwarového generátoru signálu MLS poukázaly na problém v podobě synchronizace generování a záznamu dat. Mikrokontroler i záznamová karta NI PCI 6251 byly řízeny vlastními oscilátory. Navíc z teorie MLS [60] musí být vzorkovací frekvence celočíselným násobkem frekvence generování. I když jsou uvedené nedostatky řešitelné, bylo rozhodnuto pokračovat směrem softwarového generátoru signálu.

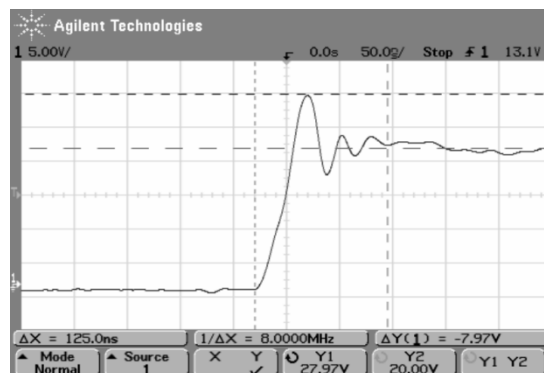
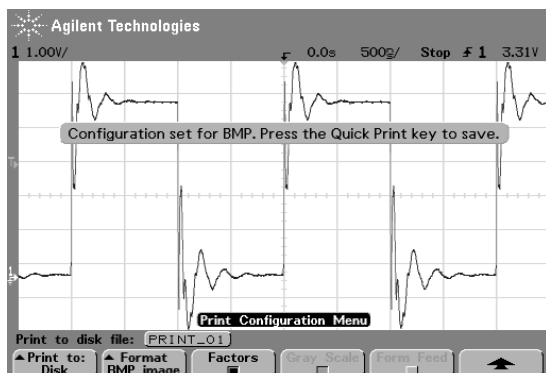
Záznamová karta disponuje několika analogovými vstupy (AI) s nastavitelným rozsahem do ± 10 V a vzorkovací frekvencí do 1,25 MHz. Kromě toho jsou k dispozici i analogové výstupy (AO) a digitálně vstupně-výstupní porty (DIO). Navíc hodinový cyklus všech uvedených prvku může být sdílen a tak umožnit kompletní synchronizaci generování a záznamu signálu. Synchronizace signálu spolu s perfektní opakovatelností měření umožňuje synchronii průměrování několika měření. Výsledkem je redukce šumu, především kvantizačního šumu A/D převodníku. Výhodou je i možnost měnit frekvenci generování signálu, což nebylo možné automatizovat v případě hardwarového generátoru.

Analogový výstup karty umožňuje generovat libovolný signál o rychlosti 2,86 MS/s, což je zcela dostatečné pro MLS signál s frekvencí generování 1 MHz. Naneštěstí obdélníkový signál je náchylný především na ustalovací čas AO (2 μ s). Hrany generovaného signálu z analogového výstupu jsou tímto extrémně zkresleny. Z pohledu TTL digitální logiky to není problém, pokud je čas vzestupu a sestupu mezi logickými hodnotami stejný. Pro úplnost, napěťová úroveň logické změny je závislá na napájecím napětí a teplotě. Pro 25 °C a $V_{CC} = 5$ V se přechod mezi V_{IL} a V_{IH} pohybuje v rozmezí 2,2-2,6 V. Střed tohoto rozmezí je vyznačen kurzory na následujících snímcích z osciloskopu. Ze snímků vyplývá, že obdélníkový signál o frekvenci 500 kHz generovaný pomocí analogového výstupu, má nesymetrickou střídu v poměru 908:1092 ns.



Graf 5-6: Obdélníkový signál 500 kHz generovaný analogovým výstupem karty

Port digitálních výstupů záznamové karty je 8bitový, to znamená, že je schopna simultánně generovat až 8 signálů s logickou napětovou úrovní. Maximální frekvence časovače 10 MHz naznačuje lepší ustalovací časy a tudíž větší vhodnost pro účely generování binárního signálu. Na následujících snímcích z osciloskopu je zaznamenán stejný signál jako v případě analogového výstupu. Digitální výstup je zcela vhodný, protože vzestupná i sestupná hrana trvá do 50 ns a ani počáteční zákmit nepřekračuje hodnotu přechodu mezi logikou.



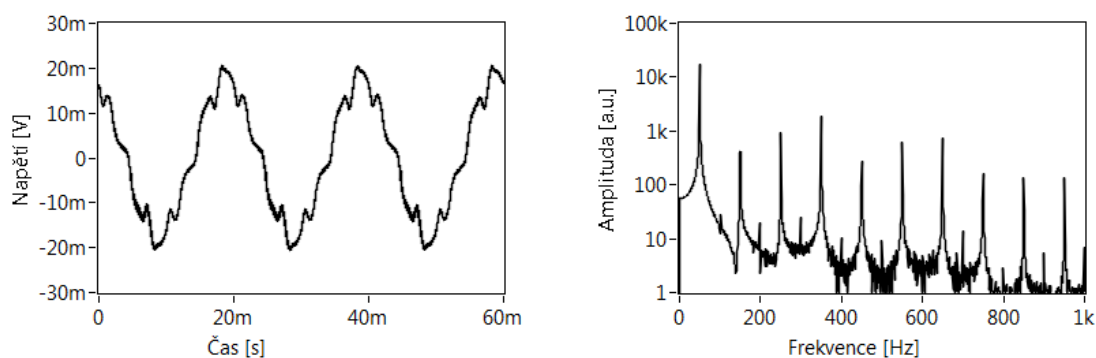
Graf 5-7: Obdélníkový signál 500 kHz generovaný digitálním výstupem karty

Přestože digitální výstup a analogový vstup nesdílí stejný časovač, je nutné zajistit synchronizaci startu. K tomu účelu slouží uživatelsky nastavitelný časovač s neopakovaným pulzem o délce 0,3 s.

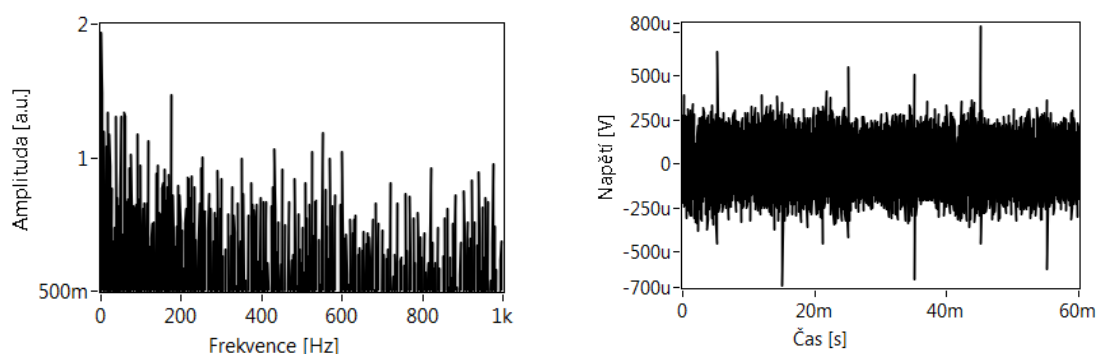
5.3.2.1 Síťový šum

Konektorový panel a záznamová karta umožňují měření signálu k různým napětovým referencím. Při diferenčním zapojení se digitalizuje kladná i záporná

signálová linka a jak název napovídá, provádí se jejich rozdíl. Z finančních důvodů je u většiny zařízení pro sběr dat multiplexován jediný A/D převodník na oba vstupy, což přirozeně vede k časovému rozdílu obou měření a snížení maximální vzorkovací frekvence. Na druhou stranu rozsah A/D převodníku, přestože je nastavitelný, má vždy střed na úrovni nula voltů. Proto je pro elektretové mikrofony s fantomovým napájením výhodnější diferenční zapojení s plovoucí referencí. Měření signálu k společné zemi by v případě 48 V fantomového napájení překročilo maximální povolený rozsah A/D převodníku (10 V). Na druhou stranu záporná signálová linka, která je současně i stíněním koaxiálních kabelů, není v diferenčním režimu funkční. Všudypřítomný šum rozvodné sítě 230 V (50 Hz a liché násobky), tramvajové sítě, elektronických spotřebičů a spínaných zdrojů je viditelný na následujících grafech. Jedná se o šum naměřený na 0,5 m dlouhém koaxiálním kabelu s 50Ω terminátorem a 20 dB zesílení. Zapojením se společnou zemí se podařilo šumový signál redukovat z 20 mV (graf 5-8) na 0,8 mV (graf 5-9).



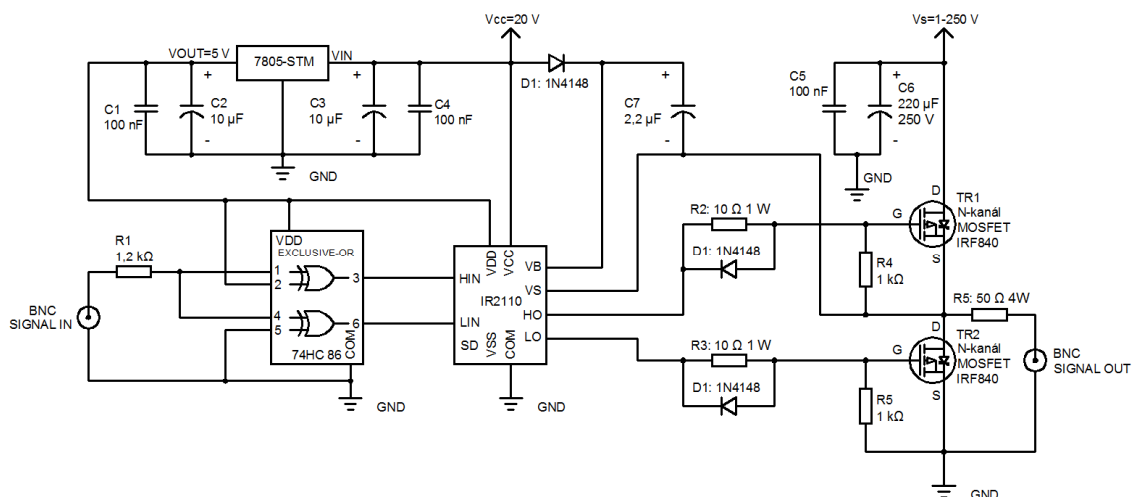
Graf 5-8: Síťový šum na analogovém vstupu - diferenční měření



Graf 5-9: Síťový šum na analogovém vstupu - se společnou zemí

5.3.3 Binární zesilovač polomost

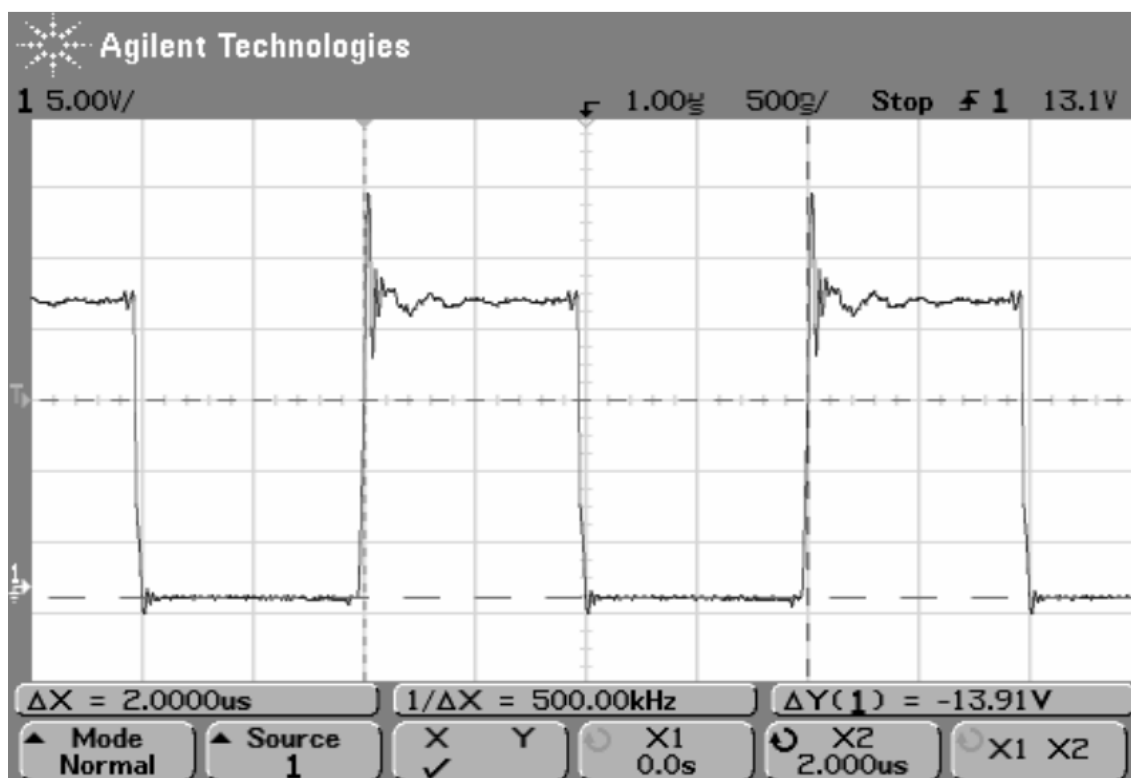
Binární zesilovač byl navržen pro zesílení digitálního budícího signálu. Logické XOR hradlo způsobí duplikaci budícího signálu a jeho inverzi, podle kterých řídicí obvod spíná MOSFET tranzistory. Výstupní signál pak nabývá hodnoty napájecího napětí MOSFET tranzistorů (V_S), nebo země (GND). Protože piezokeramické budiče jsou náchylné na namáhání tahem, absence záporné půlvlny prodlužuje jejich životnost. Ze stejného důvodu jsou výkonové měniče typu Langevin udržovány v trvalém tlaku stahovacím šroubem. Další nepříjemnou vlastností piezobudičů je jejich vysoká kapacitance, která se musí vybit před dalším impulzem, což je provedeno zkratem v půlvině odpovídající logické 0. Polomostový zesilovač oproti svému předchůdci dokáže zesilovat signál až na 250 V. Výměnou pouhých 4 komponent je možné omezení zvýšit až na 1,2 kV, ale to je pro účely této testovací stanice zbytečné, protože laboratorní zdroj napětí je omezen na 120 V. Co se popisu funkčnosti týče, kondenzátory C1 až 7 slouží ke stabilizaci DC napětí a přispívají tak ke snížení parazitických induktancí vodičů. Bypassové diody D1 urychlují vybíjení hradel (Gate) MOSFET tranzistorů. Odpor R5 47 Ω slouží k impedančnímu přizpůsobení vodičů výkonové části. Úbytek napětí a s tím spojené ztráty na odporu R5 jsou zanedbatelné, protože impedance piezobudiče se pohybuje v rozmezí 2-70 k Ω . Později se v této práci používá pro buzení 8 Ω dotykový reproduktor EX60S, proto je odpor R5 přemostěný.



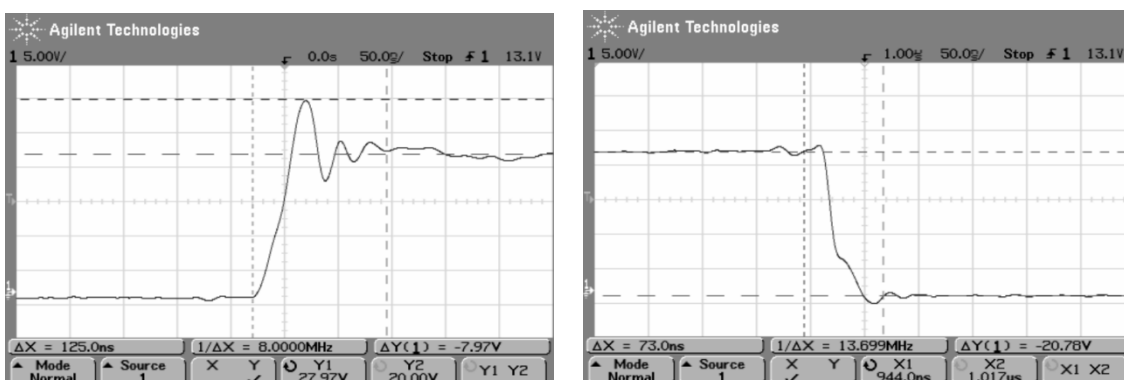
Obr. 5-19: Schéma binárního zesilovače polomost

5.3.3.1 Vlastnosti zesilovače

Zesilovač byl otestován osciloskopem za identických podmínek na odpovídající odporové zátěži. Vzestupná hrana obsahuje neideální 29% překmit, ten by mohl způsobovat problémy při testování elektronických komponent náchylných na napěťové špičky, ale v případě piezoměničů se nejedná o závažný problém. Navíc je možné, že při vyšším zatížení zesilovače se tento překmit ztratí úplně. Sestupná hrana má téměř ideální průběh. Přechodové časy do 100 ns potvrzují vhodnost použití pro zvolený frekvenční rozsah.



Graf 5-10: Obdélníkový signál 500 kHz po zesílení



Graf 5-11: Vzestupná hrana (vlevo) a sestupná hrana (vpravo) po zesílení



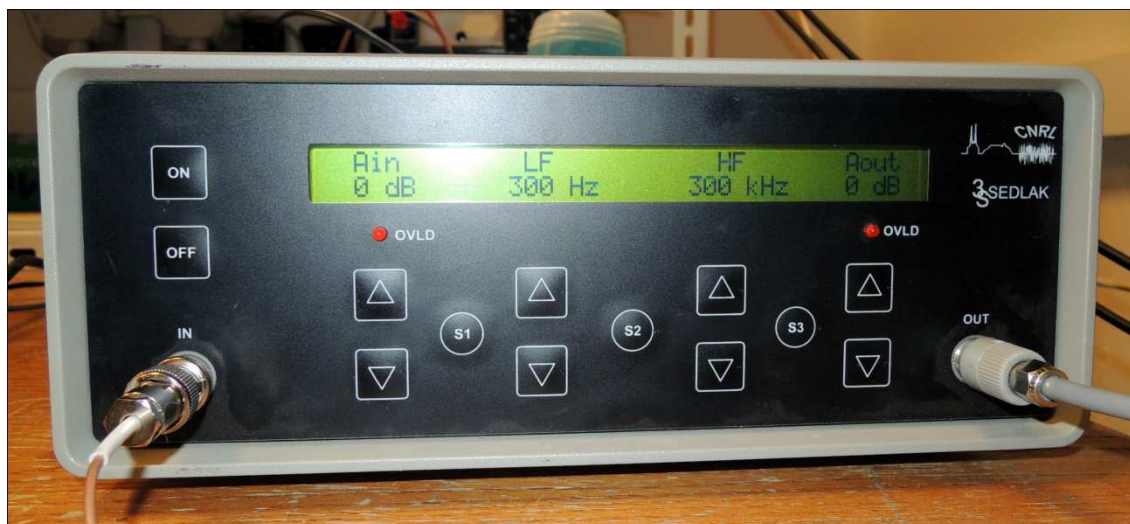
Obr. 5-20: Binární zesilovač polomost

5.3.4 Analogové filtry

Testovací signály využívané nejenom ve stavebnictví, ale i v oboru nedestruktivního zkušebnictví, obsahují zpravidla pouze omezené frekvenční pásmo s užitečnou informací. Nekonečné frekvenční spektrum, jako má Diracova funkce, nebo i sekvence MLS, způsobuje problémy při digitalizaci signálu. Tento fenomén se nazývá frekvenční aliasing a způsobuje fantomové zobrazení frekvencí vyšších, než je polovina vzorkovací frekvence do frekvencí na začátku spektra. Nejméně korektním řešením, a zároveň nejčastěji aplikovaným, je použití digitálních filtrů a prosté smazání nízkých frekvencí spektra. Méně moderním, do digitální doby nezapadajícím řešením, je signál filtrovat analogovým dolnoproustným filtrem před samotnou digitalizací. Právě k tomuto účelu slouží níže popsany vstupní analogový filtr s předzesilovačem. Posledním a zároveň nejkorektnějším řešením je signál zbavit vysokofrekvenčních složek na výkonové straně, před budičem.

5.3.4.1 Analogový filtr s předzesilovačem a zesilovačem

Zesilovač AM 22 od firmy 3S Sedlák obsahuje nastavitelný předzesilovač -20 až 50 dB s krokem 10 dB, nastavitelnou spodní propustí od 30 mHz, 300 mHz, 0,3 Hz, 3 Hz, 30 Hz, 300 Hz, 3 kHz, 30 kHz, 300 kHz a horní propust s rozsahy do 3 Hz, 30 Hz, 300 Hz, 3 kHz, 30 kHz, 300 kHz a výstupní zesilovač 0 až 50 dB s krokem 10 dB.



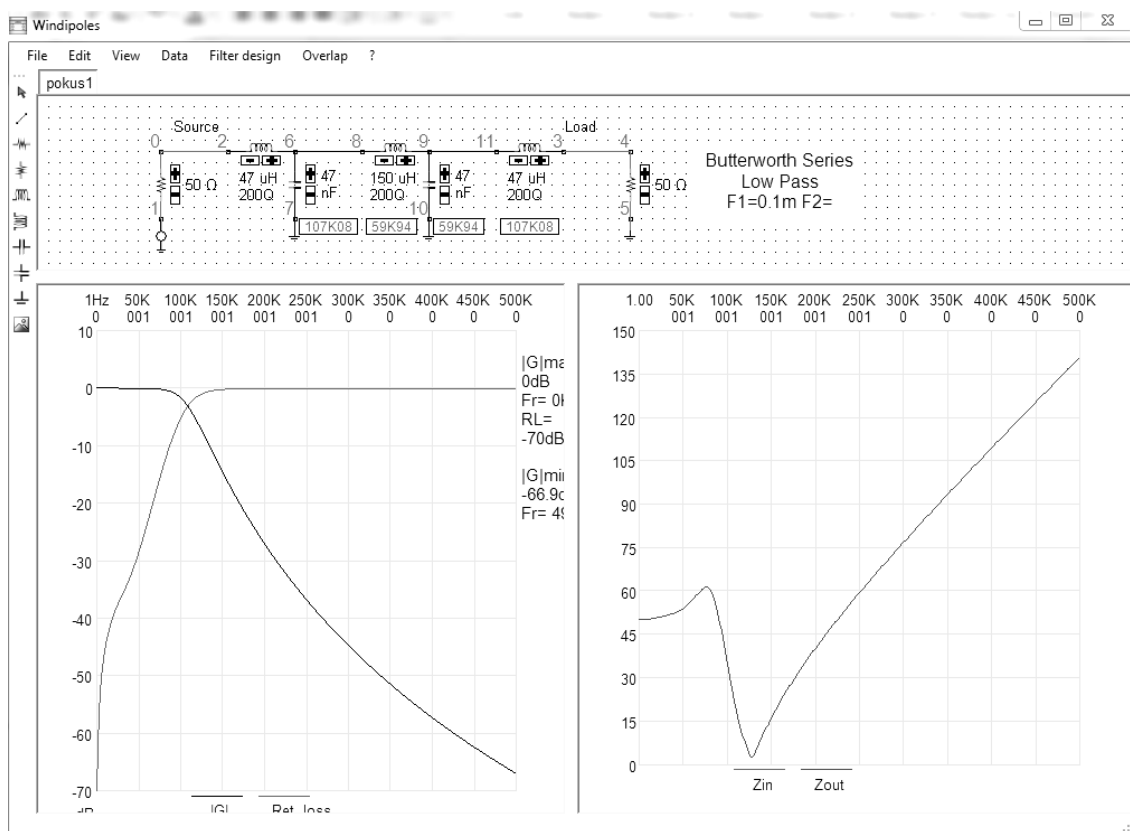
Obr. 5-21: Analogový filtr s předzesilovačem a zesilovačem

5.3.4.2 Výkonový analogový filtr 100 kHz

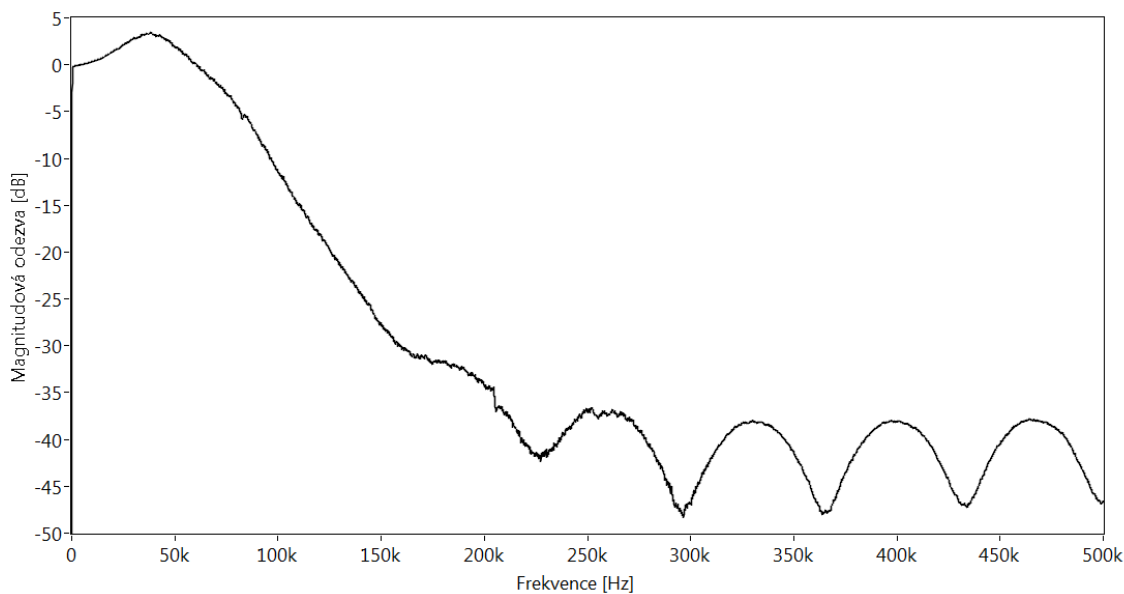
Operační zesilovače a další aktivní prvky se s úspěchem používají v konstrukci analogových filtrů. V tomto případě ale jejich použití z důvodu vysokého napětí a výkonů není možné. Jediným vhodným řešením jsou pasivní LC filtry. Filtr byl navržen pro vstupní i výstupní impedanci rovnou 50 Ω . Ovšem skutečná impedance zátěže se pohybuje v řádu k Ω . Impedanční nevyrovnanost spolu s nepřesností zakoupených cívek ($\pm 15\%$) a kondenzátorů ($\pm 10\%$) způsobuje zkreslení oproti návrhovým hodnotám (graf 5.14). Pro eliminaci elektromagnetické vazby jsou cívky umístěny v plechových pouzdrech spojenými se zemí.

Ve skutečnosti byly vyrobeny dva dolnoproputní filtry s identickými návrhovými hodnotami. První filtr typu π , vhodný pro zátěže s velkou indukčností (reproduktory), není dále popisován a druhý, filtr typu T, vhodný pro kapacitní zátěže (piezobudiče). Představou bylo vytvořit filtr, který by eliminoval vysoké frekvence budícího signálu a také vyhladil přechodové jevy obdélníkového signálu. Reálná přenosová

charakteristika filtru, změřena MLS signálem (graf 5.14), vykazuje neočekávané zesílení v oblasti 40 kHz oproti návrhovému programu (graf 5.13).



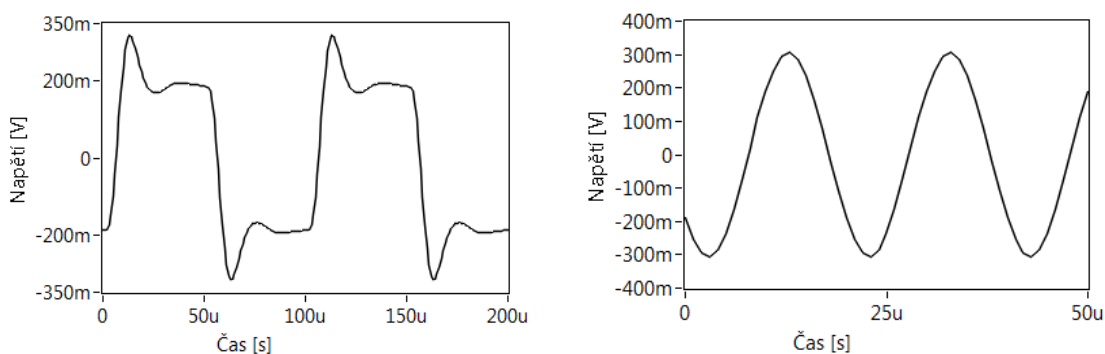
Graf 5-12: Simulace analogového filtru v programu Windipoles



Graf 5-13: Frekvenční charakteristika filtru změřená MLS signálem

Názorně byla funkčnost filtru ověřena i na fundamentálních signálech. Například obdélníkový signál o frekvenci 50 kHz je transformován na čistou sinusoidu, protože první harmonická frekvence obdélníkového signálu (150 kHz) je filtrem utlumena na úroveň -30 dB. Jedná se o jednoduchý způsob, jakým lze filtrací vytvořit monotónní signál. Pro účely měření MLS signálem je ovšem důležitější případ 10 kHz obdélníku (graf 5-14 vlevo).

Filtr s dolní propustí navíc zmenšuje strmost náběhových a vzestupných hran signálu. To je důležité, protože piezobudiče jsou schopny generovat signál s rychlostí náběhu (Slew rate) desítek V/ μ s, zatímco elektronické komponenty zesilovače jsou schopny generovat signál s rychlostí náběhu 600 V/ μ s. Chování budiče v přechodových stavech je s filtrací lépe předvídatelné.



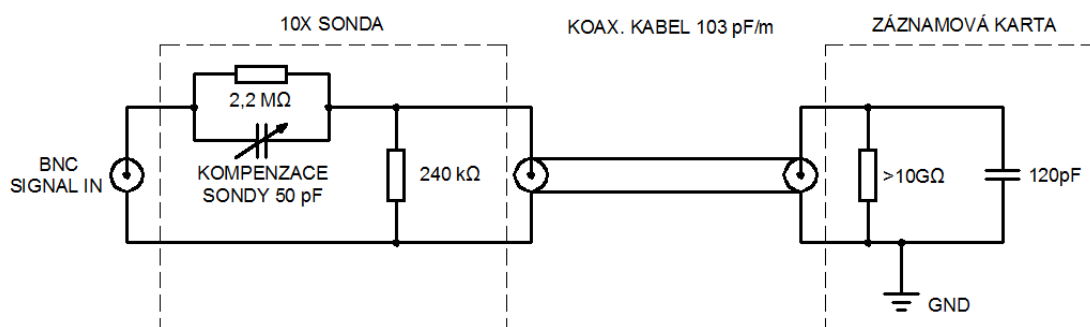
Graf 5-14: Obdélníkový signál po filtraci. Vlevo 10 kHz, vpravo 50 kHz

5.3.4.3 Výkonový analogový filtr 28 kHz

Druhý analogový LC filtr, který byl na zakázku vyrobený pro měření ultrazvukové nelineární spektroskopie, je pětistupňový a navíc, soudě podle ručně namotávaných cívek, impedančně vyvážený pro vysokoimpedanční zátěže, jakou je piezoměnič.

5.3.5 Sonda 10X

Rozsah analogového vstupu záznamové karty (± 10 V) je nedostatečný pro měření signálu na silové straně. Standardní osciloskopické sondy nemají dostatečný rozsah nastavitelného impedančního přizpůsobení, protože typické osciloskopy, pro které jsou sondy určeny, mají vnitřní 1/6 kapacitanci ve srovnání s použitou záznamovou kartou.



Obr. 5-22: Schéma zapojení dělící sondy 10X



Obr. 5-23: Dělící sonda 10X

5.3.6 Stabilizovaný zdroj napětí

Pro napájení binárního zesilovače je použit stabilizovaný zdroj napětí Agilent HP 6645A. Výhodou je možnost komunikace s PC přes sběrnici GPIB, takže program pro měření signálem MLS automaticky mění amplitudu generovaného signálu. Změna intenzity budícího signálu je jednou z nelineárních spektroskopických metod dále využitých v této práci. Regulace je možná v rozsahu 0-120 V, 0-1,5 A při špičkovém zvlnění 7 mV.



Obr. 5-24: Stabilizovaný zdroj napětí HP 6645A

5.4 Výběr budiče a snímače

Klíčovým prvkem měřicí sestavy jsou koncové elementy, které převádí elektrickou energii v mechanické kmity a zpět. Testování signálem MLS klade vysoké požadavky na budič, protože musí být schopen generovat signál o velkém frekvenčním rozsahu. Jak vyplývá z obr. 4-3, v ideálním případě od 0 Hz po frekvenci generování sekvence f_{gn} , např. 100 kHz. Z konstrukčního hlediska je nemožné vyrobit širokopásmový budič pro frekvence slyšitelného pásma a zároveň pro ultrazvukové frekvence.

Pro účely nedestruktivního testování a zkoušení ultrazvukem se téměř výhradně používají piezoelektrické měniče, jejich dělení je pak založené na konstrukci, počtu aktivních elementů, typu převládajícího vlnění a vazebním prostředí, kontaktní, nebo ponorné. Pro úplnost, existují i budiče určené pro vazbu vzduchem s aktivním piezoelektrickým nebo kapacitním prvkem. Ovšem tyto budiče jsou efektivní v úzkém pásmu rezonančního režimu, tudíž nevhodné pro testování MLS signálem. Navíc na rozhraní vzduchu a testovaného materiálu se vlivem akustického odporu (acoustic mismatch), odrazí velká část signálu. Stejný fenomén nastává na přechodu vzorek-vzduch u bezkontaktních snímačů, ale v případě citlivých mikrofonů je útlum přijatelný, často ani zachycený signál nepotřebuje zesílení. Viz kapitola 5.7 (Volba vazebního prostředí).

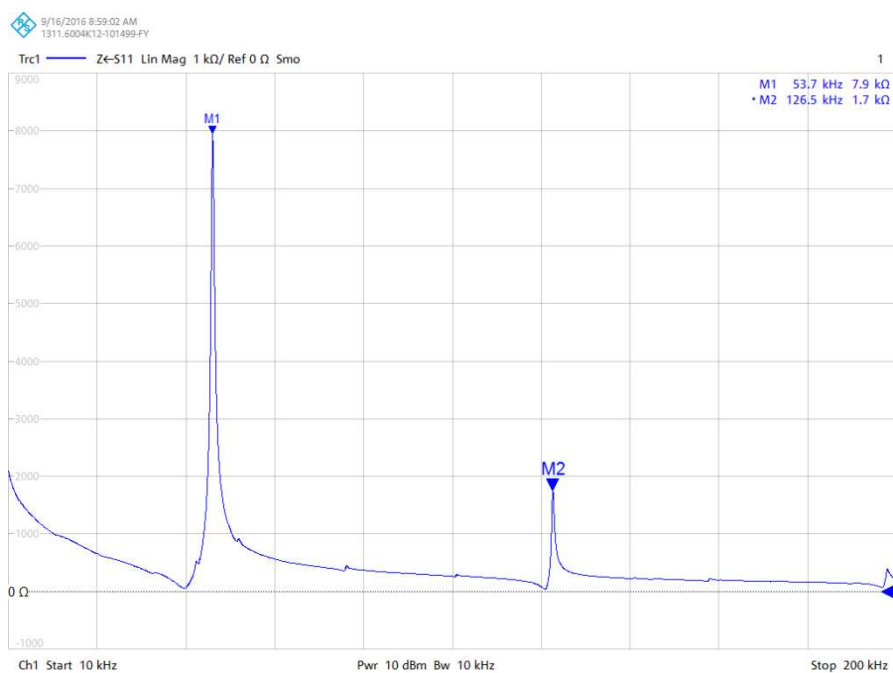
5.4.1 Piezobudič PZT disk [A7]

Rezonanční frekvence aktivní části budiče se odvíjí od vlastních rozměrů a mechanických vlastností materiálu. Výrobci PZT keramických disků tento údaj uvádí jako tloušťkovou rezonanční frekvenci. Na obr. 5-25 je komerčně dostupný PZT disk

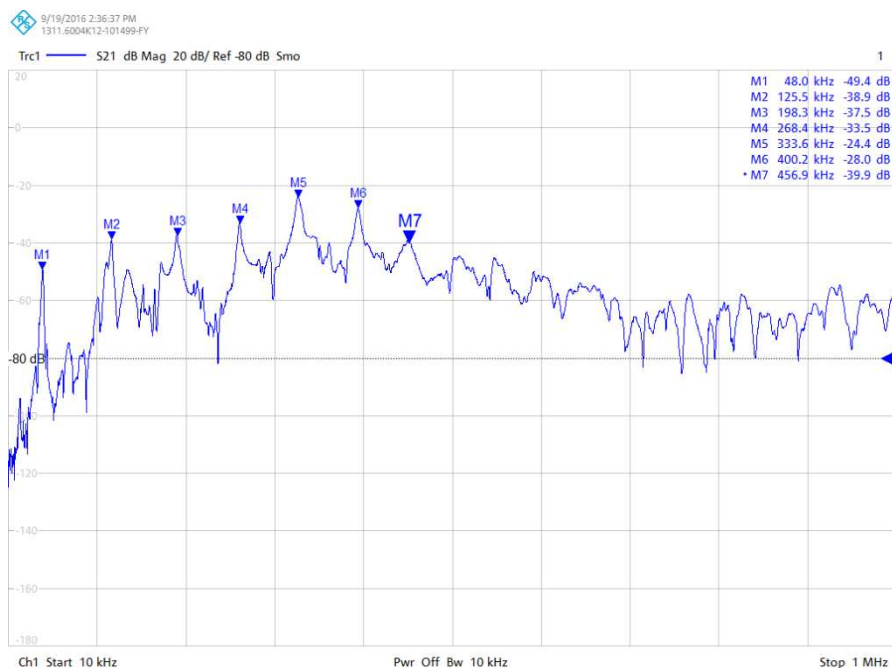
určený pro ultrazvukové čističky. S rozměry 50 mm x 2,5 mm, tloušťkovou rezonanční frekvencí 40 ± 2 kHz a výkonem až 35 W byl budič využit k ověření použitelnosti metody MLS a dále pro srovnání s metodou IE.



Obr. 5-25: PZT disk 40 kHz



Graf 5-15: Impedanční charakteristika PZT disk 40 kHz



Graf 5-16: Přenosová charakteristika PZT disk 40 kHz a MIDI senzoru (vazba voskem)

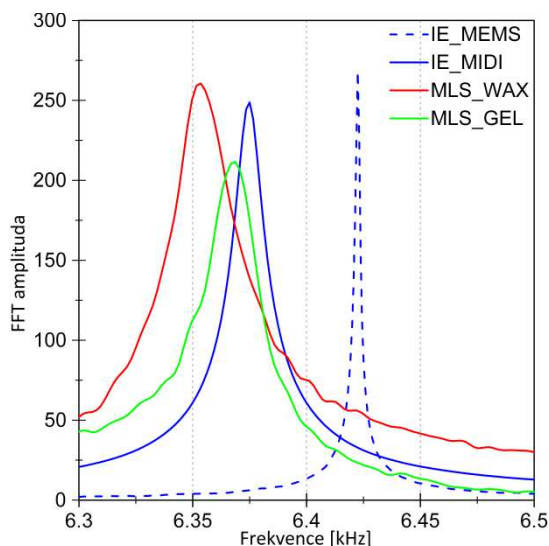
Impulzní odezva (IR) kompletně definuje akustické vlastnosti testovaného vzorku (DUT). Získat IR je možné přímo po úderu kladívka, metoda IE, nebo výpočtově, křížovou korelací z MLS signálu. Ve frekvenčním spektru IR mohou být spatřeny píky odpovídající základní frekvenci a vyšším harmonickým frekvencím, distribuovaným se stejnou roztečí. Pouze materiály zcela izotropní a rozměry se podobající 1D elementu se budou chovat v souladu s popsanou teorií. Dále je žádoucí, aby testovaný vzorek měl co nejmenší koeficient útlumu, čímž se zvýší doba, po kterou se dá signál zaznamenávat. Tyto vlastnosti nejlépe splňují kovy, proto byla pro následující test vybrána ocelová tyč s plným kruhovým průřezem 7,99 mm a délce 400 mm. Vypočtená hustota byla 7778,2 kg/m³.

Metoda IE byla měřena všesměrovým mikrofonním čidlem ADMP401 (MEMS) s vazbou přes vzduch, umístěném blízko DUT na straně protilehlé nárazu. Metody IE i MLS byly také zaznamenány s piezoelektrickým snímačem DAKEL MIDI a spojeny se vzorkem pomocí včelího vosku. Tento snímač je malé velikosti (ø 6,5 mm) ve srovnání s DUT, nicméně výsledky potvrdily jeho významný vliv na impulzní odezvu systému.

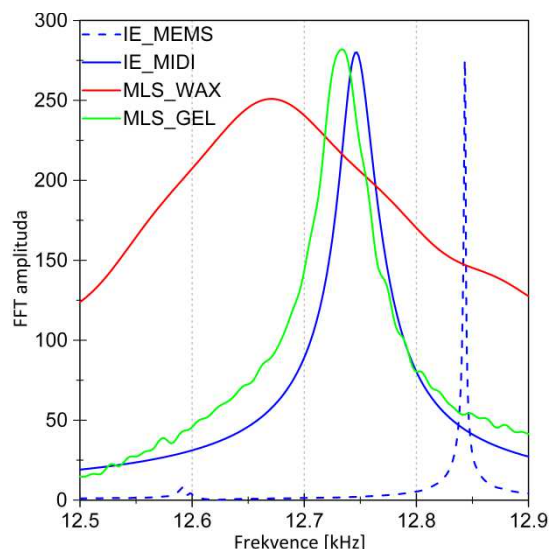
Nejprve se zaměříme na porovnání výsledků IE metody. Grafy 5-17 až 20 znázorňují základní frekvenci a 3 vyšší harmonické frekvence. Modrá přerušovaná čára odpovídá měření bezkontaktním čidlem. Nulová přidaná hmotnost mikrofonního snímače neovlivňuje testovaný systém, tudíž může být považována za referenční

hodnotu pro všechny způsoby měření. Amplitudy píků, prezentovaných na obrázcích, byly kvůli zřetelnosti normalizovány. Z hlediska Youngova modulu je nejcennější informací pozice základní frekvence (obr. 5-17). Přesné hodnoty frekvence jsou uvedeny v tab. 5-3. Prvním důležitým poznatkem jsou ostré frekvenční vrcholy získané MEMS snímačem oproti vrcholům změřeným snímačem MIDI. Také všechny vrcholy jsou posunuty směrem k nižším frekvencím o cca 1 % z nominální hodnoty. Za účelem vysvětlení tohoto fenoménu bylo měření IE opakováno s MIDI snímačem spojeným s DUT a údaje byly měřeny pomocí bezkontaktního MEMS senzoru. Píky v této sestavě byly nalezeny na téměř stejných místech (0,05% posun k nižší frekvenci). To znamená, že MIDI snímač měří správně, ale vzhledem k vyšší hmotnosti snímače se měření zkreslí. Vzhledem k tomu, že i MLS metoda využívá stejný MIDI snímač, posun píků k nižším frekvencím je pochopitelný. Ve skutečnosti pozice vrcholů IE_MIDI a MLS_GEL je ve všech případech velmi blízká. Překvapivé je, že poloha základní frekvence pro voskem vázaný budič a vzorek je také velmi blízká k IE_MIDI, přestože hmotnost budiče je 30krát větší než hmotnost MIDI snímače.

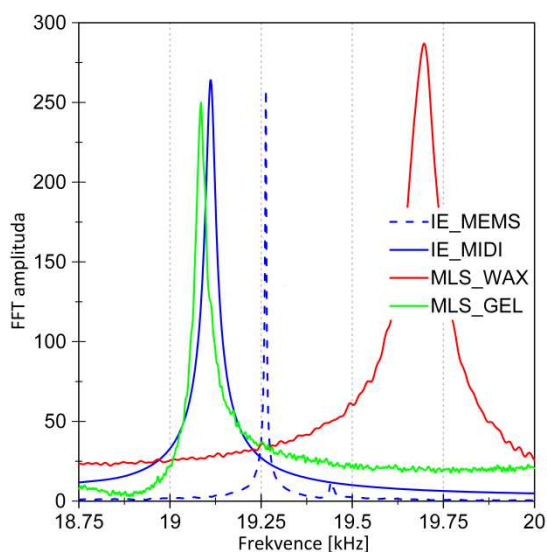
Přidaná hmotnost je velmi problematická. Bohužel, vzduchem spojený senzor MEMS nedokáže zachytit vysoké frekvence. V případě ocelové tyče se limit použitelnosti dosahuje úctyhodných 50 kHz, ale pro stavební materiály je přibližně poloviční.



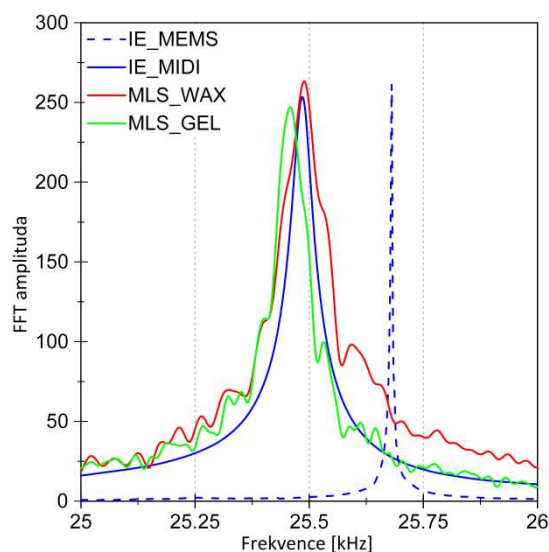
Graf 5-17: Základní frekvence



Graf 5-18: První harmonická frekvence



Graf 5-19: Druhá harmonická frekvence



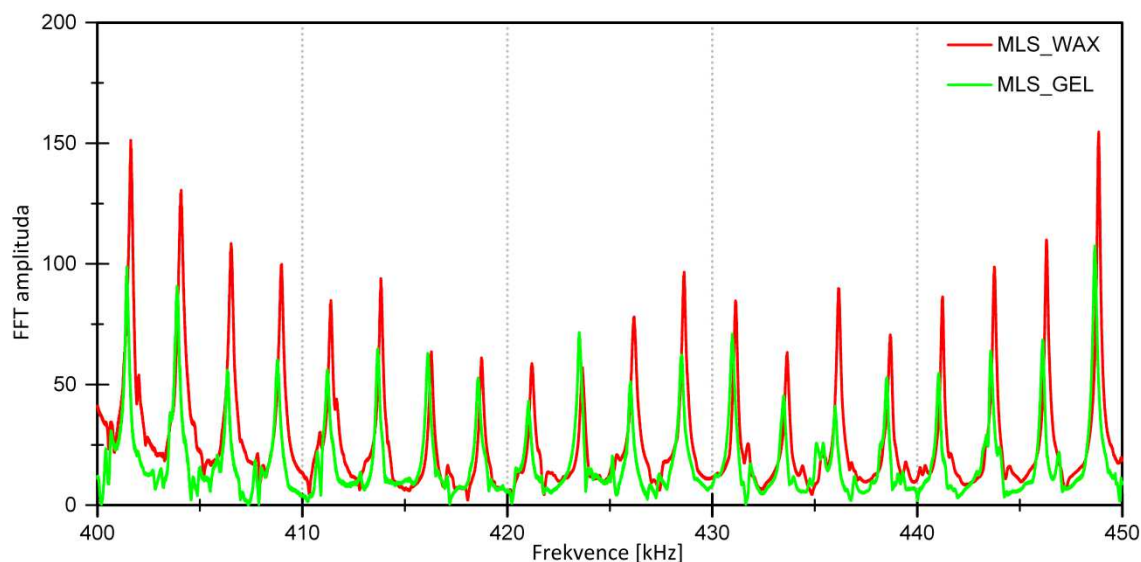
Graf 5-20: Třetí harmonická frekvence

Tab. 5-3: Pozice píků

n	MLS_WAX	Δ [%]	MLS_GEL	Δ [%]	IE_MIDI	Δ [%]	IE_MEMS
0	6,354	-1,07	6,367	-0,87	6,375	-0,74	6,423
1	12,661	-1,42	12,732	-0,87	12,747	-0,75	12,843
2	19,696	2,25	19,085	-0,92	19,111	-0,79	19,263
3	25,488	-0,75	25,456	-0,87	25,486	-0,76	25,680
4	31,252	-2,62	31,796	-0,93	31,839	-0,80	32,094
5	NA	0	38,130	-0,9729	38,177	-0,8529	38,505
6	NA	0	44,442	-1,041	44,475	-0,9673	44,909
7	50,954	-0,80	50,698	-1,30	50,739	-1,22	51,364
8	56,348	-2,48	56,886	-1,55	56,967	-1,41	57,782
9	64,069	-0,20	62,848	-2,10	62,808	-2,16	64,198
10	NA	0,00	NA	0,00	NA	0,00	70,613
11	74,579	-3,17	74,578	-3,17	74,727	-2,98	77,018
12	81,926	-1,85	81,497	-2,36	NA	0,00	83,466
13	NA	0,00	90,095	0,24	90,095	0,24	89,881
14	NA	0,00	95,784	-0,53	96,041	-0,27	96,297
15	NA	0,00	101,811	-0,88	101,959	-0,73	102,712

Dále se zaměříme na způsoby spojení budiče a vzorku pro metodu MLS. Na grafu 5-21 jsou prezentovány ostré vrcholky vyšších harmonických frekvencí. V některých případech je jejich pozice invariantní na způsobu spojení budiče a vzorku. Z tabulky 5-3 vyplývá, že vrcholy získané metodami IE i MLS jsou na obdobných pozicích. Bohužel, tento jev může být ověřen pouze v překrývající se oblasti obou metod. Jak vyplývá z problematiky nekonečně krátkého pulzu metody IE (kapitola 2.3), amplituda reálného impulzního signálu prudce klesá s rostoucí frekvencí. Zjištěný limit

ztráty signálu v šumu pro ocelovou tyč je velice příhodných 160 kHz, ve srovnání s třetinovými hodnotami cementových materiálů. Na druhé stranu MLS píky na frekvencích pod 160 kHz jsou často rozechvělé a musí být vyhlazovány konvolucí. Nicméně píky vyšších frekvencí jsou ostré a jejich distribuce naznačuje opakující se vzor vyšších harmonických frekvencí. Další detaily z měření lze vidět v tabulce 5-4.



Graf 5-21: Harmonické frekvence pozorovatelné v celém spektru měření MLS

Tab. 5-4: Shrnutí měření s PZT diskem na ocelové tyči

	MLS_WAX	MLS_GEL	IE_MIDI	IE_MEMS
Počet vzorků	655k	655k	800k	2M
Délka impulzní odezvy [ms]	4	7	100	1139
Peak-to-peak amplituda [V]	2,21	1,03	2,07	2,49
Maximální rozpoznatelný pík [kHz]	625 (fs/2)	625 (fs/2)	89	277
Základní frekvence [kHz]	6,35	6,37	6,38	6,42
Vypočítaný dynamický modul pružnosti [GPa]	200,7	201,5	202,0	205,1

Hlavním poznatkem této studie je, že MLS signál je schopen vybudit vzorek a po následném zpracování signál obsahuje více informací než při testu metodou IE. Bohužel, většina těchto informací se nachází v oblasti vysokofrekvenčního spektra, na rozdíl od metody IE, a tím je obtížné obě metody srovnávat. Jak se ukázalo pozdějším výzkumem, konstrukce samotného PZT disku není vhodná pro generování nízkých frekvencí. Tlumící těleso (backing mass), které je součástí každého komerčního UT budiče, má dvě funkce. Jednak vlastní hmotností, potažmo rezonanční frekvencí, způsobí směrovost vysílaného signálu a zároveň vyladí budič jen na určitý frekvenční rozsah, ve kterém je provozován s největší účinností. Potlačené, nebo úplně eliminované frekvence způsobují nespojitosti, které komplikují měření s MLS signálem.

Budič bez tlumícího tělesa by vysílal signál na obě strany a při použití vazebního materiálu by sledovaný vzorek převzal funkci tlumícího tělesa, což by nepředvídatelně ovlivňovalo měření, nemluvě o signálu, který by se vysílal z volné strany budiče do vzduchu. Samotný PZT disk není nevhodný jako kontaktní budič a nebude dále využit pro účely testování stavebních materiálů v této práci. I přes zmíněnou nevhodnost budiče je podstatné podotknout, že hodnoty dynamického Youngova modulu pružnosti se liší od ověřené metody IE o pouhých 0,13 %.

Experimentální ověření chování samotného PZT disku bylo zásadním krokem ve vývoji metody, protože PZT disk skýtal potenciál teoreticky ideálního spektra bez rezonančních píků, až po hodnotu vlastní tloušťkové rezonanční frekvence.

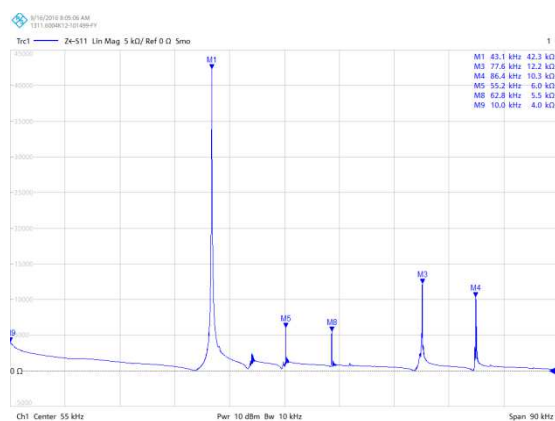
5.4.2 Piezobudič Langevin

Budič typu Langevin byl původně vyvinutý pro sonary ponorek v období první světové války. Nyní se využívá i v průmyslových aplikacích jako: ultrazvukové čističky, svářečky na plast, pro mixování bionafty, anebo k zabránění růstu organismů na trupu lodí. Konstrukce budiče je navržena se zřetelí maximalizovat výkon. Jeden a více piezoprstenců jsou pevně sevřeny šroubem mezi dvě tlumící tělesa a tak jsou piezokeramické elementy trvale v tlaku a jejich výchylky za provozu jsou malé. PZT keramika má dielektrickou pevnost (přes 8 MV/m), takže teoretické napájecí napětí budiče je v řádu kV [61], avšak síly vnitřního pnutí by způsobily popraskání keramiky už při mnohem nižších napětích. Proto konstrukce Langevinova budiče zajišťuje restrikcí piezoelementů a ty potom mohou dosáhnout i kilowattových výkonů. Tak vysokých výkonů je mimo jiné docíleno volbou tlumících těles s ohledem na dosažení silné rezonance pro pracovní frekvenci [62].

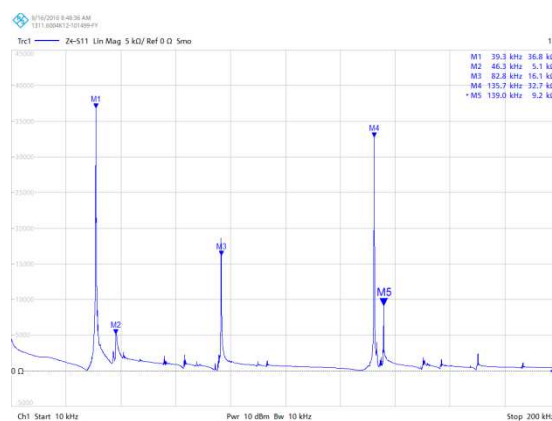
Langevinovy budiče určené do průmyslových čističek (obr. 5-26) byly testovány pro použití s MLS signálem, ale pro významné impedanční píky (obr. 5-23 a 24) nebyly dále používány pro testování stavebních materiálů.



Obr. 5-26: Budiče typu Langevin 120 kHz a 40 kHz určené pro ultrazvukové čističky



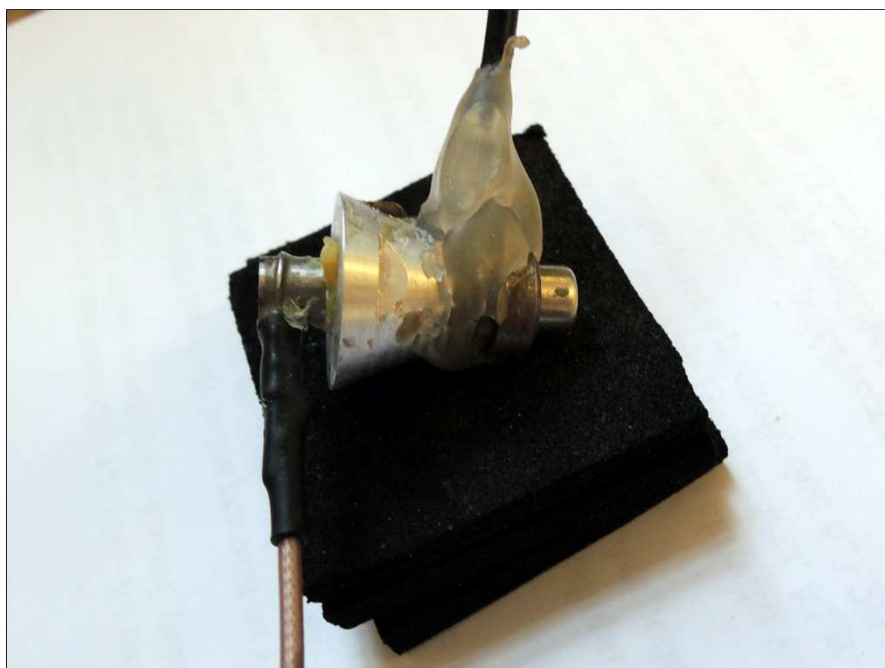
Graf 5-22: Impedanční charakteristika Langevin budiče 40 kHz



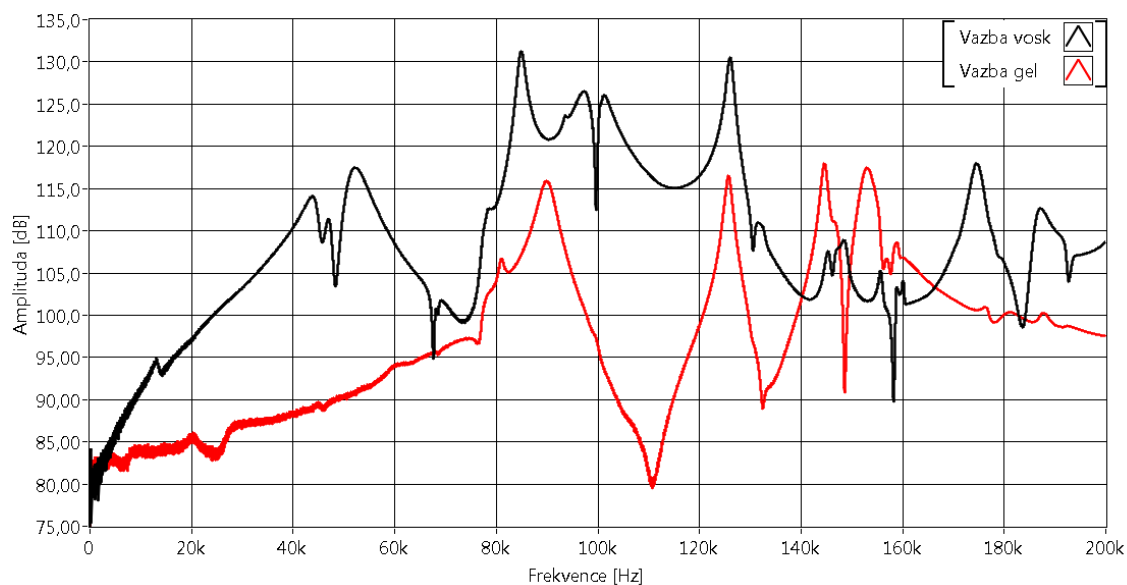
Graf 5-23: Impedanční charakteristika Langevin budiče 120 kHz

Vyvíjená testovací metoda MLS potřebuje budič o velkých výkonech, aby se mohla prozvučet rozměrná tělesa a testovat nelineární chování materiálu. Langevinova konstrukce budiče je proto ideální, je ale potřeba navrhnout tlumicí tělesa pro eliminaci rezonančních píků a upravit kontaktní plochu budiče pro lepší připevnění ke zkoušenému vzorku. Na zakázku vyrobený budič, pracovní označení CONE (obr. 5-27), je určený pro testování NDT metodou nelineární spektroskopie. Jak vyplývá z přenosové (graf 5-24 a 25) a impedanční charakteristiky (obr. 5-26) naměřené

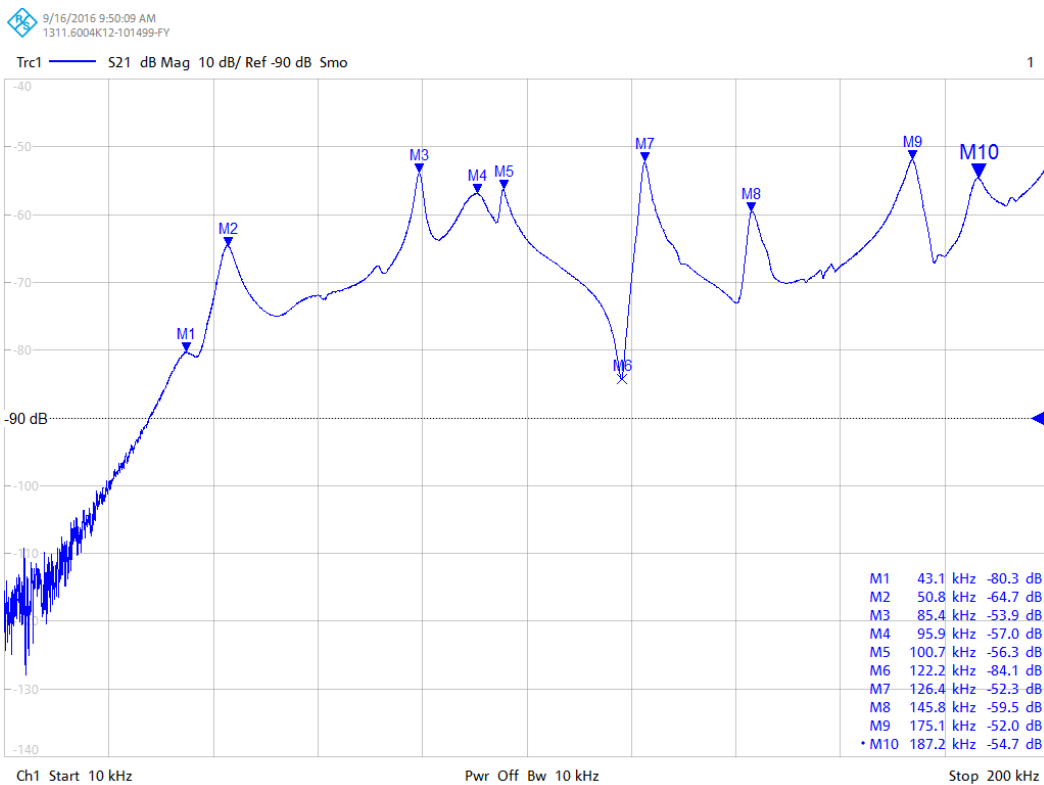
vektorovým analyzátořem, budič je vhodný pro testování nad 10 kHz, což je podrobněji rozebráno v kapitole: 5.6 Získání přenosové funkce měřicího řetězce a vzorku.



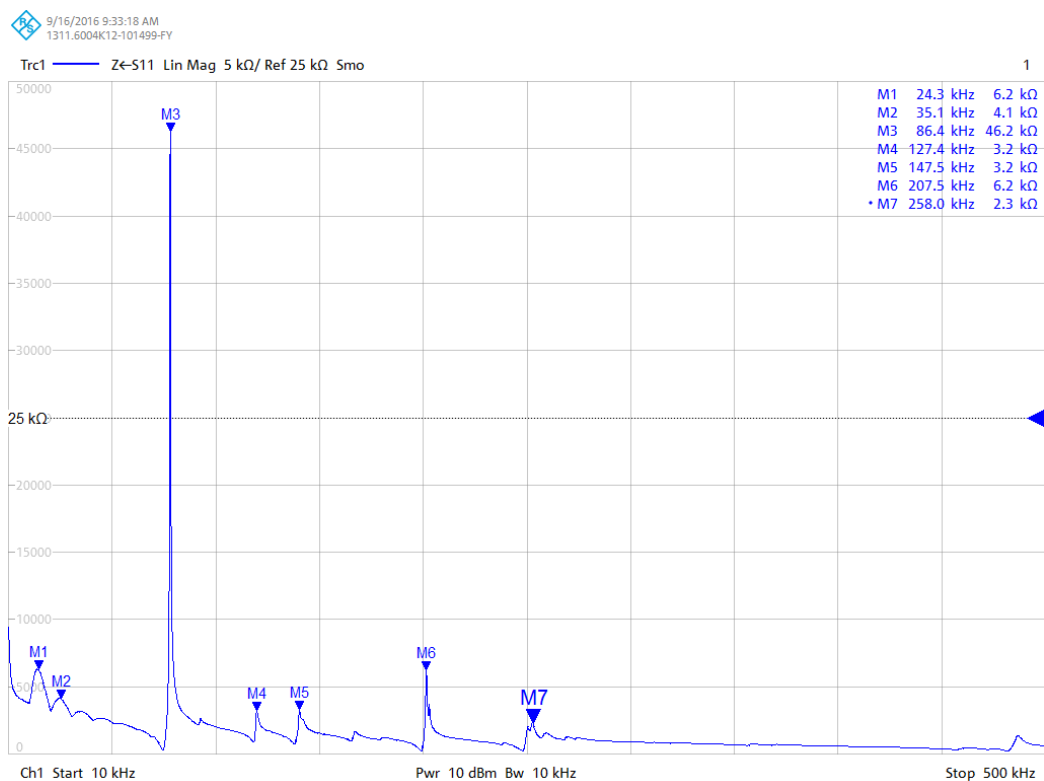
Obr. 5-27: Měření přenosové charakteristiky budiče Langevin (označení CONE) a snímače MIDI s vazbou voskem



Graf 5-24: Přenosová charakteristika budiče CONE a snímače MIDI



Graf 5-25: Přenosová charakteristika budiče CONE a snímače MIDI, vazba vosk, měřeno vektorovým analyzátořem



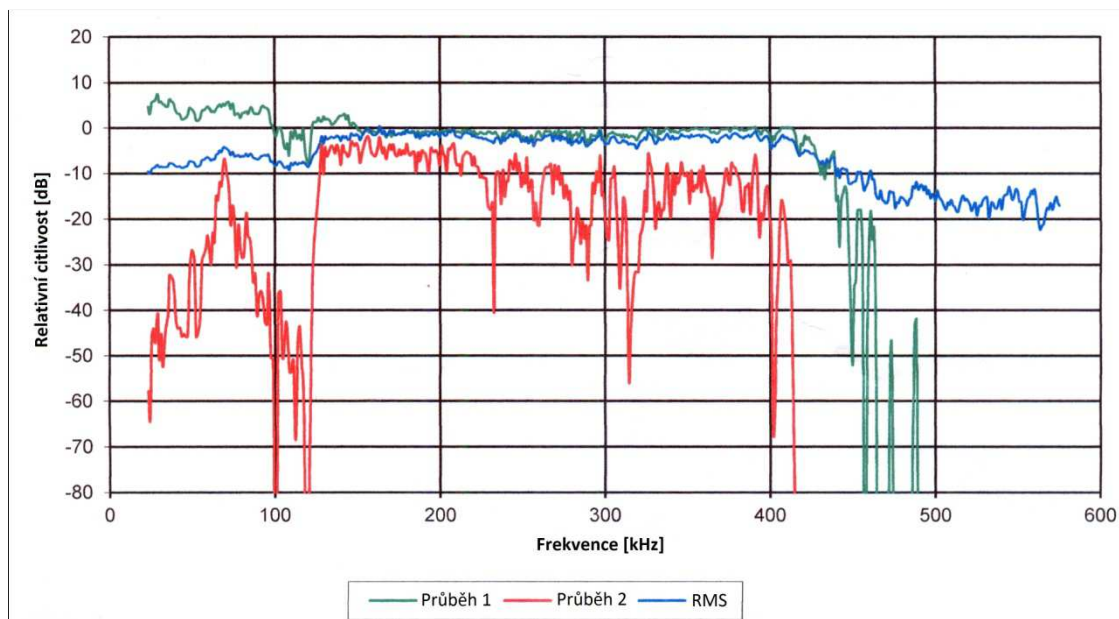
Graf 5-26: Impedanční charakteristika budiče CONE

5.4.3 Piezosnímač MIDI

Konstrukce piezoelektrických snímačů se výrazně liší od Langevinových budičů. Aktivní PZT prvek s připevněným tlumícím tělesem jsou umístěny v kovovém obalu, aby se potlačilo vlnění přicházejících z jiných směrů. Konkrétně snímač MIDI od firmy DAKEL je určen pro měření akustické emise. Kontaktní plocha snímače, 6 mm, umožňuje připevnění na vzorky s nehladkým povrchem pomocí vosku. PZT keramika třídy 200 je citlivější, než ty použité v Langevinových budičích. PZT disk, který je uvnitř snímače, není monolitický, nýbrž je nařezán ve dvou směrech a prostory jsou vyplněny epoxidem. Piezoelektrický kompozit typu 1-3 má menší hustotu materiálu a potažmo i menší akustický odpor s testovaným tělesem, zvýšenou flexibilitu, snížené vnitřní pnutí, ale především zvýšenou citlivost, protože se zvýší elektroakustická efektivita [63]. Individuální sloupce piezoelektrických materiálů generují uniformní vlnové pole, což je důležité pro ultrazvukové sondy, které fungují zároveň jako vysílače.



Obr. 5-28: Snímač MIDI

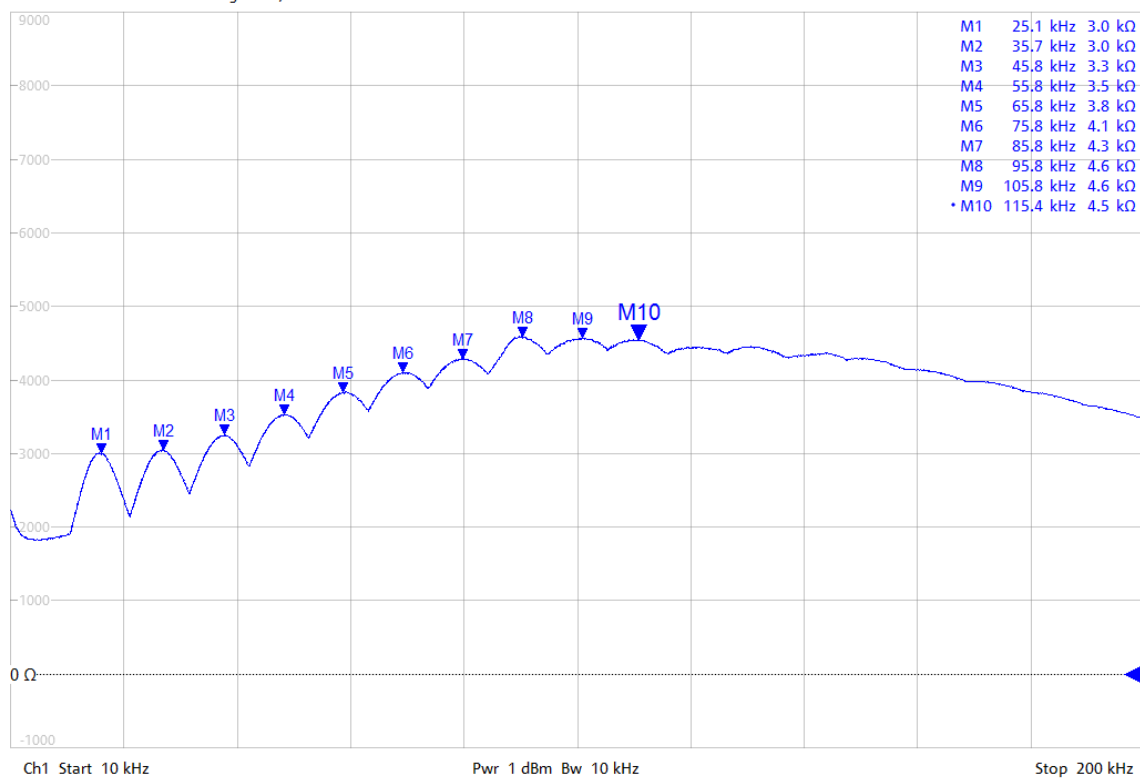


Graf 5-27: Frekvenční charakteristika snímače MIDI udávaná výrobcem

9/16/2016 9:13:32 AM
1311.6004K12-101499-FY

Trc1 — Z←S11 Lin Mag 1 kΩ/ Ref 0 Ω Smo

1



Graf 5-28: Impedanční charakteristika snímače MIDI změřená vektorovým analyzátořem

Grafy přenosové funkce a impedance MIDI snímače naznačují vhodnost pro MLS testování. MIDI snímač se někdy používá i jako budič, ale pouze za předpokladu

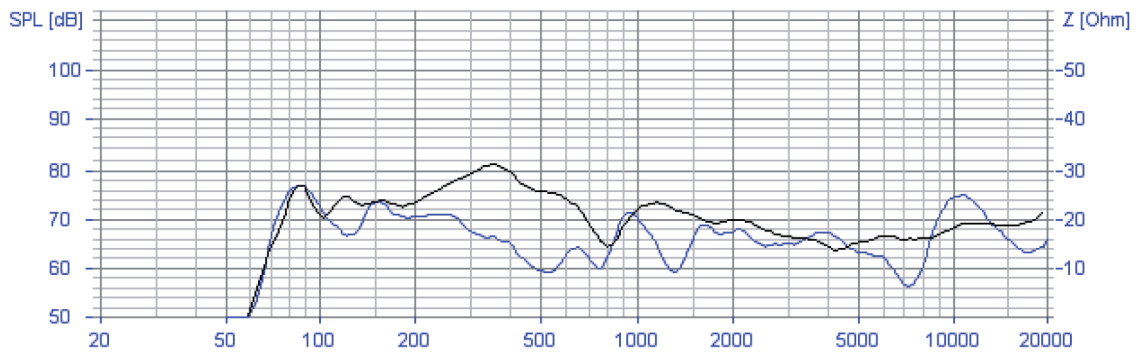
naladění na rezonanční frekvenci vzorku. I přes nižší napětí nutné k rezonančnímu buzení se dá očekávat brzká degradace jeho vlastností.

5.4.4 Kontaktní reproduktor jako budič

Sekvence maximální délky s použitou aparaturou nabízí možnost inspekce chování vzorku až do frekvence 0,5 MHz. Ovšem informace interpretovatelné z hlediska fyzikálně materiálových vlastností jsou obsaženy v základní frekvenci vzorku a nejvýše třech následujících harmonických frekvencích. Popsaná oblast frekvencí záleží především na rychlosti šíření ultrazvukových vln a rozměrech vzorku. Přibližně se dá vypočítat podle vztahu 2-3. Inspekční oblast pro cementový vzorek o rozměrech 400x100x100 mm začíná na 0,8 kHz a končí na 25 kHz. Z toho vyplývá, že se pohybujeme především ve slyšitelném pásmu zvuku, pro nějž vlastnosti elektrodynamických reproduktorů předčí piezobudiče.

Klasický membránový reproduktor kvůli vysokému útlumu vazbou přes vzduch, kapitola 5.7, nepřípadá v úvahu pro testování stavebních materiálů, ale existuje i varianta kontaktního reproduktoru (Tactile transducer). Jako membrána reproduktoru slouží deska, na kterou se reproduktor montuje. Frekvenční charakteristika reproduktoru je úzce spjatá s hustotou a tloušťkou oscilovaného materiálu (obr. 5-29). Kontaktní reproduktory se používají v místech ohrožených vandalizmem, např. semaforey a reklamní vitríny.

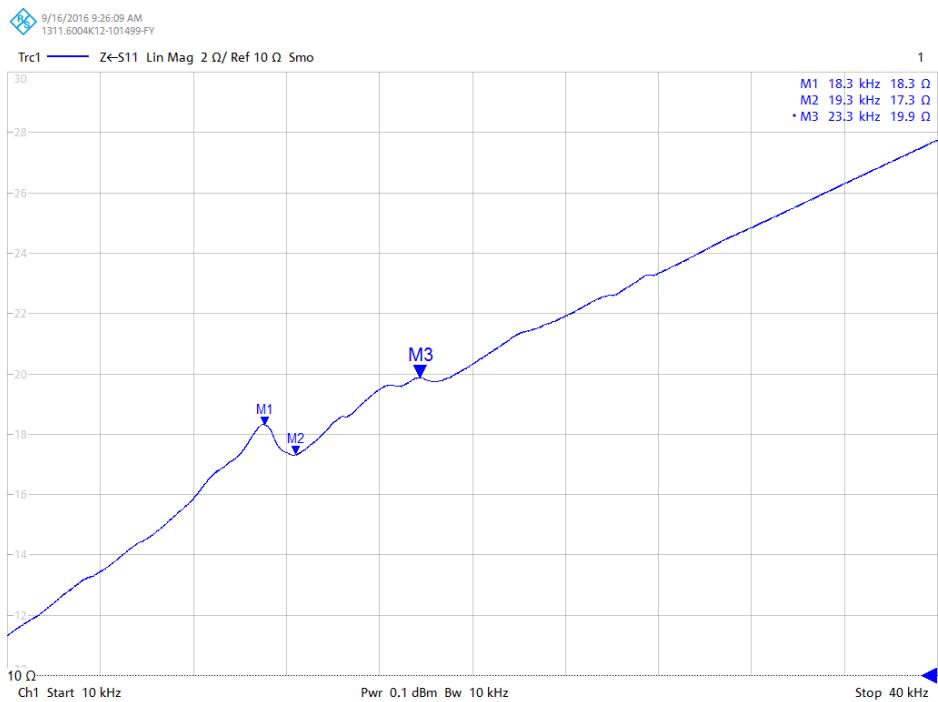
Pro účely nedestruktivního testování byl speciálně upraven reproduktor EX60S výrobce VISATON. Při zohlednění ztrát měřicí sestavy je při 31 V schopen dosáhnout maximálního příkonu 25 W. Amplituda oscilací, které je reproduktor schopen generovat, jsou dostatečné pro pozorování nelineárního chování materiálu i při použití vazby přes gel, což značně urychlí přípravnou fázi testování.



Graf 5-29: Frekvenční odezva reproduktoru EX60S měřená výrobcem pro desky HDF (černá) a MDF (modrá) [64]



Obr. 5-29: Kontaktní reproduktor EX60S, samotný (vlevo), osazený (vpravo)



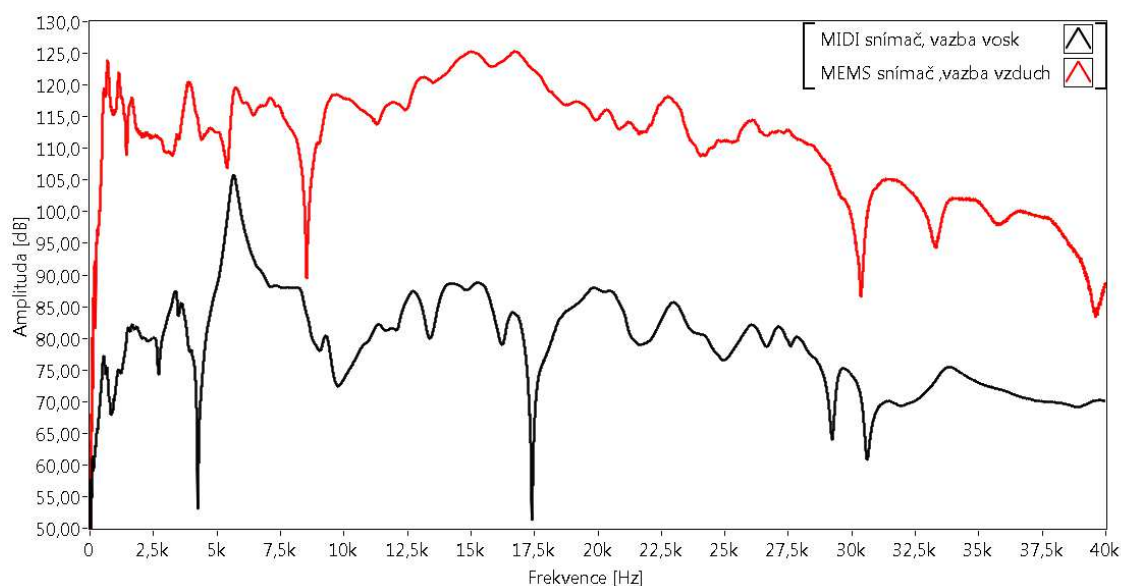
Graf 5-30: Impedanční charakteristika EX60S

Lineární průběh impedanční charakteristiky v pásmu mimo a na počátku RF je očekávatelné, protože náhradním zapojením elektrodynamického reproduktoru je odpor a cívka v sérii. Absolutní hodnota impedance Z , která je vynesena na grafu 5-30, se spočítá jako:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.25)$$

Kde R je reálná složka impedance odporu (8Ω) a X je imaginární složka tvořená impedancí cívky, která je lineárně závislá na frekvenci.

$$X = j2\pi fL \quad (5.26)$$



Graf 5-31: Přenosová charakteristika budiče reproduktor EX60S a snímače MIDI/MEMS

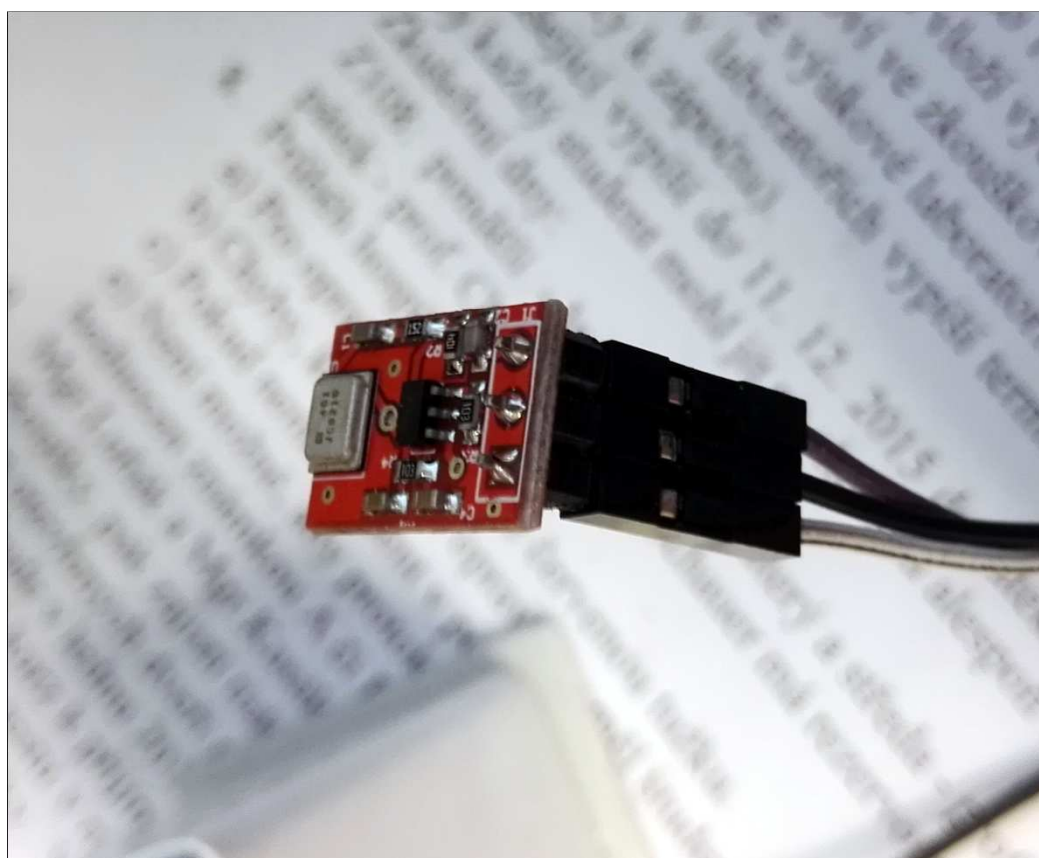
5.4.5 MEMS mikrofon

Mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS) nachází uplatnění nejen v elektronových mikroskopech, ale i v běžné elektronice. MEMS mikrofony jsou pro své miniaturní rozměry (4,7 mm) nenahraditelnou součástí dnešní elektroniky. Podle dokumentace výrobce [65] je MEMS mikrofon ADMP401 vhodný pro použití jak v blízkém, tak vzdáleném pásmu, má ideálně plochou frekvenční odezvu od 100 Hz do 15 kHz, citlivost -42 dBV a SNR 62 dBA.

Dle změřené přenosové charakteristiky (obr. 5-31) je MEMS mikrofon použitelný do cca 40 kHz, proto je vhodný v kombinaci s kontaktním reproduktorem.

Navíc vazbou přes vzduch mikrofon nijak neovlivňuje měřený vzorek (prokázáno v kapitole 5.4.1 Piezobudič PZT disk). Impulzní odezva je delší, protože není zatlumená kabelem připevněného čidla ke vzorku.

Nevýhodou mikrofonního snímače je jeho nesměrovost. Měření může být ovlivněno méně intenzivním vlněním, které neprochází vzorkem. Oproti kontaktnímu snímači MIDI, který je citlivý na vlnění pouze v jenom směru, mikrofon dokáže snímat kromě rychlých podélných vln i vlny povrchové a smykové s oběma polarizacemi. Vzhledem k tomu, že ultrazvukové NDT metody ve stavebnictví se soustředí výhradně na podélné – kompresní vlnění, frekvenční spektrum může být hůř interpretovatelné.



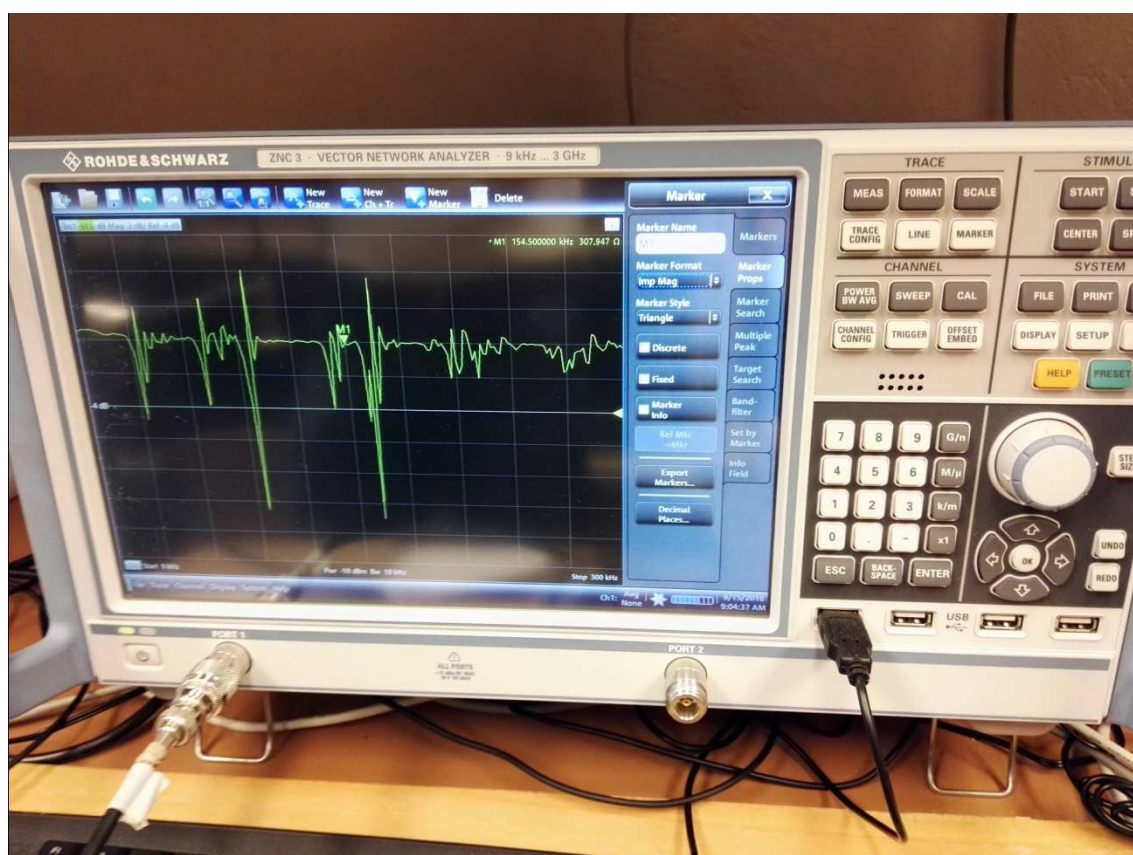
Obr. 5-30: Mikrofonní senzor MEMS ADMP401 a předzesilovačem

5.4.6 Měření přenosových charakteristik a impedancí budičů

Primárně pro zjištění impedančních charakteristik budičů a snímačů byl použit vektorový analyzátor Rohde & Schwarz ZNC3 s frekvenčním rozsahem 9 kHz až 3 GHz a dynamickým rozsahem 130dB. Měřila se jednak impedance v odrazovém režimu (Z-S11), jednak útlum při přenosu mezi budičem a snímačem (S21). Byl použit

lineární Sine sweep režim s 5001 body, což odpovídá rozlišovací schopnosti 18 Hz (při rozsahu do 100 kHz).

Uvedené grafy jsou průměrovány z 10 měření a následně vyhlazeny (0,05 %). Přenosové charakteristiky naměřené vektorovým analyzátelem slouží především ke srovnání s měřením MLS signálem na navrhované testovací sestavě.



Obr. 5-31: vektorový analyzátor Rohde & Schwarz ZNC3

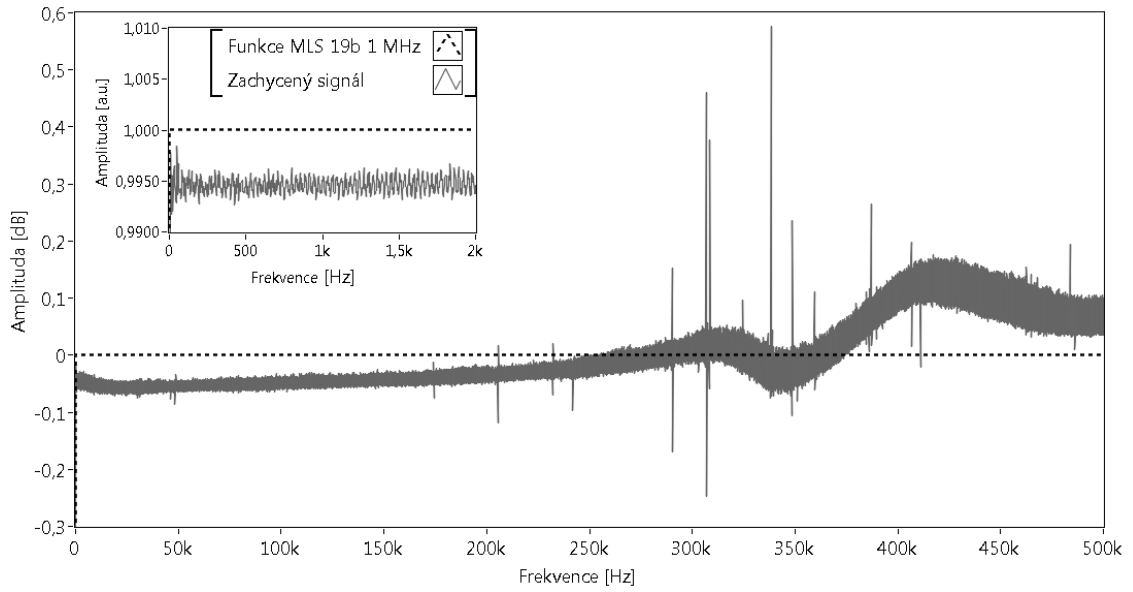
5.5 Testování linearity měřicího řetězce bez měničů

Elektrické prvky, dokonce i koaxiální kabely, způsobují zkreslení v měřicím řetězci. Nejvýznamnějším faktorem je impedanční nevyrovnání. Charakteristická impedance celého měřicího řetězce by se za ideálních podmínek měla rovnat impedanci zátěže, tj. budič a snímač. Těchto podmínek ale nelze dosáhnout, protože impedanční charakteristika piezoelementů je frekvenčně závislá a pohybuje se v řádu desítek k Ω , zatímco standardní signálové koaxiální kabely včetně koncovek mají charakteristickou impedanci 50 Ω . Teoreticky by se k impedančnímu vyrovnání řetězce

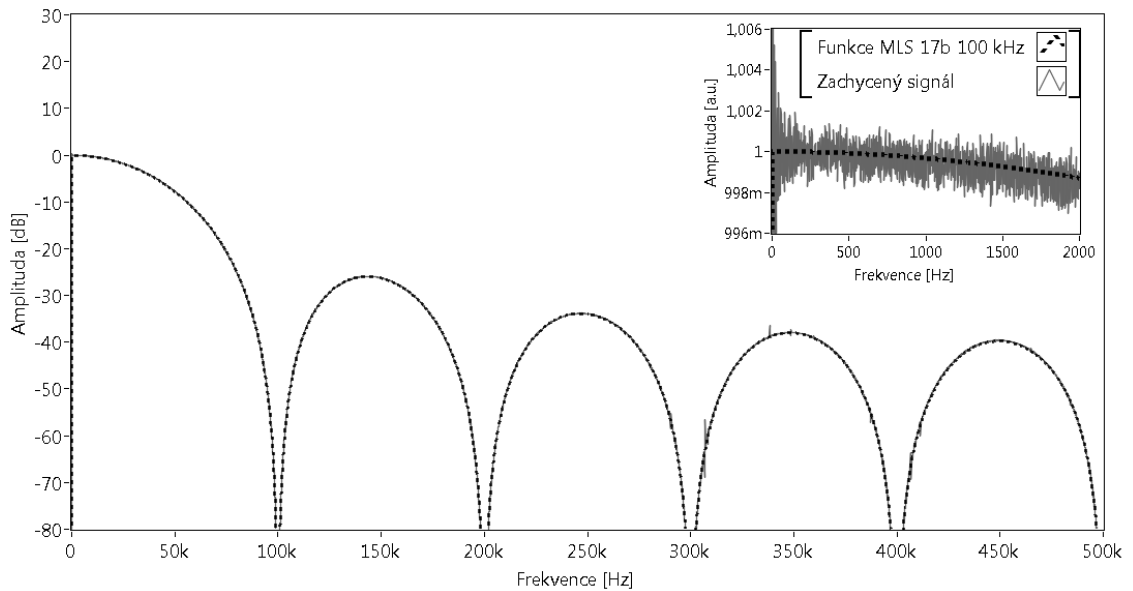
musel za zesilovač vložit odpor o hodnotě zátěže, který by ve výsledku zmenšoval napětí na budiči na polovinu. Ztráty 50 % výkonu jsou nepřijatelné, a proto se impedanční vyrovnání u výkonových prvků neprovádí. Analogový vstup záznamové karty byl impedančně vyrovnán k průměrné impedanci snímače (10 kΩ). Impedanční nevyrovnání měřicího řetězce způsobuje přinejmenším dolnoproustní filtraci. Horší ale jsou ztráty a odrazy signálu, které v audiotechnice často vedou k přetížení zesilovačů. Vliv odrazu signálu není významný v navržené testovací sestavě s maximální frekvencí do 0,5 MHz, protože až při délkách kabelů v řádu stovek metrů by se jednalo o distribuční soustavu [66].

Ověřování nelinearity navržené měřicí sestavy je prakticky možné pouze binárním signálem. Z toho vyplývá možnost srovnání ideálního, tj. matematické sekvence a zaznamenaného signálu. Výpočtem Fourierovy transformace se dají oba signály porovnat ve frekvenční oblasti. Srovnání bylo provedeno na MLS sekvenci (graf 5-32, 33) a obdélníkovém signálu s frekvencí 10 kHz (graf 5-34).

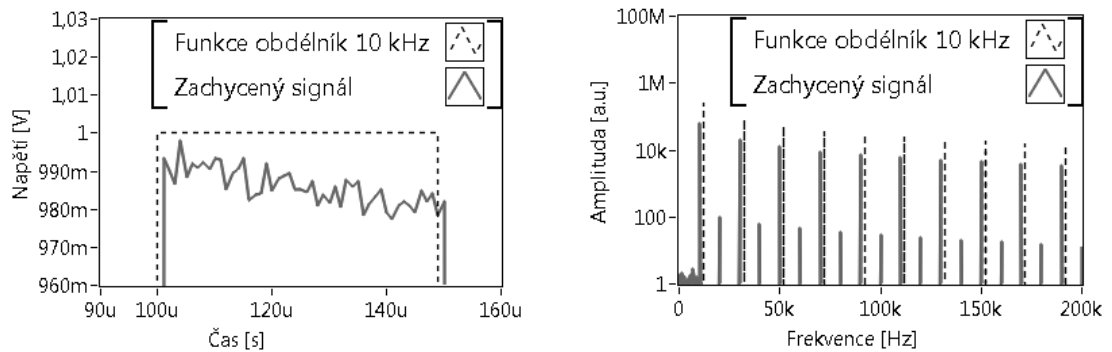
Frekvenční doména MLS signálu nevykazuje významné odchylky (cca 0,1 %) od ideálního spektra. Identické oscilace, ale s větší amplitudou, byly v minulosti způsobeny pomalým spínáním a rozpínáním tranzistorů. Oscilace jsou s nejvyšší pravděpodobností způsobeny klesající amplitudou stavu logické 1, což je patrné na obdélníkovém signálu níže. Přestože je zachycený signál na výřezu značně zatížený kvantizačním zkreslením, klesající tendence signálu je zřejmá. Frekvenční analýza domněnku potvrzuje, protože se v ní vyskytují kromě očekávaných lichých násobků základní frekvence i sudé, stejně jako má pilový signál (obr. 2-9). Nedostatečná „tvrdost“ zdroje, která způsobovala popsanou nelinearitu, byla redukována přidáním stabilizačních kondenzátorů na svorky zesilovače. Úpravou zdroje se snížily sudé harmonické frekvence a tím se signál přiblížil ideálnímu. Přestřel (2 %) na začátku přechodového stavu je následkem parazitní indukčnosti a neúplného impedančního přizpůsobení. V neposlední řadě i samotné budiče jsou zdrojem nelinearit [67].



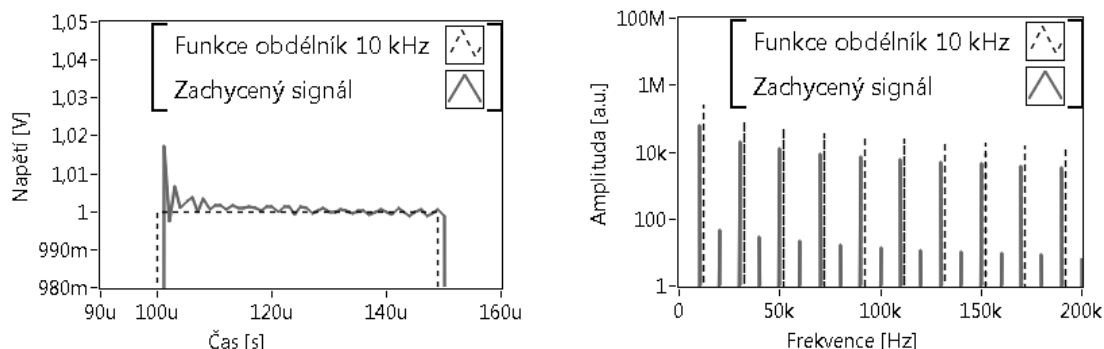
Graf 5-32: Frekvenční spektrum MLS signálu z generátoru ($f_s=f_g$)



Graf 5-33: Frekvenční spektrum MLS signálu z generátoru ($f_s=10f_g$)



Graf 5-34: Obdélkový 10 kHz před úpravou zesilovače



Graf 5-35: Obdélníkový 10 kHz po úpravě zesilovače

5.6 Získání přenosové funkce měřicího řetězce a vzorku [A8]

5.6.1 Neparametrická metoda

Jakýkoliv fyzický systém může být popsán jako odezva na Diracovu δ -funkci. V oboru ultrazvukového nedestruktivního testování se tohoto přímého přístupu používá jen zřídka (metoda impact-echo), protože reálný budící pulz není nekonečně krátký a jeho intenzita je limitována mnoha faktory. Častěji se proto uplatňuje buzení pulzně-kompresním signálem, jehož autokorelace se podobá Diracově δ -funkci. Při splnění podmínky autokorelace se impulzní odezva $h(t)$ LTI systému vypočítá křížovou korelací mezi zachyceným $y(t)$ a budícím signálem $x(t)$.

$$y(t) = \mathcal{L}\{x(t)\} = h(t) * x(t) \rightarrow R_{x,y} = R_{x,x} * h(t) \simeq h(t) \quad (5.27)$$

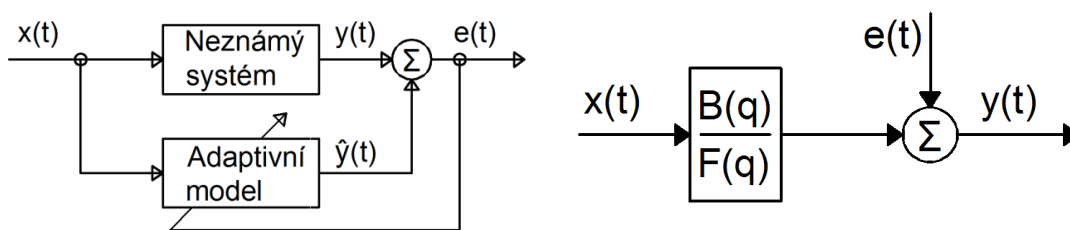
Kde $R_{x,y}(t)$ je operátorem křížové korelace mezi x a y , $R_{x,x}(t)$ je autokorelace budícího signálu a $*$ symbolizuje konvoluci.

Systém charakterizovaný impulzní odezvou se může skládat z libovolně velkého počtu prvků a přitom platí, že impulzní odezvy jednotlivých prvků systému je možné „odečíst“ pomocí dekonvoluce a tak charakterizovat samotný vzorek bez vlivu měřicí sestavy.

5.6.2 Parametrická metoda

LabVIEW software umožňuje charakterizaci neznámého systému pomocí nástrojové sady „System identification toolkit“. Nástrojová sada nabízí několik

rekurzivních modelů schopných charakterizovat komplexní elektrické systémy, třeba se zpětnými vazbami. Přenosová funkce, vypočítaná vhodně zvoleným modelem, se používá pro PID ovládání, například servomotorů. Na rozdíl od průmyslových aplikací požadují modely ultrazvukových systémů polynomy o řádu stovek pro dostatečně přesnou charakterizaci. Proto se dá lehce představit obrovská výpočtová náročnost v případě obecného lineárního modelu s pěti polynomy v řádu stovek a navíc zpoždění. Použitím modelu Output-Error s nulovým zpožděním bylo dosaženo dostatečně přesných výsledů s menší výpočtovou náročností.

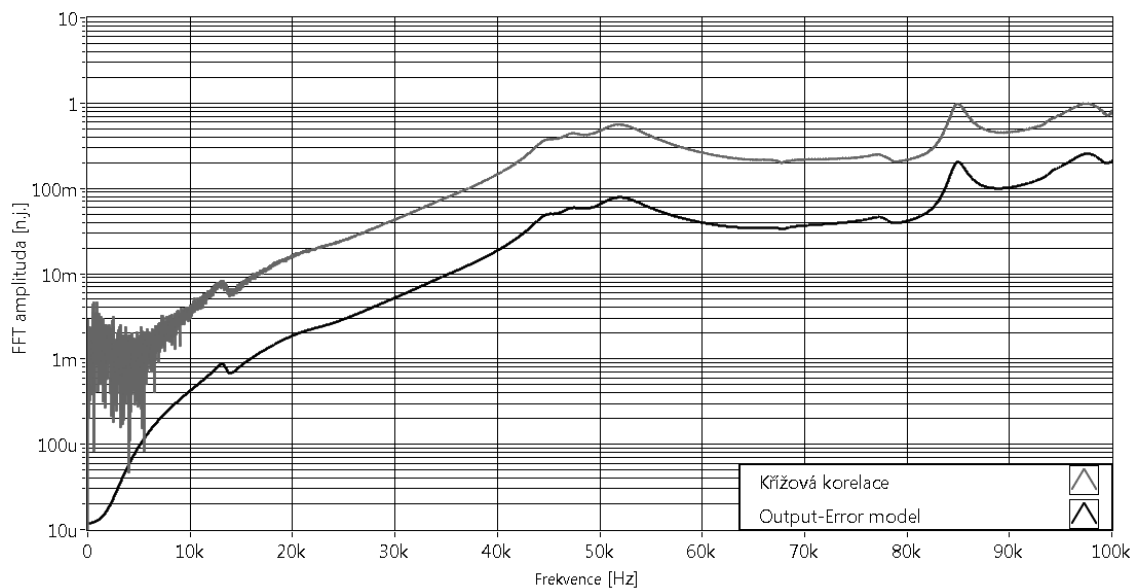


Obr. 5-32: Vlevo: rekurzivní odhad modelu systému. Vpravo Struktura modelu Output-Error

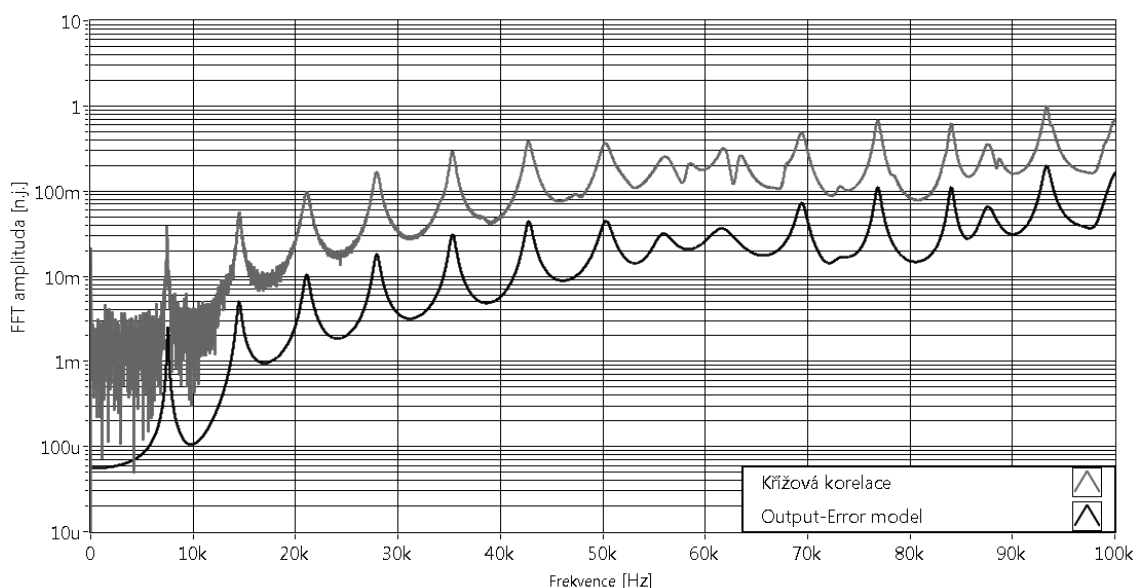
5.6.3 Experiment

Pro ověření funkčnosti a srovnání byly obě metody na získání impulzní odezvy, respektive přenosové funkce, vyzkoušeny na stejném vzorku. Délka vzorku, hliníkové tyče o průměru 11 mm, byla zvolena tak, aby se její vlastní frekvence nacházela pod úrovní 10 kHz. Vysílač i přijímač byly vázány ke vzorku včelím voskem. Vazba přes vosk byla použita i v případě získávání Impulzní odezvy/přenosové funkce vysílač-snímač.

Budícím signálem byla 16bitová sekvence maximální délky s frekvencí generování 200 kHz. Odstup signálu od šumu byl vylepšen synchronním průměrováním z 25 opakovaných měření. Před záznamem byl signál filtrován analogovou pásmovou propustí 0,3 - 300 kHz, čímž se zabránilo aliasingu vysokofrekvenčních složek spektra MLS do nízkých frekvencí.



Graf 5-36: Frekvenční spektrum vysílač-přijímač



Graf 5-37: Frekvenční spektrum systému vysílač, vzorek, přijímač

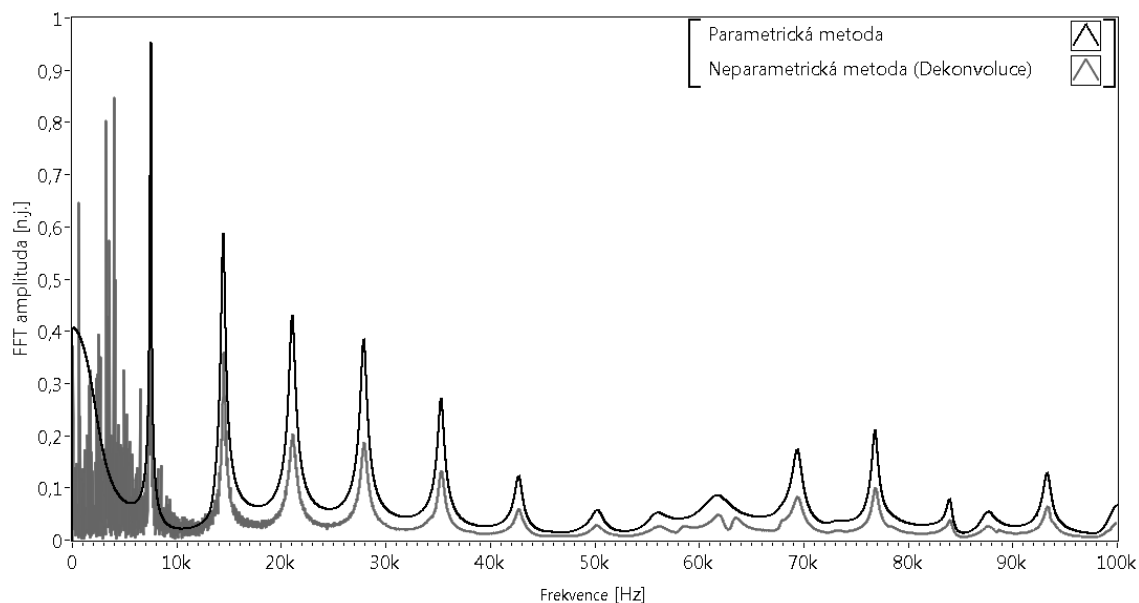
5.6.4 Výsledky a závěr

Kovové a především hliníkové vzorky se v ultrazvukovém zkušebnictví často používají pro srovnávací měření, protože jsou velice homogenní, vykazují minimální nelineární zkreslení a dobře vedou ultrazvukové vlny [49]. Očekávané frekvenční spektrum ideálního vzorku excitovaného δ -funkcí by se skládalo z vlastní frekvence a postupně tlumených harmonických násobků této frekvence. Jednotlivé frekvenční píky jsou viditelné i bez použití metod popsanych v této kapitole, ovšem jejich amplituda je ovlivněná přenosovou funkcí měřicího systému.

Výsledky z parametrické metody jsou čistější ve všech částech spektra, zatímco spektrum získané dekonvolucí je místně rozechvělé, především v oblasti vlastní frekvence, tj. do 10 kHz. Fenomén je viditelný na všech grafech této kapitoly, ale jeho vysvětlení vyplývá z grafu přenosové charakteristiky vysílač-přijímač. Konstrukce budiče totiž způsobuje ztlumení nízkých frekvencí, takže generovaný signál v pásmu do 10 kHz má tak malou intenzitu, že se až ztrácí v šumu. Parametrický přístup získání přenosové funkce je prostý všech oscilací a šumu, protože řád aproximačního polynomu není dostatečně vysoký, aby postihl oscilace způsobené šumem. Navíc, polynom n -tého stupně je vždy funkcí spojitou. V jistém smyslu se jedná o vyhlazovací filtr s kompenzací zpoždění.

Signál získaný dekonvolucí by mohl být hladší, kdyby se použilo některé z filtračních metod. Ne vždy je výhodnější použít robustní aproximační model na místo jednoduché, časově nenáročné dekonvoluce, ale silně zašuměný signál je hezkou ukázkou užitečnosti parametrického přístupu. Je ale nutné říci, že model přenosové funkce není univerzálně použitelný. Zvolení příliš vysokého stupně polynomu může vést k nežádoucím záchvěvům, které mohou být zaměněny s frekvenčními píky. Z toho důvodu existují nástroje pro vyhodnocení nejvhodnějšího stupně aproximačního polynomu. Opět na úkor výpočtového času.

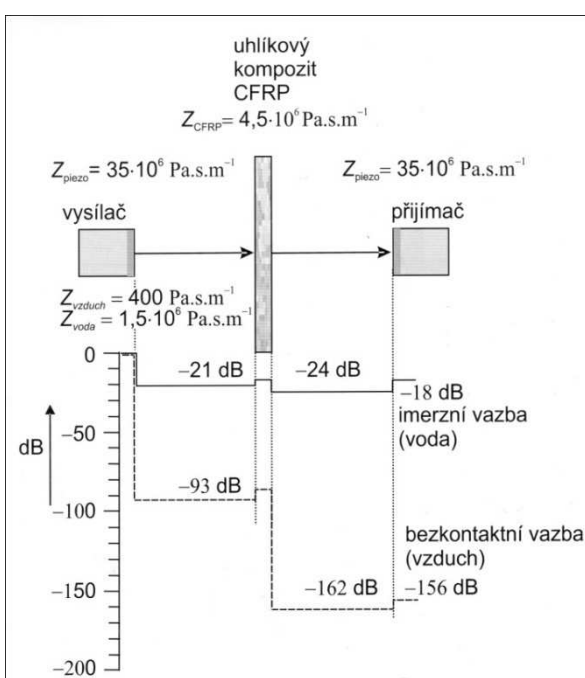
Ze studie vyplývá, že nejlepším přístupem je kombinace obou metod. Vytvořit precizní přenosovou funkci systému vysílač-přijímač, protože tuto časově náročnou operaci nebude v budoucnu potřeba opakovat. Dekonvolucí se pak dá získat přenosová charakteristika samotného vzorku. Výsledné spektrum bude zatížené šumem ze systému vysílač-vzorek-přijímač, ale s jistotou nebudou pozměněny pozice frekvenčních píky, pouze budou upraveny jejich amplitudy blíže k realitě.



Graf 5-38: Získané frekvenční spektrum samotného vzorku

5.7 Volba vazebního prostředí [A9]

Ultrazvukové vlny se ve vzorku mění, odráží a interagují s nehomogenitami. Zachycený signál obsahuje informace, které mohou být interpretovány jako vady, nebo materiálové vlastnosti. Podstatou klasického defektoskopického přístupu je pozorovat odrazy vln a měření času průchodu. Nicméně, sofistikovanější metody se zaměřují na informace obsažené ve frekvenčním spektru, takže je možné odhadnutí dynamického modulu pružnosti, nebo posouzení závažnosti mikroprasklin. Názornými příklady jsou metody nelineární spektroskopie (NEWS) [68], nebo impact-echo. Bez ohledu na ultrazvukovou metodu, vlastnosti vazebního prostředí jsou vždy závažnou problematikou [69]. Vzhledem k vysokému



Obr. 5-33: Rozdíl v útlumu UZ vln mezi bezkontaktní a imerzní vazbou [72]

pružnosti, nebo posouzení závažnosti mikroprasklin. Názornými příklady jsou metody nelineární spektroskopie (NEWS) [68], nebo impact-echo. Bez ohledu na ultrazvukovou metodu, vlastnosti vazebního prostředí jsou vždy závažnou problematikou [69]. Vzhledem k vysokému

akustickému nepřizpůsobení mezi vzduchem a pevnými látkami, nejvhodnější vazební prostředek vzduch často nepřichází v úvahu [27, 28, 70, 71]. Ponorné testování je na druhé straně mnohem praktičtější, ale ne pro stavební materiály. Cementové nebo hliněné výrobky mají totiž výrazně jiné materiálové vlastnosti v mokřém stavu.

Většina defektoskopických metod určených pro stavebnictví využívá gelového vazebního prostředku. Porozita stavebních materiálů bohužel způsobuje postupné vstřebávání gelu do vzorku až do stavu úplného vymizení gelové vrstvy, která se proto složitě udržuje v ideální tloušťce [A10]. V případě velké vrstvy se gel chová jako samostatný materiál a dochází k odrazu signálu na hranicích a při malé tloušťce způsobí nedokonalý kontakt delší čas průchodu UZ vln. Neméně podstatné je i aplikovat konstantní tlak na měniče během měření.

Odpovědi na tyto problémy skýtá pevná vazba, například včelím voskem. Do vzorku a ze vzorku jsou přenášeny výrazně vyšší energetické hladiny, proto je lepší SNR, a navíc je to způsob vhodný pro dlouhodobé kontinuální měření. Zmíněné uspořádání však má i negativa. Vazba je natolik pevná, že se z budiče/senzoru a vzorku se stane jediné těleso vibrující na nových vlastních frekvencích [A7]. Z rovnice 2.11 pro výpočet dynamického modulu pružnosti podélně vibrujícího 1D tělesa je zřejmé, že přidaná hmotnost a zvětšená délka povede ke snížení vlastní frekvence vzorku [33, 34]. Je třeba poznamenat, že pevná vazba umožňuje šíření horizontálně polarizovaných smykových vln, které jsou nežádoucí ve většině aplikací.

5.7.1 Experiment a výsledky

Testovací tělesa o rozměrech 40x40x160 mm byla připravena 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 Mokřé a zkušební křemenný písek pro přípravu malt z Filtrační písky, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 721200, přičemž byly použity vždy 3 frakce písku o velikosti zrn 0-1, 1-3, a 3-4 mm, které byly míchány v hmotnostním poměru 1:1:1. Všechna tělesa vyrobená z cementové malty byla odformována po 24 hodinách zrání při teplotě 22 °C a 55% relativní vlhkosti. Dále byla tělesa uložena na dalších 27 dní do vody. Pak byla tělesa sušena 2 dny při teplotě 60 °C.

Vliv gelové a pevné vazby včelím voskem byl porovnáván s výsledky z impact-echo metody. Podle závěrů z kapitoly 5.4.1, se frekvence měřené metodou IE

s pevnou vazbou senzoru liší o $\pm 1\%$ od výsledků se vzdušnou vazbou. Proto jsou píky získané metodou IE vhodnou referencí. Vliv vazebního materiálu vysílače (TX) a přijímače (RX) byl testován pomocí pseudonáhodné binární sekvence maximální délky 16 bit a generovanou frekvencí 200 kHz. Pro sběr dat byla použita měřicí sestava MLS. Odstup signálu od šumu byl vylepšen synchronním průměrováním z 25 opakovaných měření. Před záznamem byl signál filtrován analogovou pásmovou propustí 0,3 - 300 kHz, čímž se zabránilo aliasingu vysokofrekvenčních složek spektra MLS do nízkých frekvencí.

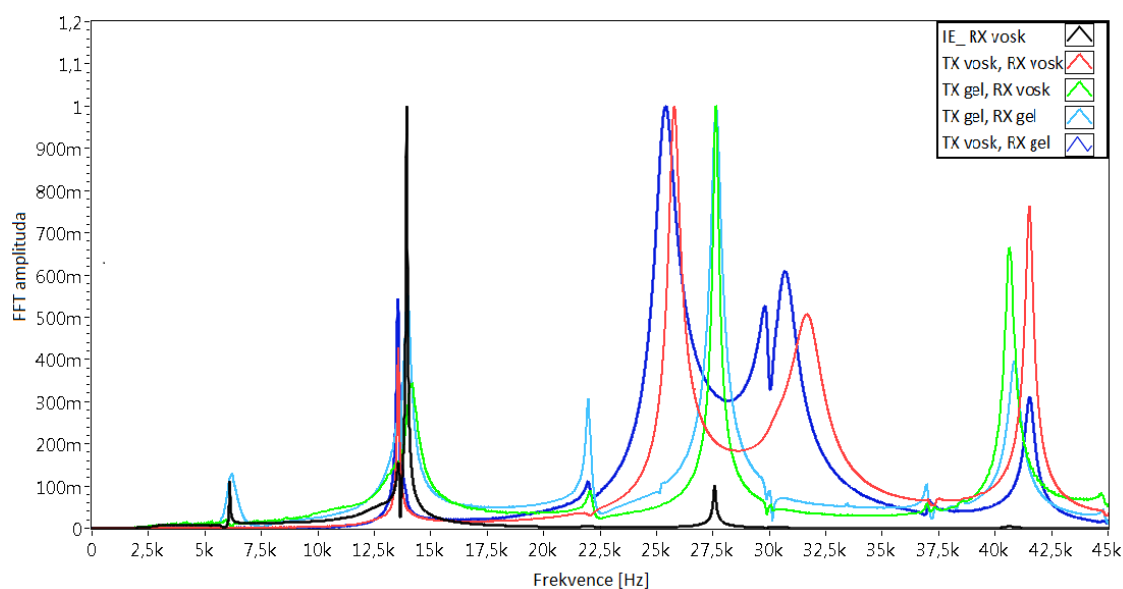
Snímač typu MIDI (\varnothing 6,5 mm) byl použit ve všech kombinacích měření. Na následujícím obrázku jsou čtyři testované budiče. Tři z nich jsou šroubem stažené budiče typu Langevin, určené pro výkonové aplikace. Posledním na fotografii je snímač DAKEL MIDI, ten je při nízkém budícím napětí možno použít i jako budič. Přestože byly testovány všechny uvedené piezoměniče, pouze CONE a CYLINDER se ukázaly jako vhodné a jejich výsledky jsou dále prezentovány. Budič BK03 má jedinou, silně dominantní frekvenci (32 kHz).



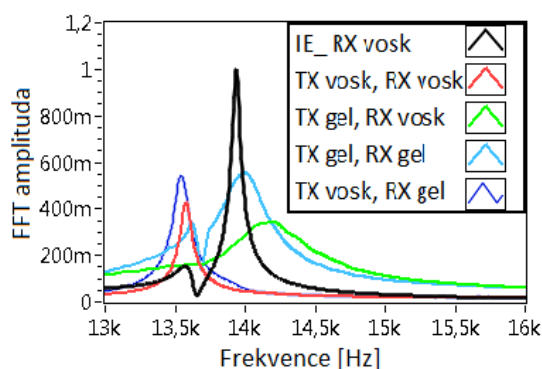
Obr. 5-34: Možné budiče pro testování MLS signálem

Na grafech 5-39 až 41, respektive 42 až 44, jsou zobrazena frekvenční spektra získaná s budiči CONE a CYLINDER. Jsou zde vidět všechny možné kombinace

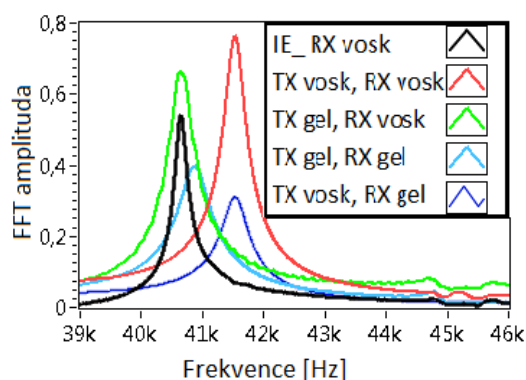
vazebních prostředků mezi budičem (TX) a snímačem (RX). Pro srovnání naměřených spekter je k dispozici křivka (černá), obdržena metodou impact-echo (IE). Z grafů je zřejmé, že vazební prostředek má zásadní vliv na tvar frekvenčního spektra. V kapitole 5.4.1 bylo ukázáno, že pevná vazba způsobuje posun frekvencí k nižším hodnotám, ovšem pevné spojení může vést i ke vzniku neočekávaných rezonančních frekvencí. Tento fenomén je viditelný v oblasti první harmonické frekvence (27,5 kHz) grafu 5-39, červené a tmavě modré křivce. Kromě posunu první harmonické frekvence se zde vytvořil i nový frekvenční pík (31 kHz), který je jasným důsledkem pevné vazby mezi budičem CONE a vzorkem. Protože z grafu přenosové charakteristiky budiče CONE není viditelná žádná anomálie v oblasti 31 kHz, vznik nových frekvenčních píků je zcela nepředvídatelný jev a může potenciálně vést k chybné interpretaci výsledků. Z měření vyplývá, že pevná vazba snímače a vzorku nezpůsobuje tyto problémy.



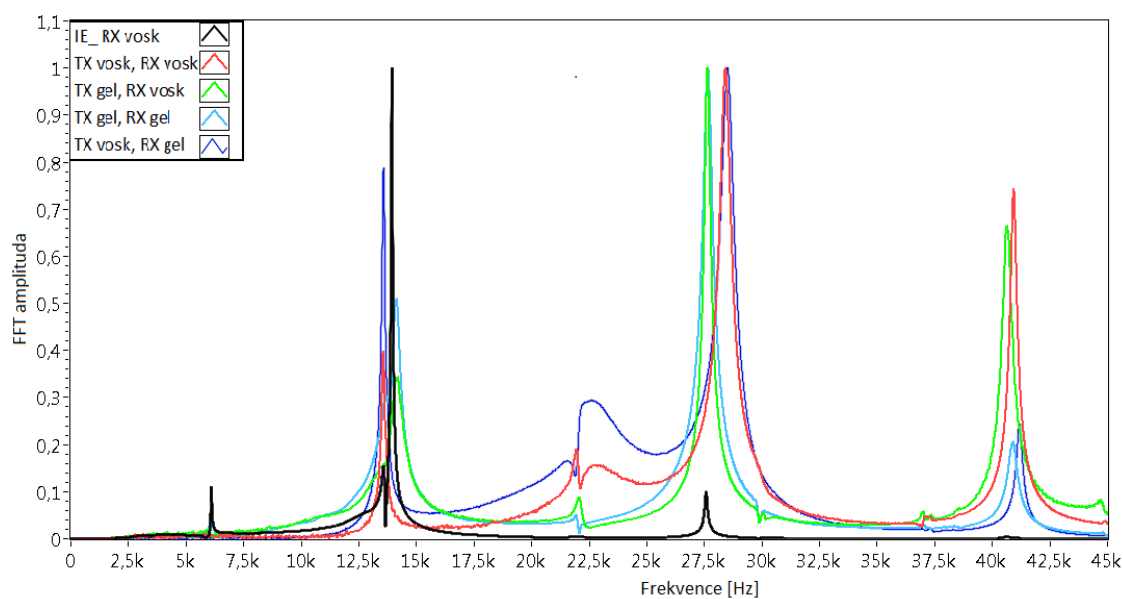
Graf 5-39: Frekvenční spektrum maltového vzorku měřené budičem CONE, různé vazební prostředky.



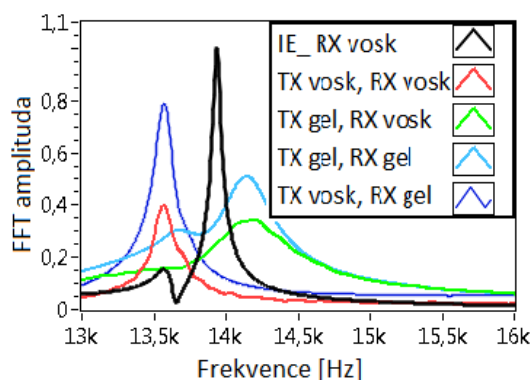
Graf 5-40: Detail základní frekvence, budič CONE



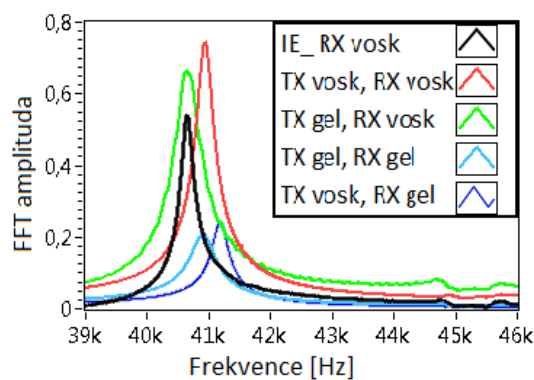
Graf 5-41: Detail druhé harmonické frekvence, budič CONE



Graf 5-42: Frekvenční spektrum maltového vzoru měřené budičem CYLINDER, různé vazební prostředky.



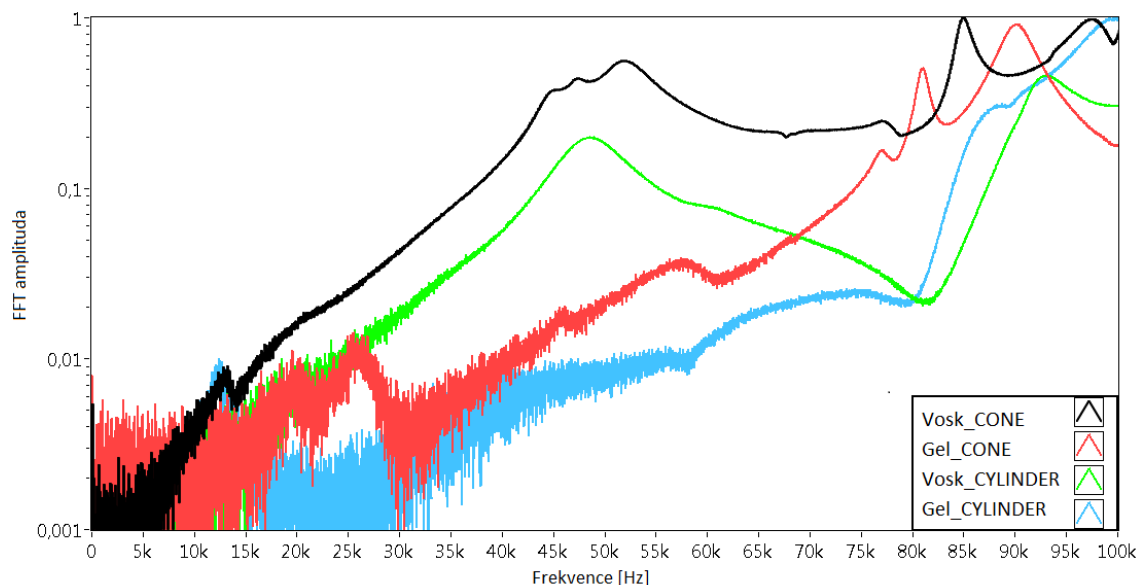
Graf 5-43: Detail základní frekvence, budič CYLINDER



Graf 5-44: Detail druhé harmonické frekvence, budič CYLINDER

Tab. 5-5: Vliv vazebního prostředku a budiče na pozice píků

Vazební prostředek budiče (TX) a snímače (RX)		Základní [Hz]	diff. [%]	1. harm. [Hz]	diff. [%]	2. harm. [Hz]	diff. [%]	SNR [dB]
TX	IE_RX vosk	13936	0,0	27577	0,0	40644	0,0	66
CONE	TX vosk; RX vosk	13580	-2,6	Dvojité	NA	41537	2,2	67
	TX gel; RX vosk	14198	1,9	27647	0,3	40635	0,0	42
	TX gel; RX gel	13994	0,4	27662	0,3	40875	0,6	49
	TX vosk; RX gel	13543	-2,8	Dvojité	NA	41533	2,2	55
CYLINDER	TX vosk; RX vosk	13569	-2,6	28431	3,1	40943	0,7	45
	TX gel; RX vosk	14198	1,9	27647	0,3	40635	0,0	42
	TX gel; RX gel	14143	1,5	27669	0,3	40904	0,6	59
	TX vosk; RX gel	13570	-2,6	28502	3,4	41179	1,3	54



Graf 5-45: Normalizovaná přenosová charakteristika vysílač-přijímač (MIDI) s různým vazebním prostředkem

5.7.2 Závěr

Použití vosku jako pevného vazebního prostředku je vhodné, pokud je zapotřebí přenést velké energie do vzorku, například při používání metody NEWS, nebo pro dlouhodobé kontinuální měření. Avšak musí se dávat pozor na nesprávnou interpretaci rezonančních píků vzniklých pevným spojením budiče a snímače. Pevná vazba snímače má za následek nepatrný posun frekvencí k nižším hodnotám.

Gelový vazební prostředek je nejlepší možností, ale jeho použití na stavebních materiálech může být problematické. Některé vzorky totiž rychle nasávají kapalinu obsaženou v gelu, čímž se zhoršuje vazba budiče a vzorku. Navíc je známo, že vlhkost vzorku ovlivňuje jeho mechanické akustické vlastnosti. Z praktických zkušeností získaných během měření vyplývá, že není vhodné, aby bylo měření delší než 30 sekund.

Vzduch jako vazební prostředek není v této kapitole testovaný, přesto se v této práci úspěšně používá. Bezkontaktní snímání signálu umožňuje rychlé, přesné kontinuální měření, nezátížené posunem frekvencí, jako u pevné vazby. Ovšem existuje několik praktických aspektů, které mohou komplikovat měření. Mikrofonní snímač je totiž citlivý i na nežádoucí smykové vlny, které jsou při použití axiálního kontaktního snímače s pevnou nebo gelovou vazbou eliminovány. Druhou nevýhodou

je podstatně méně přesné měření rychlosti průchodu UZ vln. Protože se zvuk šíří ve vzduchu cca 10krát pomaleji nežli v testovaném materiálu, i nepatrný posun vzdálenosti mikrofonu a vzorku způsobí závažný rozdíl. Protože měření probíhá zpravidla v akustickém blízkém poli, je možné, že některé frekvence jsou měřeny s nesprávnou amplitudou.

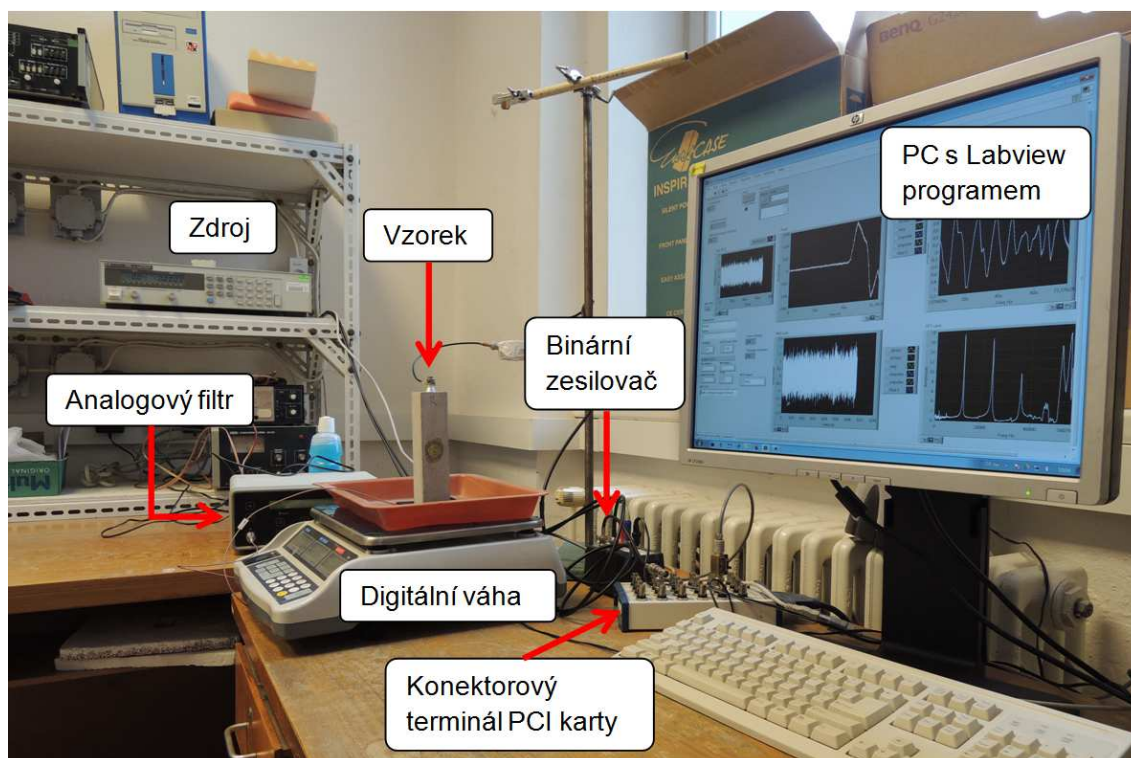
5.8 Kontinuální měření frekvence podélných kmitů schnoucího maltového vzorku [A10]

Modul pružnosti je vedle pevnostních charakteristik jedním z nejdůležitějších parametrů studovaných na betonech. Popisuje schopnost odolávat mechanické deformaci vyvolané napětím. Modul pružnosti betonu je ovlivněn faktory již při výrobě, ale i v době jeho měření. Zásadní význam při měření modulu pružnosti má vodní obsah ve vzorku. Důvodem, proč vlhký beton vykazuje vyšší modul pružnosti (cca 10% [73]), může být přetvoření vlhké matrice, jejíž póry obsahují nestlačitelnou vodu [74]. Při měření dynamického modulu pružnosti se přítomnost vody v kapilárách projeví vyšší rychlostí šíření UZ vln. To je pochopitelné, protože ve vodě se zvuk šíří 4-krát rychleji než ve vzduchu. Nárůst rychlosti, oproti suchému vzorku, může dosahovat až 20 % [75, 76]. Dosazením do vztahu 2.6 by se zdánlivě zvýšil modul pružnosti o 54 % (započítaná změna objemové hmotnosti o 7 %). Pro zajímavost, rychlost šíření UZ vln ve dřevě se naopak snižuje s vlhkostí materiálu [77].

5.8.1 Experiment a výsledky

Testován byl jeden maltový vzorek o rozměrech 40×40×160 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 z Filtračních písků, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 72 1200, byly použity 3 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 zráló 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 váha suchého vzorku W_h a následně byl vzorek uložen do destilované vody po dobu 20 dnů. Plně nasycený vzorek byl

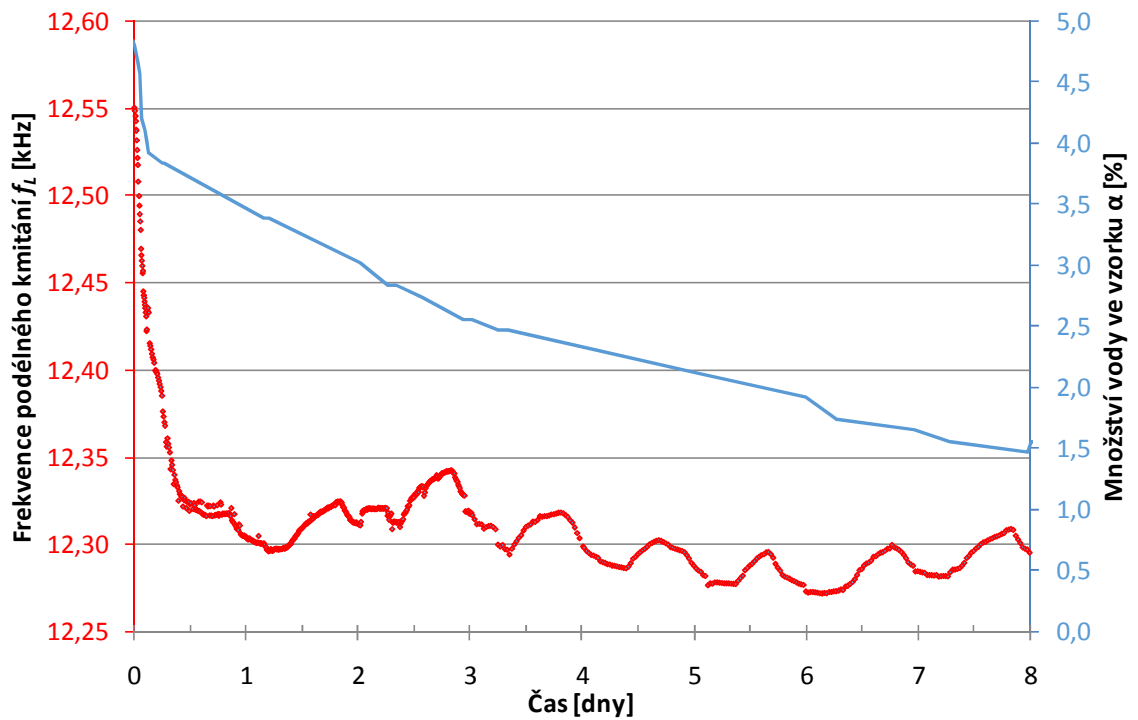
umístěný na digitální váhu a na spodní stranu byl včelím voskem připevněn snímač MIDI. Horní strana vzorku byla vyhlazena a budič CONE zde byl volně položen, bez vazebního prostředku.



Obr. 5-35: Testovací sestava

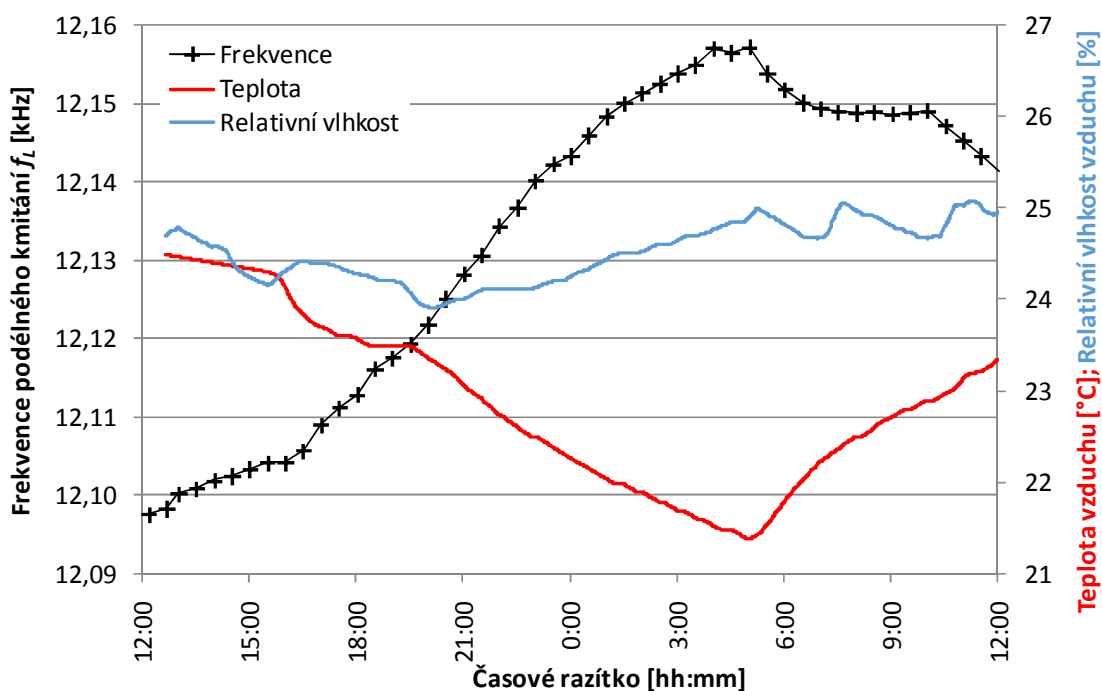
Zatímco vzorek samovolně vysychal v semilaboratorních podmínkách, jeho hmotnost W_m byla pravidelně zaznamenávána a frekvenční spektrum bylo automaticky měřeno aparaturou s MLS signálem. Během 8 denního měření bylo zaznamenáno celkem 672 hodnot základní frekvence vzorku (graf 5-46). V prvním dnu probíhalo měření s 10minutovým intervalu, které se následně prodloužilo na půl hodiny. Pro ověření hodnot naměřených MLS signálem bylo několikrát provedeno neautomatizované měření impact-echo. Množství vody ve vzorku bylo spočítáno podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{W_m - W_h}{W_h} \times 100 [\%] \quad (5.28)$$



Graf 5-46: Změna frekvence podélného kmitání maltového vzorku při samovolném sušení

Z předešlého 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 (graf 5-47).



Graf 5-47: Změna frekvence podélného kmitání maltového vzorku při samovolném sušení

5.8.2 Závěr

Měřicí aparatura s MLS signálem umožnila kontinuální sledování frekvence podélných kmitů vzorku, které se změnilo z 12551,1 Hz (mokrý) na 12097,7 Hz (suchý). Tato 3,7% změna by přepočtem na dynamický modul pružnosti podle vztahu 2.11 znamenala 13% nárůst oproti suchému stavu.

Při měření rychlosti průchodu nedošlo k žádné změně v závislosti na vlhkostrním stavu vzorku, což bylo způsobeno nedokonalou vazbou budič-vzorek a nízkou frekvencí vzorkování (1 μ s).

Tímto experimentem byla ověřena nutnost provádět dynamické nedestruktivní měření vždy za stejných laboratorních podmínek. Pouhá změna teploty vzduchu o 2,5 °C může způsobit změnu frekvence podélného kmitání o 0,5%.

5.9 Měření teplotně namáhaných maltových vzorků [A11]

Za účelem srovnání výsledků měřicí aparatury s klasickými metodami a pro ověření použitelnosti na malých standardních trámcích (40x40x160 mm) bylo provedeno měření na identických vzorcích namáhaných různou teplotou.

5.9.1 Experiment

Testovány byly maltové vzorky o rozměrech 40x40x160 mm, 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 Mokrém 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 3 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 zráló 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 °C/min, až do dosažení maximální teploty, na které se vzorek udržoval 60 minut. Po výpalu byly vzorky nechány samovolně vychladnout. Vzorky byly zapůjčeny panem doc. Rovnaníkem.



Obr. 5-36: Maltové vzorky namáhané zvýšenou teplotou.

Frekvenční oblast, ve které se provádí analýza pro vozky o délce měřicí základny 160 mm, pohybuje na hranici slyšitelného pásma a dále do cca 30 kHz. Pro tento rozsah byl vhodně použit budič CONE (kapitola 5.4.2) a snímač MIDI (kapitola 5.4.3). 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).

5.9.2 Výsledky

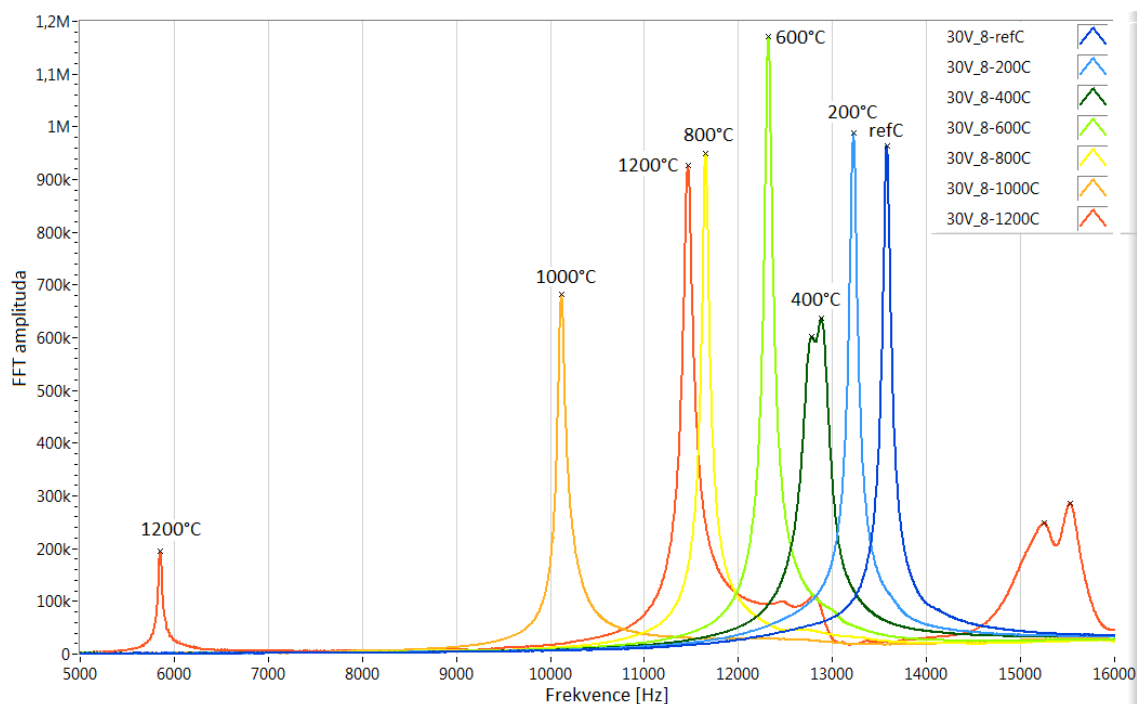
Interpretace výsledků frekvenční analýzy získané budičem CONE může být problematická. Jak vyplývá z přenosové charakteristiky (graf 5-45), intenzita generovaného signálu narůstá s frekvencí, proto se pík s vyšší frekvencí může jevit jako základní frekvence vzorku, zatímco se jedná pouze o vyšší harmonickou frekvenci. S největší pravděpodobností (potvrzeno měřením IE) je to případ vzorku namáhaného 1200 °C (červená křivka, graf 5-48). Určení správné frekvence je v tomto případě obzvláště náročné, protože vzorky se závažným vnitřním poškozením mohou mít nedominantní frekvenci snadno zaměnitelnou s frekvencí podélného kmitání. Z průběhu změny rychlosti šíření v závislosti na teplotě namáhání (graf 5-49) vyplývá, že se správnou frekvencí pro 1200 °C je 5,94 kHz.

Vzorek namáhaný teplotou 400 °C má dvojitý frekvenční pík, který je následkem pevné vazby budiče a snímače, protože kontrolním měřením metodou impact-echo se v této oblasti vyskytovalo pouze jedno frekvenční maximum.

Dále je zde vidět téměř identický průběh srovnávacího měření ultrazvukovou pulzní metodou a rychlostmi získanými navrženou měřicí aparaturou. Pro ujasnění křivka nazvaná pulz (černá), není výsledkem korelace MLS signálu, jedná se o doplňující měření jediným neopakovaným pulzem, viz kapitola 5.2.

Frekvence podélného kmitání získaná měřicí aparaturou s MLS signálem (graf 5-50) byla potvrzena metodou impact-echo. Pro teploty 400 °C a 1200 °C jsou vyznačeny i alternativní hodnoty frekvenčních píku.

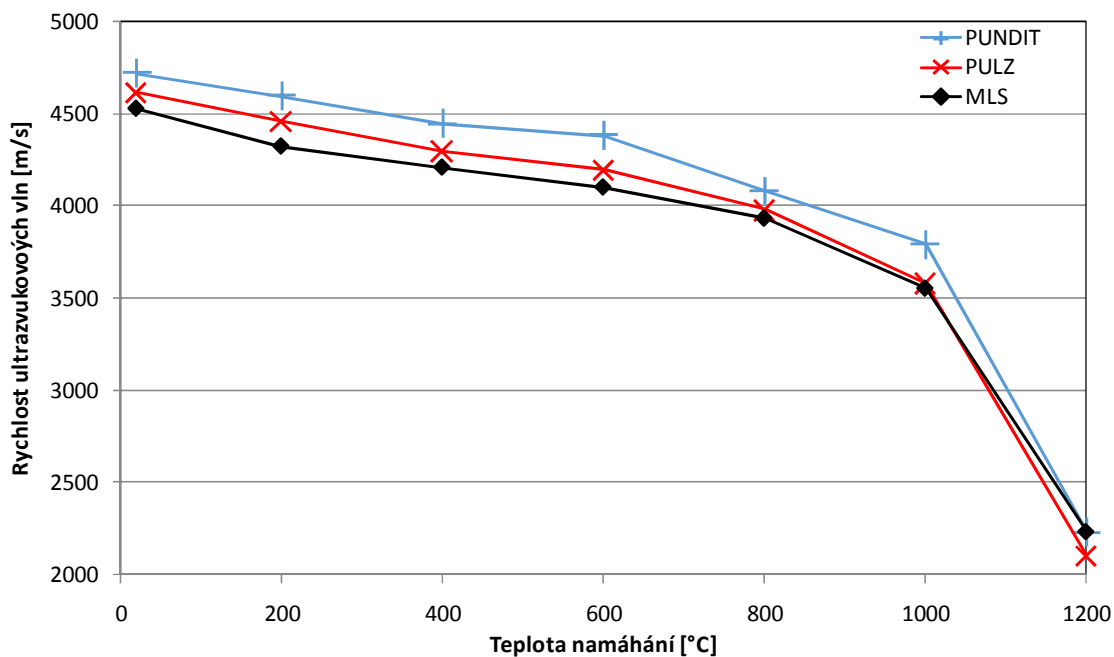
Posledním výsledkem, který je možný měřicí sestavou měřit, je parametr α , který slouží pro klasifikaci nelinearity vzorku. K tomuto experimentu je nutné měření opakovat s narůstající intenzitou signálu, výsledkem je lineární závislost frekvence na amplitudě FFT. Průsečík proložené přímkou slouží k přesnému určení f_L a z posunu frekvence se přepočítá α koeficient (kapitola 2.2.4). Tvar lokálních, frekvenčních maxim a posun frekvencí je vidět na grafech 5-52 až 59. Frekvenční oblast těchto grafů je pro lepší srovnání stejná (200 Hz), vyjma vzorku 400 °C.



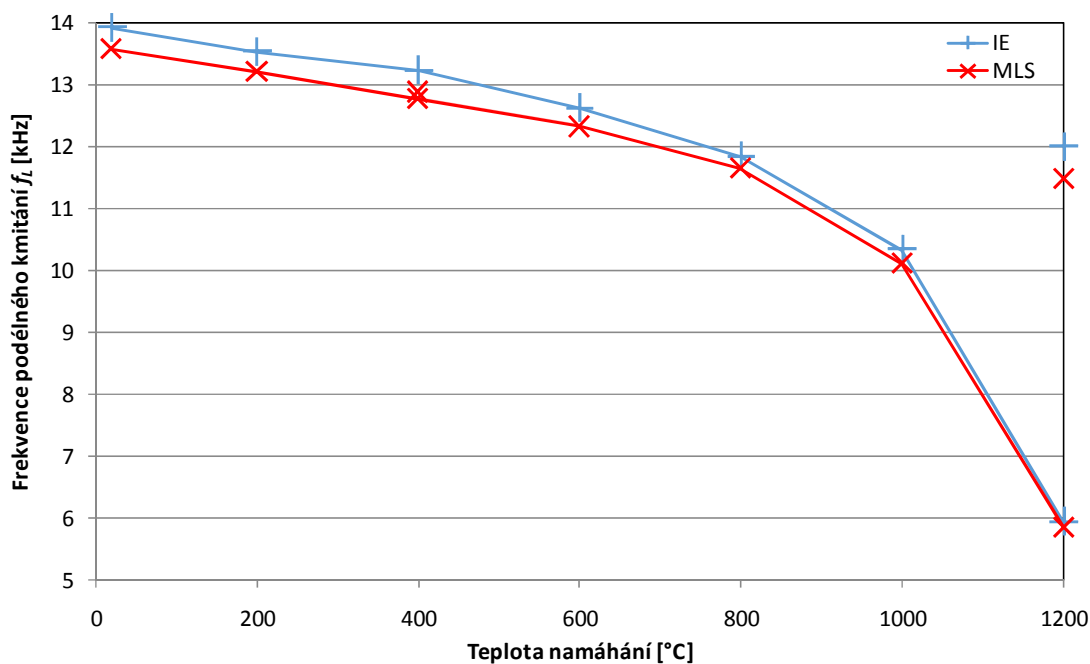
Graf 5-48: Frekvenční analýza vzorků namáhaných různou teplotou.

Tab. 5-6: Souhrn výsledků měření teplotně namáhaných maltových trámů

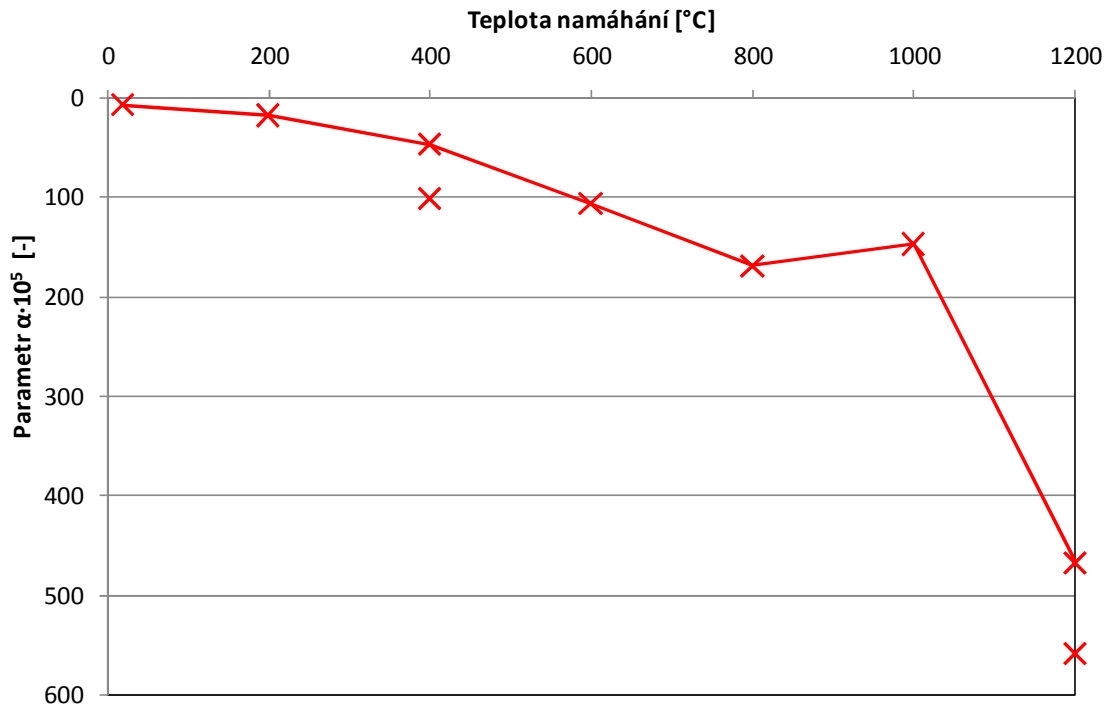
Označení vzorku	Teplota [°C]	v_{PULZ} [m/s]	v_{MLS} [m/s]	v_{PUNDIT} [m/s]	diff. v (IE, MLS)	MLS f_L [Hz]	IE f_L [Hz]	diff. f_L (IE, MLS)	$\alpha \cdot 10^5$ [-]
8-refC	20	4615	4528	4720	4,2%	13580	13923	2,5%	7
8-200C	200	4458	4324	4598	6,3%	13226	13529	2,3%	18
8-400C	400	4299	4211	4444	5,6%	12783	13228	3,5%	47
						12888		2,6%	101
8-600C	600	4198	4103	4384	6,8%	12326	12623	2,4%	107
8-800C	800	3978	3934	4082	3,7%	11661	11845	1,6%	169
8-1000C	1000	3582	3556	3791	6,6%	10124	10338	2,1%	147
8-1200C	1200	2105	2240	2235	-0,2%	5864	5940	1,3%	467
						11490		4,4%	557
Délka měřicí základny [mm]				160					
Pozn.: datum měření: 13. únor 2015, teplota vzduchu: 23°C, RH: 26%, tlak: 102 kPa									



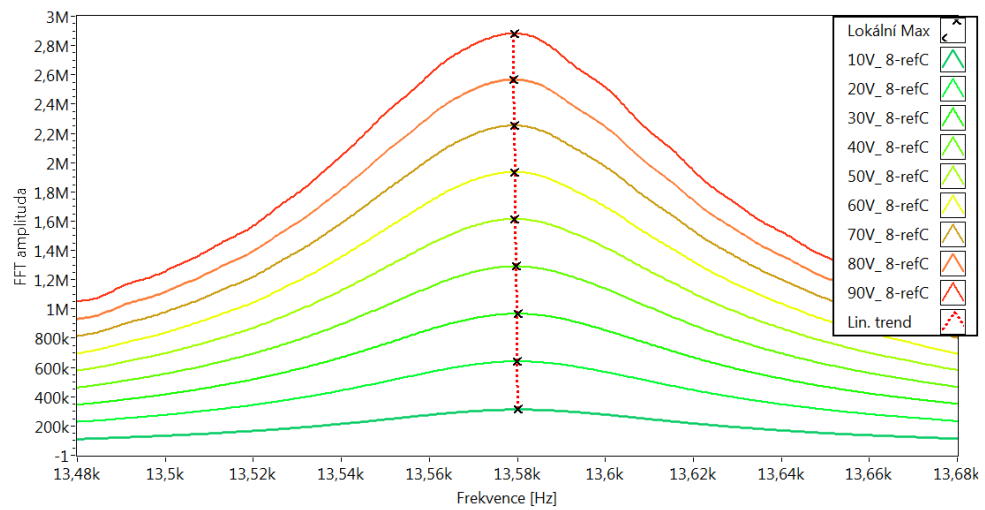
Graf 5-49: Rychlost UZ vln měřena impulzní metodou (přístroj PUNDIT) a navrženou měřicí aparaturou



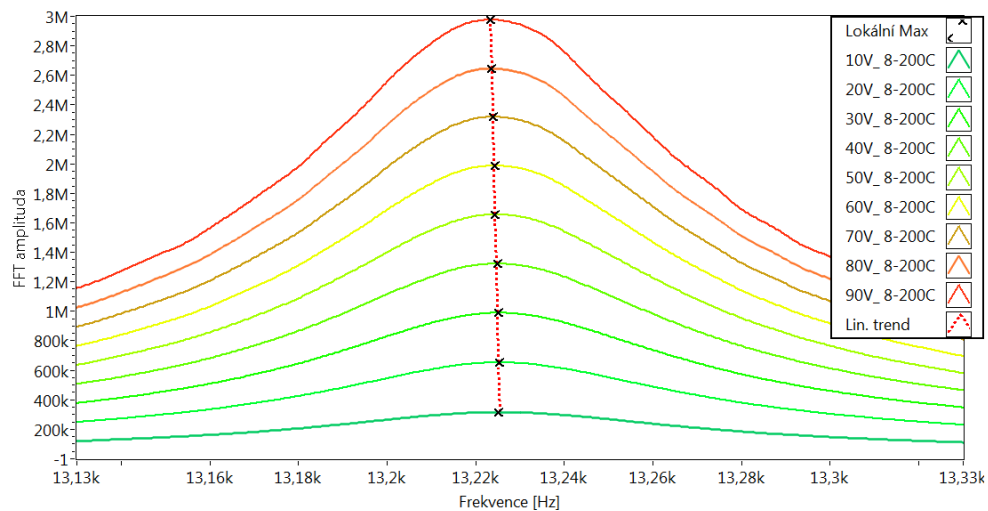
Graf 5-50: Frekvence podélného kmitání měřena metodou Impact-echo a navrženou měřicí aparaturou



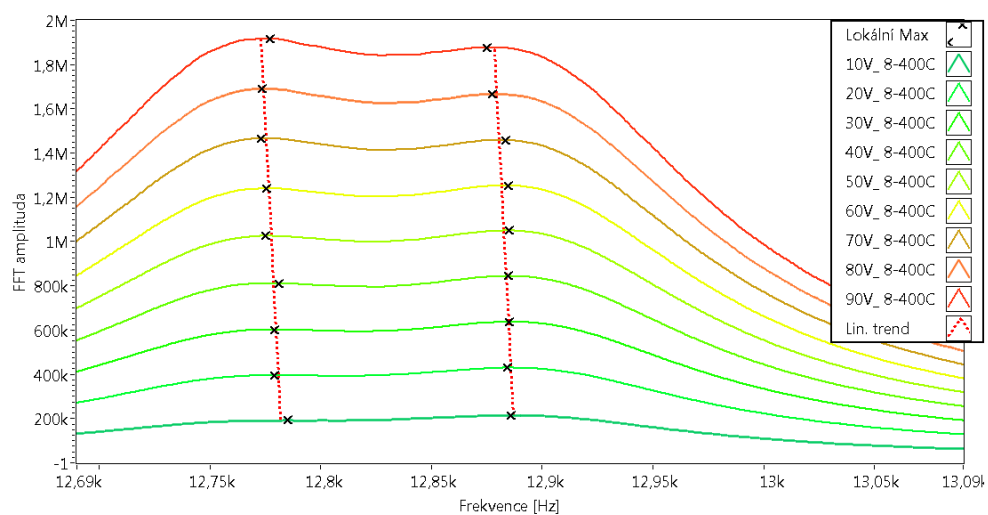
Graf 5-51: Nelineární parametr α měřený navrženou měřicí aparaturou



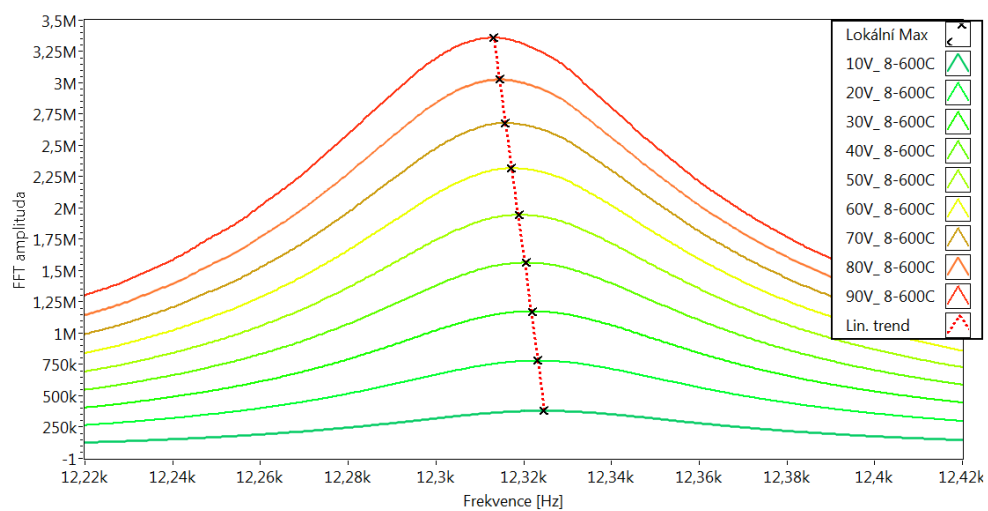
Graf 5-52: Referenční vzorek - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



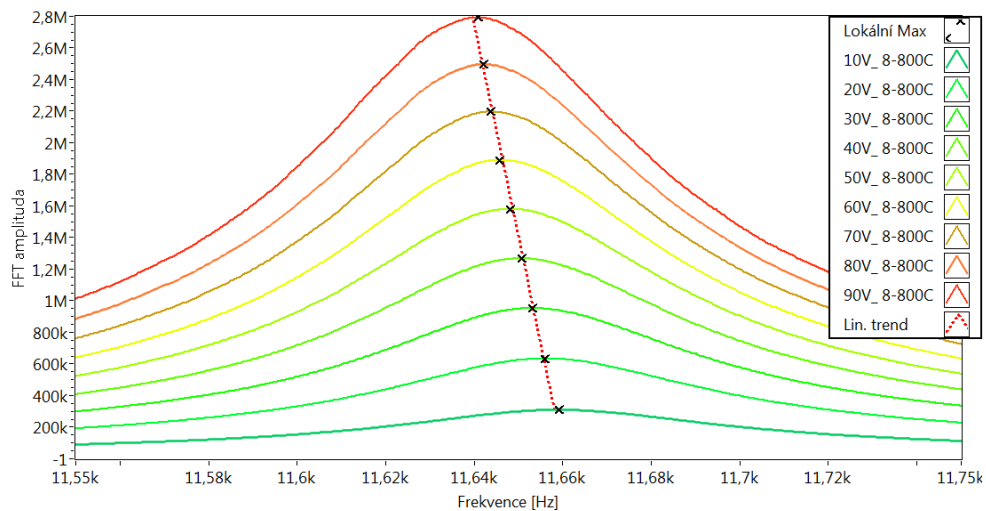
Graf 5-53: Vzorek 200 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



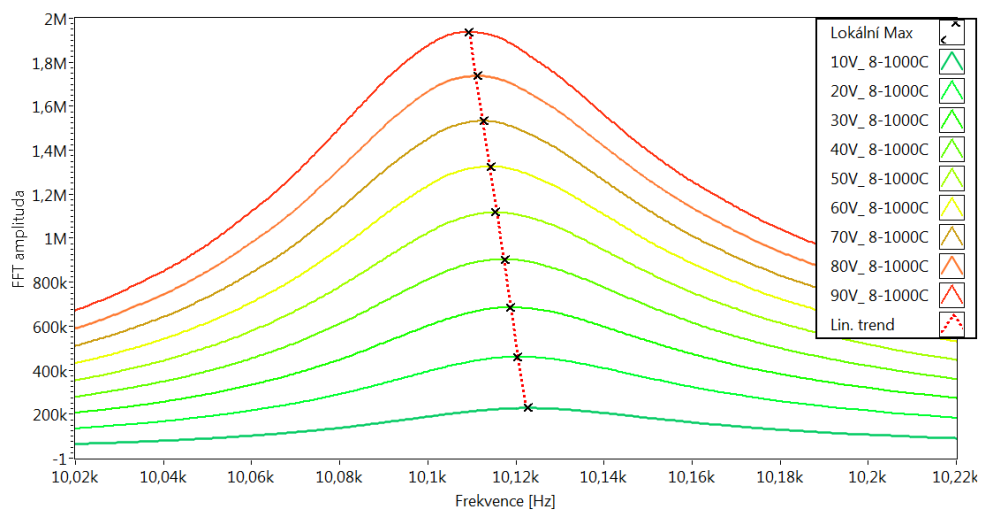
Graf 5-54: Vzorek 400 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



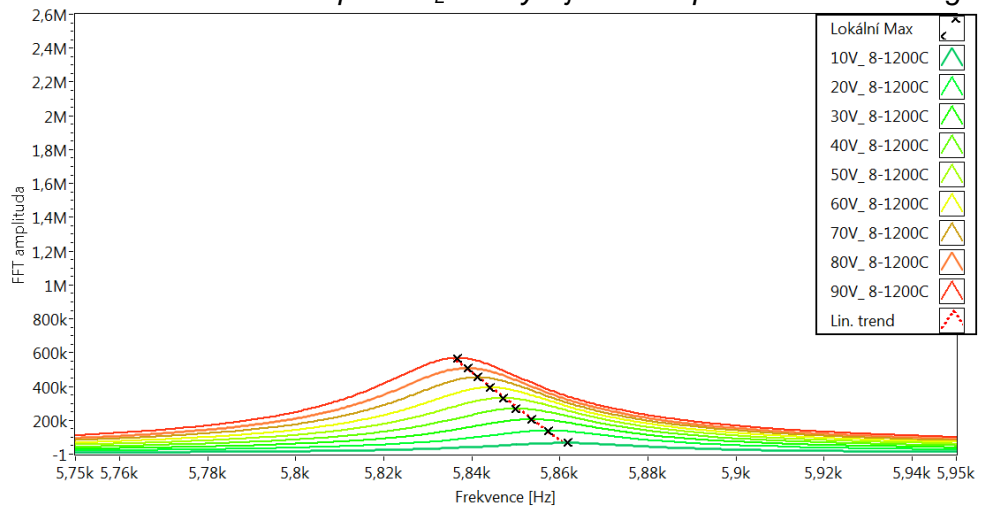
Graf 5-55: Vzorek 600 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



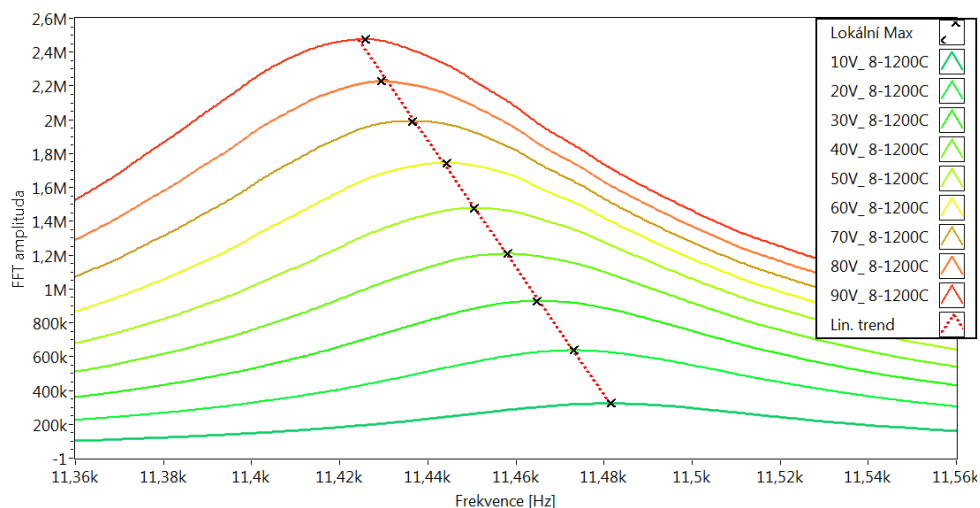
Graf 5-56: Vzorek 800 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



Graf 5-57: Vzorek 1000 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu



Graf 5-58: Vzorek 1200 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu, první pik



Graf 5-59: Vzorek 1200 °C - posun f_L se zvyšující se amplitudou budícího signálu, druhý pík

5.9.3 Závěr

Navrženou testovací aparaturou s budícím MLS signálem byly charakterizovány vzorky namáhané různě vysokou teplotou. Z grafu rychlosti šíření ultrazvukových vln získaných navrženou aparaturou impulzním přístrojem PUNDIT můžeme vidět klesající tendence s rostoucí teplotou namáhání vzorku. Zcela identický trend je pozorovatelný i v případě poklesu frekvence podélného kmitání, což je očekávatelné, protože oba parametry je možné přepočítat na dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku. Z výsledků je zřejmé, že s narůstající teplotou se zhoršují akustické a potažmo i mechanické vlastnosti maltových vzorků. K významnému propadu dochází při teplotě 1000 °C a především 1200 °C. I z průběhu parametru charakterizujícího nelinearity vzorku α je patrná podobná tendence s výjimkou teploty 1000 °C. Pro tuto teplotu se nabízejí dvě vysvětlení. Může se jednat o statistickou anomálii, byl testován pouze jeden vzorek s teplotním namáháním 1000 °C, nebo došlo ke změně struktury, která vedla ke snížení množství mikrotrhlin.

Výrazný pokles všech měřených ukazatelů pro vzorek namáhaný 1200 °C je zcela neočekávaným jevem. Vzorky receptury A a B, které se od těchto maltových lišily pouze v kamenivu, vykazovaly naopak zlepšení vlastností [78]. Alternativní píky frekvence podélného kmitání obou metod umožňují i takovou interpretaci, ale to bylo vyvráceno měření rychlosti UZ vln.

Vliv vysokých teplot a fyzikálně-chemické procesy ve stavebninách s Portlandským cementem jsou popsány v kapitole 2.4.

Měřicí aparatura s pevně vázaným budičem CONE dosahuje velice blízkých výsledků jako srovnávací metody. Problémem ale je nepředvídatelný vznik frekvenčních píků a zkreslená amplituda frekvenčních maxim. Připevňování budiče a snímače včelím voskem ke vzorku je navíc časově náročné.

5.10 Měření teplotně namáhaných betonových vzorků, receptura A [A12]

Za účelem srovnání výsledků měřicí aparatury s klasickými metodami a pro ověření použitelnosti na velkých standardních trámcích (100x100x400 mm) bylo provedeno měření na identických vzorcích namáhaných různou teplotou. Oproti předešlému experimentu byl použitý reproduktorový budič a mikrofonní snímač, takže příprava měření trvá jen zlomek času.

5.10.1 Experiment a výsledky

Vzorky receptury A byly připraveny v následujících poměrech na 1 m³:
345 kg Portlandského cementu CEM I 42,5 R - Mokrá
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 směs s konzistencí 550 mm (sednutí kužele) byla vložena do forem o rozměrech 100x100x400 mm a zavibrována. Vzorky byly navrženy a vyrobeny panem prof. Helou.

Následně byla tělesa uložena na 28 dní do vody a pak byly sušeny na vzduchu a po 2 dny při teplotě 110 °C v sušičce. Vzorky byly individuálně zahřívány v peci Rhode KE 130B na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C rychlostí 5 °C/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 vozky o délce měřicí základny 400 mm, se pohybuje do cca 15 kHz. Pro tento rozsah byl vhodně použit kontaktní reproduktor jako budič EX60S (kapitola 5.4.4) a bezkontaktní mikrofonní

snímač MEMS (kapitola 5.4.5). Vazebním prostředkem reproduktoru byl Sono gel. Testovacím signálem byla sekvence maximální délky, 17 bitů, s frekvencí generování 100 kHz. 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)

5.10.2 Výsledky

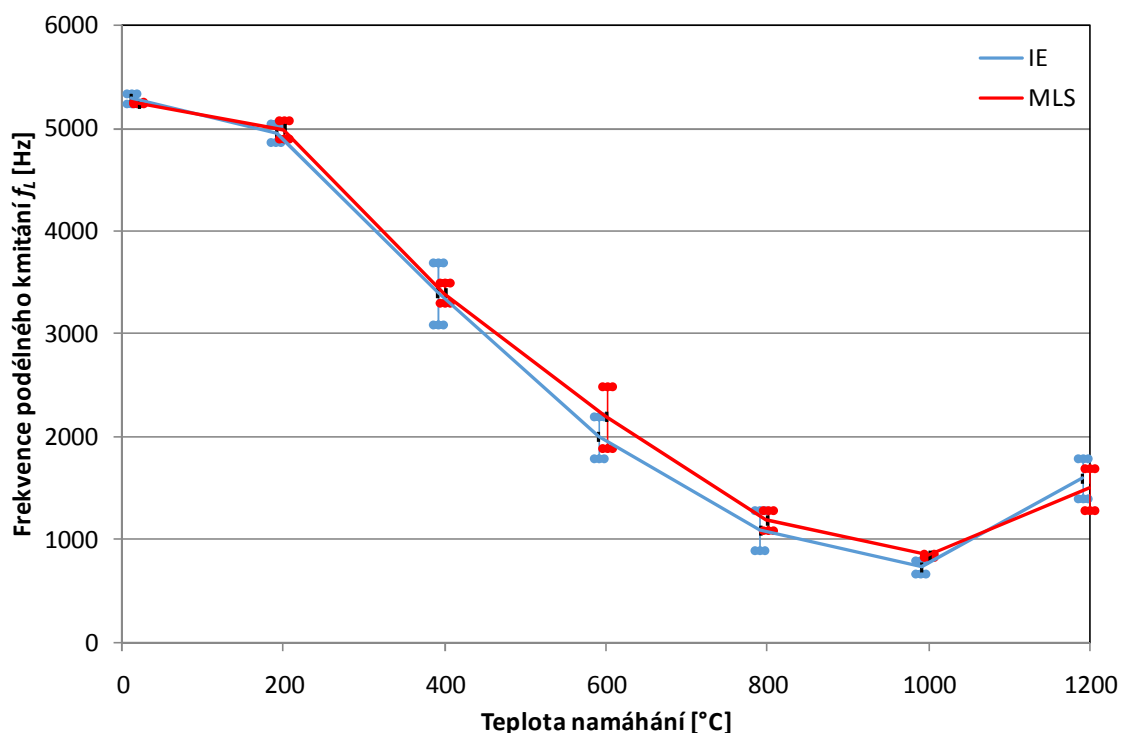
Zkoušená sada trámů se skládala ze tří kusů vzorků namáhaných stejnou teplotou, což umožnilo statistické zpracování výsledků. Na grafech 5-60 až 63 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro jednotlivé teploty namáhání a jejich směrodatná odchylka je vyobrazena jako chybové úsečky. Měřicí aparaturou bylo dosaženo výborné shody frekvence podélného kmitání s metodou impact-echo, a to jak pro průměrné hodnoty teplotních skupin (graf 5-60), tak i v případě individuálních vzorků (tab. 5-7). Významně (<20%) se lišily především hodnoty f_L měřené u vzorků namáhaných teplotou 1200 °C.

Při měření rychlosti UZ vln přístrojem PUNDIT bylo dosaženo také dobré shody s měřicí aparaturou (graf 5-61). Velký rozdíl, který nastal při měření vzorků namáhaných teplotou 200 °C a 400 °C, je nejspíš důsledkem systematické chyby. I malé oddálení mikrofonního čidla od vzorku má za následek snížení měřené rychlosti UZ vln. Gelová vazba budiče se vzorkem může být také zdrojem chyb měření.

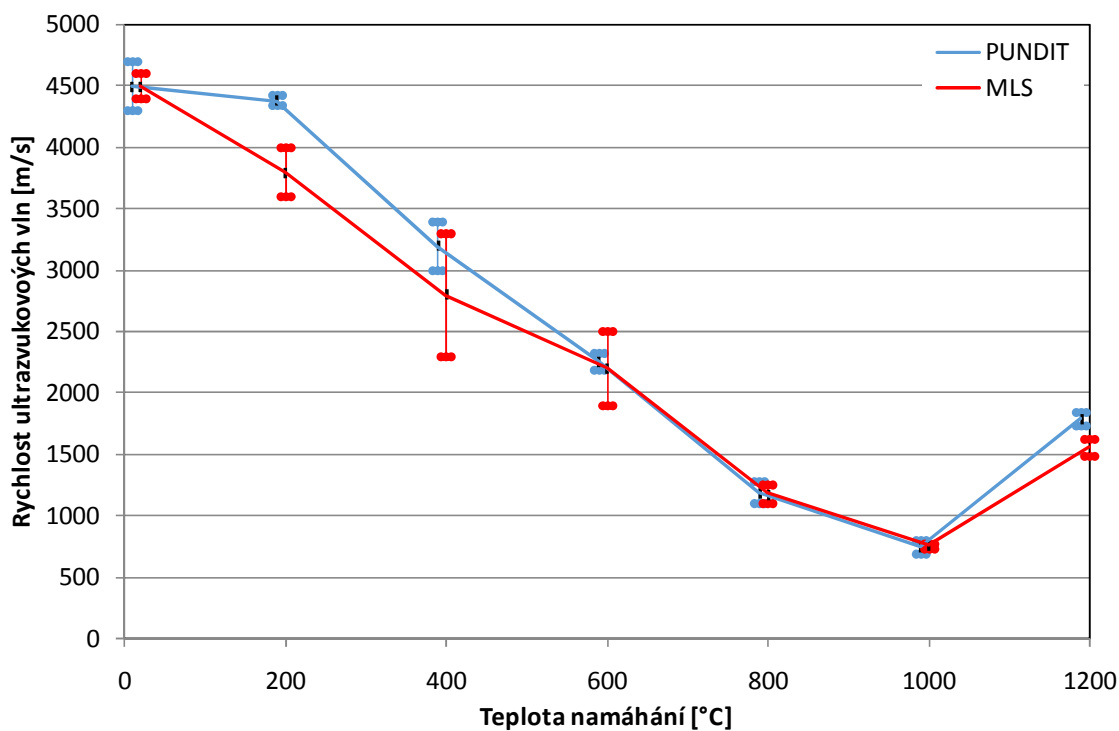
Frekvence podélných kmitů změřená metodou IE a rychlost UZ vln, měřená přístrojem PUNDIT, byly přepočítány podle rovnice 2-11, respektive 2-6, na dynamický modul pružnosti. Průběh obou dynamických modulů (graf 5-62) je velmi podobný, ale je nutné podotknout, že pro výpočet E_{cu} z rychlosti UZ vln byl použitý odhadnutý v_{dyn} . Proto má metoda IE větší vypovídací hodnotu.

Průběh parametru α poukazuje na překvapivé zhoršení materiálových vlastností pro teplotu 800 °C. Výrazný pokles má za následek dvojnásobná hodnota α pro vzorek A27-800C (tab. 5-7). Ze statistiky jen třech vzorků je obtížné usuzovat, zda se jedná o odlehlou hodnotu, nebo jsou při této teplotě některé vzorky významněji poškozené než ostatní. Při teplotě 800 °C se odehrává druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba β -C₂S, ale zároveň začíná vznikat keramická vazba, která nahrazuje hydraulické vazby.

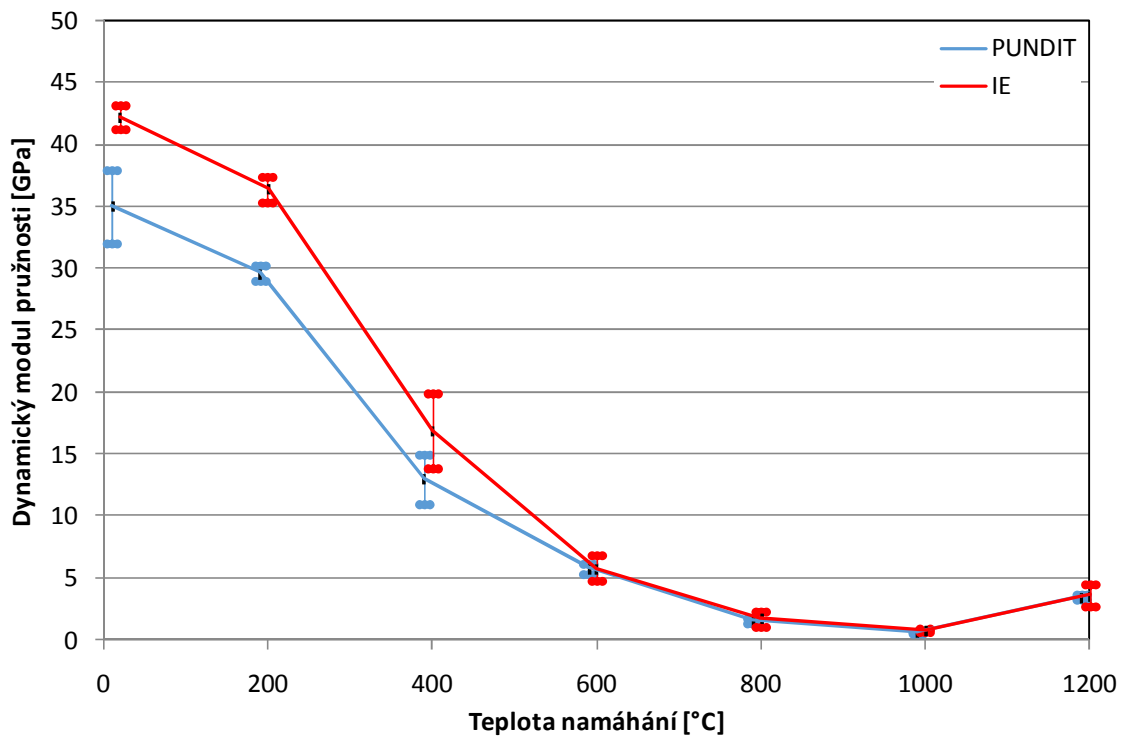
Pak je tedy možné, že u vzorku A27-800C ještě nedošlo ke vzniku keramické vazby, která materiálové vlastnosti výrazně zlepšuje, viz kapitola 2.4.



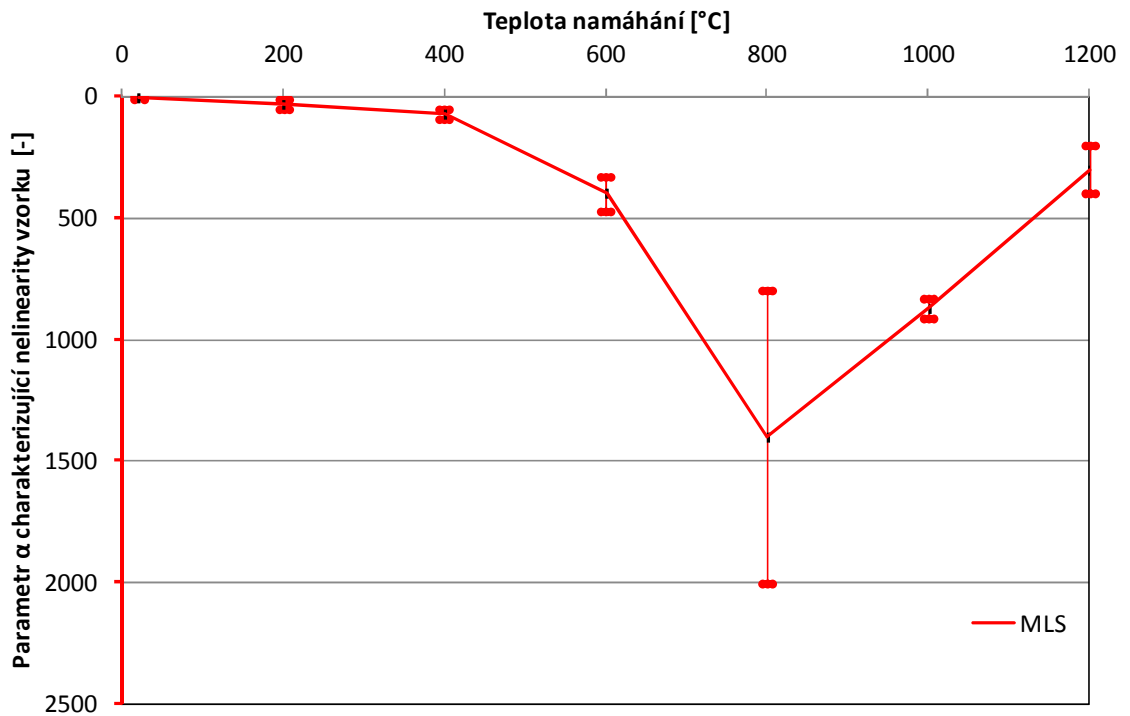
Graf 5-60: Frekvence podélného kmitání měřena metodou Impact-echo a navrženou měřicí aparaturou



Graf 5-61: Rychlost UZ vln měřena impulzní metodou (přístroj PUNDIT) a navrženou měřicí aparaturou



Graf 5-62: Závislost E_{crL} a E_{crf} na teplotě namáhání vzorku



Graf 5-63: Nelineární parametr α měřený navrženou měřicí aparaturou

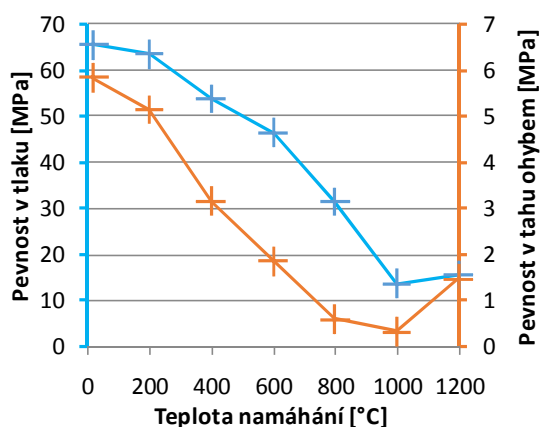
Označení	Teplota	v_{MLS}	v_{MLS}	Rel.	$IE f_L$	$MLS f_L$	$\Delta f_L (IE)$	Frekvence	Rel.	$\alpha \cdot 10^5$	Nelineární
Tab. 5-7: Souhrn výsledků měření aparaturou s MLS signálem											
A02-020	20	4651	(4500 ± 100) 2%	5316	5230	-1,6%	(5250 ± 10) 0,2%	-3	(5 ± 7)
A03-020		4379			5328	5252	-1,4%			8	
A04-020		4439			5328	5258	-1,3%			9	
A08-200	200	3734	(3800 ± 200) 5%	4959	4982	0,5%	(4990 ± 90) 2%	27	(30 ± 20)
A09-200		4010			5042	5082	0,8%			5	
A10-200		3650			4869	4908	0,8%			54	
A14-400	400	2285	(2800 ± 500) 18%	3260	3349	2,7%	(3400 ± 100) 3%	91	(70 ± 20)
A15-400		3048			3111	3241	4,2%			57	
A17-400		3169			3433	3536	3,0%			72	
A20-600	600	1899	(2200 ± 300) 14%	1645	1932	17,4%	(2200 ± 300) 14%	473	(400 ± 70)
A21-600		2350			2253	2447	8,6%			336	
A22-600		2377			2217	2321	4,7%			383	
A27-800	800	1095	(1180 ± 80) 7%	912	1035	13,5%	(1200 ± 100) 8%	2120	(1400 ± 600)
A28-800		1236			1072	1285	19,9%			1086	
A30-800		1218			1025	1228	19,8%			1102	
A34-1000	1000	760	(760 ± 20) 3%	750	860	14,7%	(850 ± 20) 2%	845	(870 ± 40)
A46-1000		775			778	852	9,5%			852	
A47-1000		743			752	826	9,9%			910	
A38-1200	1200	1632	(1560 ± 70) 4%	1561	1608	3,0%	(1500 ± 200) 13%	255	(300 ± 100)
A39-1200		1490			1222	1280	4,8%			478	
A40-1200		1564			1622	1689	4,1%			243	
Délka měřící základny [mm]				400	Pozn.: datum měření: 25. května 2016; t_{vzd} : 23°C, RH: 25%, tlak: 102 kPa						

Tab. 5-8: Souhrn výsledků měření impulzní ultrazvukovou metodou přístrojem PUNDIT

Označení vzorku	Teplota [°C]	Hmotnost [kg]	PUNDIT T_{min} [μs]	v_{PUNDIT} [m/s]	λ_L [cm]	v_{PUNDIT} [m/s]	Rel. Chyba	Odhad v_{dyn} [-]	Dyn. modul pružnosti E_{cu} [GPa]	Rel. Chyba	
A01-20	20	9,296	86,7	4614	8,3	(4500 ± 200) 4%	0,27	(35 ± 3) 9%	
A04-20		9,387	84,9	4711							
A06-20		9,351	94,1	4251							
A08-200	200	9,182	90,9	4400	8,1	(4380 ± 40) 1%	0,25	(29,6 ± 0,6) 2%	
A11-200		9,231	90,9	4400							
A12-200		9,314	92,2	4338							
A13-400	400	9,165	130	3077	5,9	(3200 ± 200) 6%	0,22	(13 ± 2) 13%	
A16-400		9,079	119,4	3350							
A17-400		9,169	129,4	3091							
A19-600	600	9,403	183,4	2181	4,2	(2260 ± 70) 3%	0,20	(5,8 ± 0,4) 7%	
A22-600		8,803	174,7	2290							
A24-600		9,158	172,5	2319							
A26-800	800	9,100	368,4	1086	2,2	(1190 ± 90) 8%	0,20	(1,6 ± 0,2) 15%	
A29-800		8,786	321,5	1244							
A30-800		9,006	325,5	1229							
A34-1000	1000	8,900	566,4	706	1,4	(750 ± 50) 7%	0,20	(0,63 ± 0,08) 13%	
A36-1000		8,976	548,5	729							
A45-1000		8,970	496,5	806							
A40-1200	1200	8,620	228,4	1751	3,3	(1790 ± 50) 3%	0,20	(3,5 ± 0,2) 6%	
A41-1200		8,945	216,5	1848							
A42-1200		8,968	226,5	1766							
Délka měřící základny [mm]				400	Frekvence UZ pulzu [kHz]		54				

Tab. 5-9: Souhrn výsledků měření teplotně namáhaných maltových trámů

Označení vzorku	Teplota [°C]	Hmotnost [kg]	$IE f_L$ [Hz]	$IE f_L$ [Hz]	Rel. Chyba	Dyn. modul pružnosti E_{crL} [GPa]	Rel. Chyba
A01	20	9,3105	5233	(5290 ± 50) 1%	(42 ± 1) 2%
A02		9,414	5316				
A03		9,37	5328				
A04		9,43	5328				
A05		9,386	5215				
A06		9,624	5287				
A07	200	9,236	5066	(4950 ± 90) 2%	(36 ± 1) 4%
A08		9,206	4959				
A09		9,393	5042				
A10		9,296	4869				
A11		9,246	4887				
A12		9,296	4863				
A13	400	9,1315	3248	(3400 ± 300) 9%	(17 ± 3) 18%
A14		9,302	3260				
A15		9,2095	3111				
A16		9,026	3755				
A17		9,124	3433				
A18		9,022	3886				
A19	600	9,346	1800	(2000 ± 200) 10%	(6 ± 1) 20%
A20		9,139	1645				
A21		9,209	2253				
A22		8,742	2217				
A23		8,906	1850				
A24		9,095	2122				
A25	800	8,913	1550	(1100 ± 200) 18%	(2 ± 1) 36%
A26		9,06	935				
A27		8,838	912				
A28		8,9795	1072				
A29		8,7585	1095				
A30		8,977	1025				
A45	1000	8,962	609	(740 ± 60) 8%	(0,8 ± 0,1) 16%
A46		8,775	778				
A47		8,9716	752				
A34		9,3065	750				
A35		9,369	760				
A36		9,3745	782				
A37	1200	9,045	1746	(1600 ± 200) 13%	(4 ± 1) 25%
A38		8,798	1561				
A39		8,894	1222				
A40		8,6195	1622				
A41		8,8945	1746				
A42		8,903	1633				
Délka měřicí základny [mm]			400				
Pozn.: datum měření: 17. dubna 2016; teplota vzduchu: 23°C, RH: 32%, tlak: 102 kPa							



Graf 5-64: Pevnostní závislost

Tab. 5-10: Souhrn destruktivních testů

Označení vzorku	Teplota [°C]	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	Poměr f_{ct}/f_c [-]
A05-20	20,00	65,5	5,82	8,9%
A07-200	200,00	63,4	5,13	8,1%
A18-400	400,00	53,8	3,15	5,9%
A23-600	600,00	46,4	1,86	4,0%
A25-800	800,00	31,3	0,60	1,9%
A35-1000	1000,00	13,5	0,33	2,4%
A42-1200	1200,00	15,5	1,47	9,5%

Pozn.: Měřeno zhutněnou stranou nahoru.
Hodnoty f_{ct} jsou průměrem ze dvou měření.

5.10.3 Závěr

Měřením bylo dosaženo dobré shody se srovnávacími metodami. Průběhy zjištěných charakteristik odpovídají destruktivním zkouškám (graf 5-64, tab. 5-9).

Měření MLS signálem za použití kontaktního reproduktoru EX60S s gelovou vazbou a bezkontaktního MEMS mikrofonu je přesné a navíc výrazně rychlejší oproti předešlému experimentu (kapitola 5.10). Rychlostí měření je ale vykoupena menší spolehlivostí měření rychlosti průchodu UZ vln.

5.11 Měření teplotně namáhaných betonových vzorků, receptura B

V následujícím experimentu bylo testováno výrazně větší množství vzorků, proto je tato kapitola zaměřena především na validaci výsledků jednotlivých vzorků získaných měřicí aparaturou s výsledky srovnávacích metod.

5.11.1 Experiment

Vzorky receptury B byly připraveny v následujících poměrech na 1 m³:

345 kg Portlandského cementu CEM I 42,5 R - Mokrá

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 směs s konzistencí 150 mm (sednutí kužele) byla vložena do forem o rozměrech 100x100x400 mm a zavibrována. Následující ošetřování, sušení a teplotní namáhání bylo provedeno za identických podmínek jako v případě receptury A. Vzorky byly navrženy a vyrobeny panem prof. Helou.

Frekvenční oblast, ve které se provádí analýza pro vzorky o délce měřicí základny 400 mm, se pohybuje do cca 15 kHz. Pro tento rozsah byl vhodně použit kontaktní reproduktor jako budič EX60S (kapitola 5.4.4) a bezkontaktní mikrofonní snímač MEMS (kapitola 5.4.5). Vazebním prostředkem reproduktoru byl Sono gel. Testovacím signálem byla sekvence maximální délky 17 bitů s frekvencí generování 100 kHz. 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).

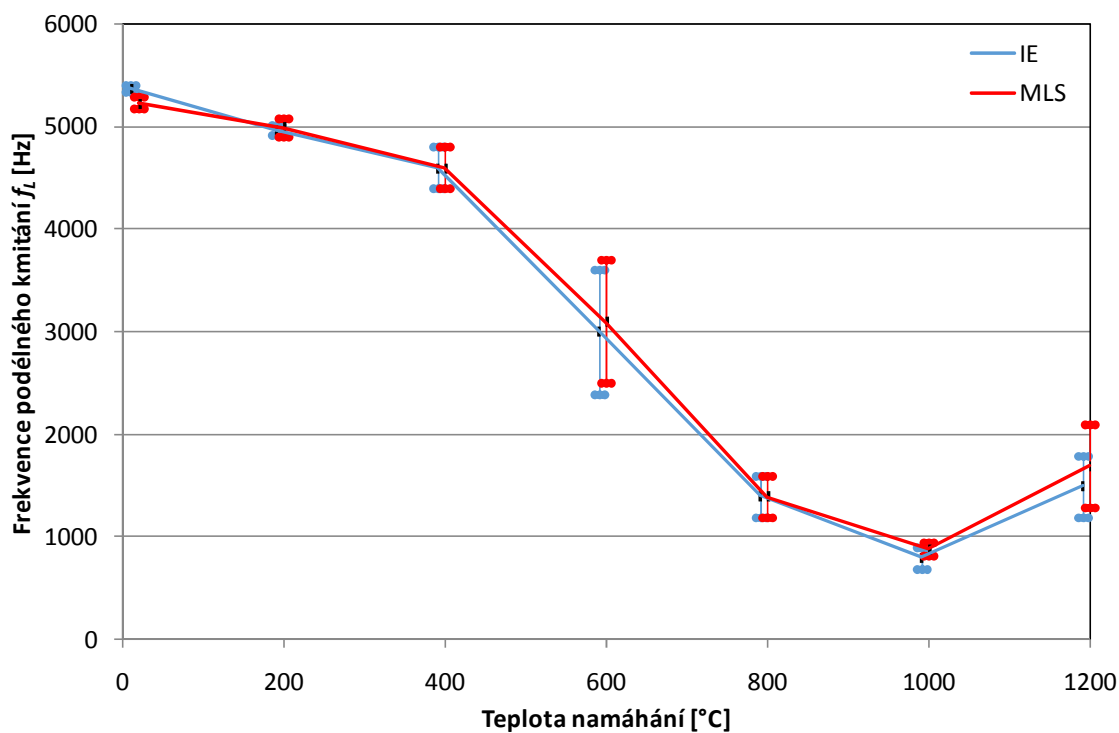
5.11.2 Výsledky

Zkoušená sada trámů se skládala ze šesti kusů vzorků namáhaných stejnou teplotou, což umožnilo statistické zpracování výsledků. Na grafech 5-65 až 68 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro jednotlivé teploty namáhání a jejich směrodatná odchylka je vyobrazena jako chybové úsečky. Měřicí aparaturou bylo dosaženo výborné shody frekvence podélného kmitání s metodou impact-echo, a to jak pro průměrné hodnoty teplotních skupin (graf 5-65), tak i v případě individuálních vzorků (tab. 5-15). Významně (<20%) se lišily především hodnoty f_L , měřené u vzorků namáhaných teplotou 1000 a 1200 °C.

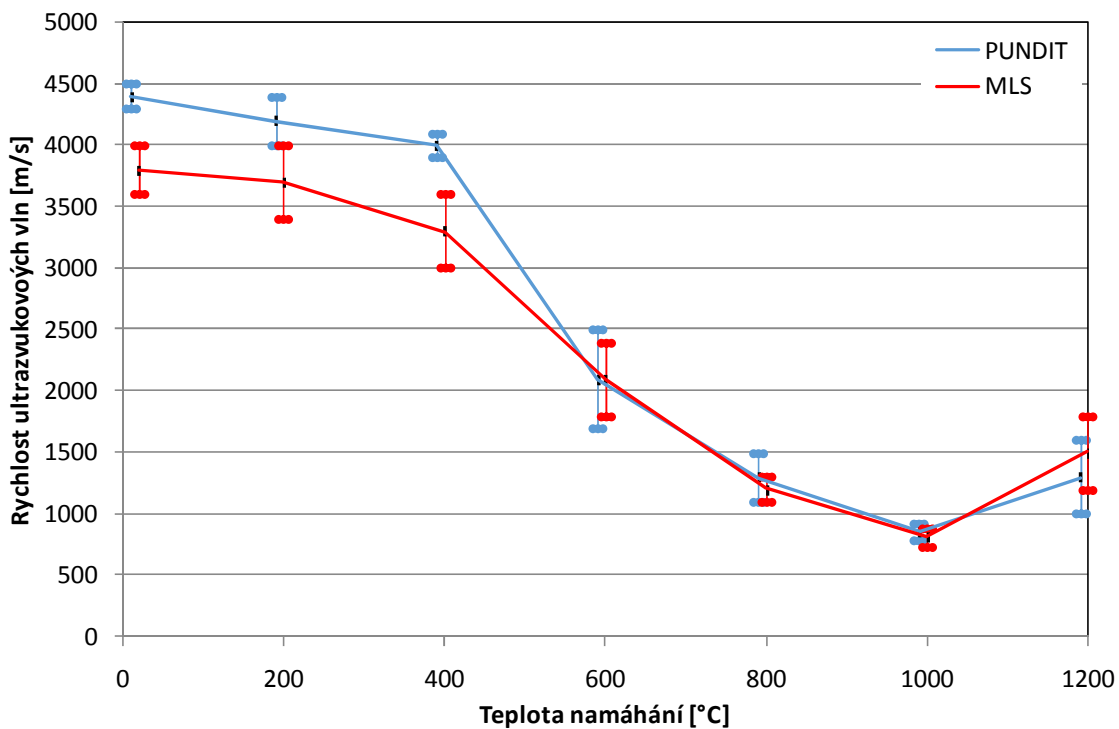
Při měření rychlosti UZ vln přístrojem PUNDIT bylo dosaženo také dobré shody s měřicí aparaturou (graf 5-66). Velký rozdíl, který nastal při měření vzorků namáhaných teplotou 20 °C, 200 °C a 400 °C, je nejspíš důsledkem systematické chyby. I malé oddálení mikrofonního čidla od vzorku má za následek snížení měřené rychlosti UZ vln. Gelová vazba budiče se vzorkem může být také zdrojem chyb měření.

Frekvence podélných kmitů změřená metodou IE a rychlost UZ vln, měřená přístrojem PUNDIT, byly přepočítány podle rovnice 2-11, respektive 2-6, na dynamický modul pružnosti. Průběh obou dynamických modulů (graf 5-67) je velmi podobný, nutné je ale podotknout, že pro výpočet E_{cu} z rychlosti UZ vln byl použitý odhadnutý v_{dyn} . Proto má metoda IE větší vypovídací hodnotu.

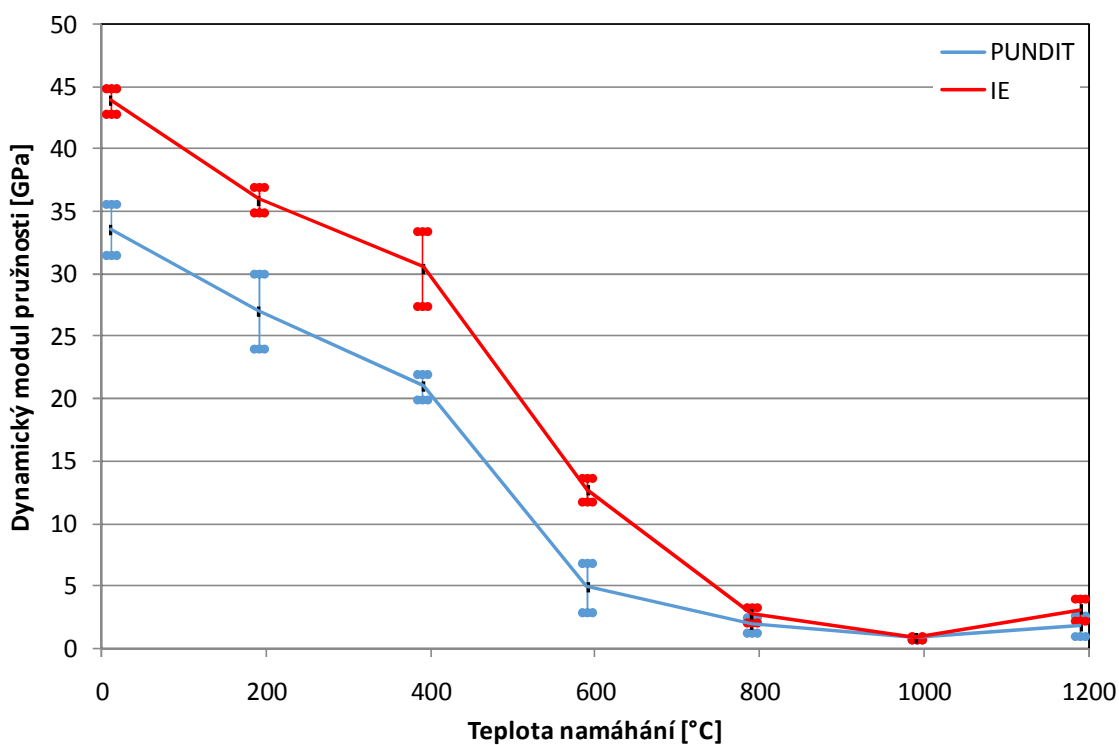
Průběh parametru α naznačuje minimální změny v mikrostruktuře betonu do 20 až 400 °C a zároveň je patrné výrazné zhoršení materiálových vlastností pro teploty 800 °C a 1000 °C. Při teplotě 1200 °C se vlivem rekrystalizace α parametr zlepšuje.



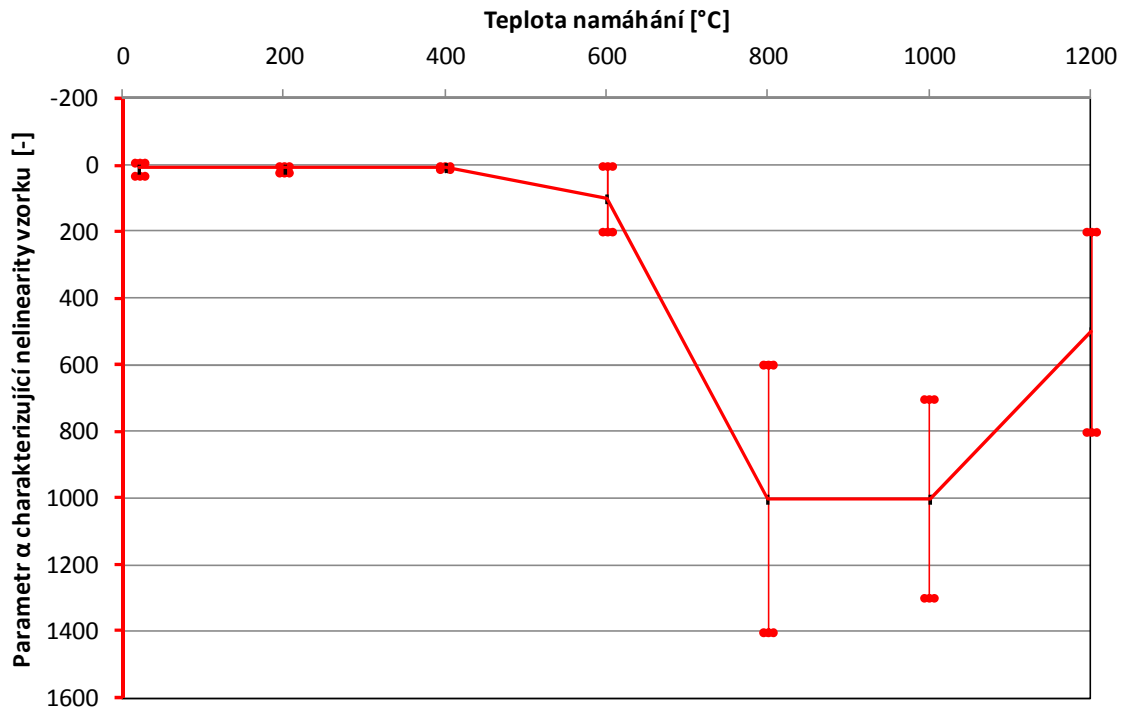
Graf 5-65: Frekvence podélného kmitání měřena metodou Impact-echo a navrženou měřicí aparaturou



Graf 5-66: Rychlost UZ vln měřena impulzní metodou (přístroj PUNDIT) a navrženou měřicí aparaturou



Graf 5-67: Závislost E_{crL} a E_{crf} na teplotě namáhání vzorku



Graf 5-68: Nelineární parametr α měřený navrženou měřicí aparaturou.

Tab. 5-11: Souhrn výsledků měření impulzní UZ metodou přístrojem PUNDIT

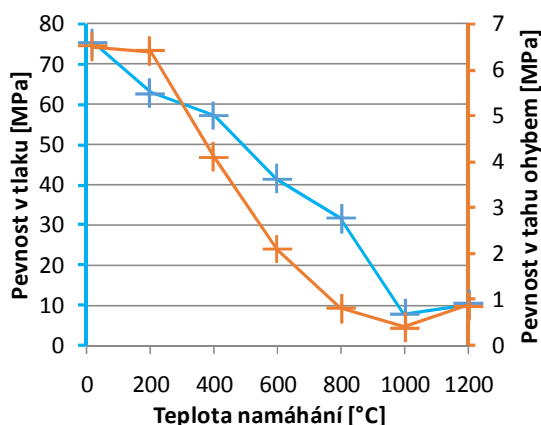
Označení vzorku	Teplota [°C]	Hmotnost [kg]	PUNDIT T_{min} [μs]	v_{PUNDIT} [m/s]	λ_L [cm]	v_{PUNDIT} [m/s]	Rel. Chyba	Odhad v_{dyn} [-]	E_{cu} [GPa]	Rel. Chyba
B01-20	20	9,389	88	4545	8,1	(4400 ± 100) 2%	0,27	(34 ± 2) 5%
B02-20		9,475	92	4348						
B05-20		9,260	90	4444						
B10-200	200	9,154	102	3922	7,8	(4200 ± 200) 5%	0,25	(27 ± 3) 10%
B11-200		9,239	94	4255						
B12-200		9,119	93	4301						
B19-400	400	9,156	104	3846	7,4	(4000 ± 100) 3%	0,22	(21 ± 1) 5%
B20-400		9,157	97	4124						
B21-400		9,218	102	3922						
B28-600	600	9,007	220	1818	3,9	(2100 ± 400) 19%	0,20	(5 ± 2) 38%
B29-600		8,955	205	1951						
B35-600		8,965	161	2484						
B40-800	800	9,051	269	1487	2,4	(1300 ± 200) 15%	0,20	(1,9 ± 0,6) 31%
B42-800		8,828	297	1347						
B45-800		8,878	345	1159						
B46-1000	1000	8,712	480	833	1,6	(860 ± 70) 8%	0,20	(0,8 ± 0,1) 16%
B47-1000		9,004	425	941						
B48-1000		8,970	500	800						
B56-1200	1200	8,614	414	966	2,4	(1300 ± 300) 23%	0,20	(1,8 ± 0,8) 46%
B57-1200		8,574	307	1303						
B61-1200		8,763	245	1633						
Délka měřicí základny [mm]			400	Frekvence UZ pulzu [kHz]		54				

Tab. 5-12: Souhrn výsledků měření aparaturou s MLS signálem

Označení vzorku	Teplota [°C]	v_{MLS} [m/s]	MLS f_L [Hz]	v_{MLS} [m/s]	Rel. Chyba	Frekvence MLS f_L [Hz]	Rel. Chyba	$\alpha \cdot 10^5$ [-]	Nelineární koef. $\alpha \cdot 10^5$ [-]
B01-020	20	3845	5257	(3800 ± 200) 5%	(5230 ± 60) 1%	8	(10 ± 20)
B02-020		3472	5305					2	
B04-020		3851	5272					7	
B05-020		4119	5173					49	
B06-020		3847	5184					0	
B07-020		3586	5188					-5	
B10-200		200	4231					5039	
B11-200	3712		5091	25					
B12-200	3748		5059	13					
B13-200	3395		4935	8					
B14-200	3757		4946	7					
B15-200	3408		4870	4					
B19-400	400	3199	4739	(3300 ± 300) 9%	(4600 ± 200) 4%	4	(8 ± 5)
B20-400		3738	4926					16	
B21-400		3336	4672					4	
B22-400		3349	4485					7	
B23-400		3586	4634					5	
B26-400		2771	4209					9	
B28-600	600	1689	2209	(2100 ± 300) 14%	(3100 ± 600) 19%	342	(100 ± 100)
B29-600		1775	2464					307	
B29-600		1706	2465					286	
B33-600		2267	3087					157	
B33-600		2112	3083					146	
B34-600		2313	3512					62	
B34-600		2371	3509					43	
B35-600		2308	3486					48	
B35-600		2348	3483					47	
B36-600		2424	3830					18	
B40-800		800	1344					1662	
B41-800	1214		1469	846					
B42-800	1192		1335	528					
B43-800	1210		1270	1241					
B44-800	918		1199	1067					
B45-800	1056		1251	1619					
B46-1000	1000	767	829	(810 ± 80) 10%	(890 ± 70) 8%	987	(1000 ± 300)
B47-1000		939	982					1031	
B48-1000		761	835					824	
B49-1000		838	968					522	
B50-1000		846	878					1003	
B53-1000		729	820					1365	
B55-1200	1200	1363	1540	(1500 ± 300) 20%	(1700 ± 400) 24%	435	(500 ± 300)
B56-1200		1051	1021					1149	
B57-1200		1379	1484					660	
B58-1200		1585	1822					317	
B61-1200		1830	2012					290	
B63-1200		1668	2053					225	
Délka měřicí základny [mm]								400	

Tab. 5-13: Souhrn výsledků měření teplotně namáhaných maltových trámů

Označení vzorku	Teplota [°C]	Hmotnost [kg]	$IE f_L$ [Hz]	$IE f_L$ [Hz]	Relativní Chyba	Dyn. modul pružnosti E_{crl} [GPa]	Relativní Chyba			
B01	20	9,542	5382	(5370 ± 30) 1%	(44 ± 1) 2%			
B02		9,628	5406							
B03		9,558	5352							
B04		9,491	5388							
B05		9,415	5334							
B06		9,523	5340							
B07		9,444	5334							
B08		9,586	5418							
B09		9,399	5328							
B10		9,166	4977					(4960 ± 50) 1%	(36 ± 1)
B11	9,245	5018								
B12	9,127	5006								
B13	9,036	4911								
B14	9,163	4917								
B15	8,971	4875								
B16	9,100	4941								
B17	9,136	5036								
B18	9,275	4953								
B19	9,073	4726	(4600 ± 200) 4%	(30 ± 3) 9%				
B20	9,082	4923								
B21	9,153	4673								
B22	8,997	4458								
B23	9,056	4577								
B24	8,943	4488								
B25	8,878									
B26	8,858	4130								
B27	9,019									
B28	8,908	2038					(3000 ± 600) 20%	(13 ± 5) 40%
B29	8,866	2360								
B30	8,678	2235								
B31	8,695	2986								
B32	8,898	3457								
B33	8,914	2968								
B34	8,784	3445								
B35	8,868	3415								
B36	8,925	3773								
B37	8,705									
B38	8,858	1472	(1400 ± 200) 14%	(3 ± 1) 29%				
B39	8,719	1597								
B40	8,917	1508								
B41	8,840	1406								
B42	8,737	1329								
B43	8,870	1198								
B44	8,783	1217								
B45	8,760	1162								
B46	8,676	703					(800 ± 100) 13%	(0,9 ± 0,2) 25%
B47	8,936	804								
B48	8,933									
B49	8,731	816								
B50	8,616	865								
B51	8,587	1007								
B52	8,659	757								
B53	8,859									
B54	8,820	733								
B55	8,614	1371	(1500 ± 300) 20%	(3 ± 1) 40%				
B56	8,599	906								
B57	8,560	1353								
B58	8,705	1573								
B59	8,733	1335								
B60	8,734	1609								
B61	8,748	1853								
B62	8,626	1788								
B63	8,687	1865								



Graf 5-69: Pevnostní závislost

Tab. 5-14: Souhrn destruktivních testů

Označení vzorku	Teplota [°C]	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	Poměr f_{ct}/f_c
B08,09	20	75,1	6,50	8,66
B16,18	200	62,6	6,40	10,22
B24,25	400	57,1	4,10	7,18
B30,31	600	41,4	2,10	5,07
B38,39	800	31,4	0,81	2,58
B51,52	1000	7,7	0,40	5,19
B59,60	1200	10,1	0,86	8,51

Pozn.: Měřeno zhuťnou stranou nahoru.
 Hodnoty f_{ct} jsou průměrem ze 2 měření.
 Hodnoty f_c jsou průměrem ze 4 měření.

5.11.3 Závěr

Měřením bylo dosaženo dobré shody se srovnávacími metodami. Průběhy zjištěných charakteristik odpovídají destruktivním zkouškám (graf 5-69, tab. 5-14).

Měření MLS signálem za použití kontaktního reproduktoru EX60S s gelovou vazbou a bezkontaktního MEMS mikrofonu je přesné a navíc výrazně rychlejší oproti kontaktní vazbě měničů (kapitola 5.10). Rychlostí měření je ale vykoupena výrazně menší spolehlivost měření rychlosti průchodu UZ vln.

5.11.4 Srovnání s výsledky měřicí sestavy a klasických metod

Tématem disertační práce je návrh měřicí aparatury a ověření dosažených výsledků s dalšími akustickými metodami používanými ve stavebnictví. V experimentální části práce byly sice výsledky srovnávány s dalšími metodami, ale šlo především o statisticky zpracovaná data jednotlivých skupin těles, namáhaných stejnou teplotou, za účelem popsání fyzikálně-chemických pochodů.

Měření navrženou aparaturou a metodou impact-echo bylo provedeno na celkem 40 vzorcích receptury B, z toho 21 vzorků bylo testováno přístrojem PUNDIT. Hodnoty podélných frekvencí jednotlivých vzorků (tab. 5-16) jsou ve výborné shodě ve většině případů. Výjimkou jsou především vzorky namáhané teplotou 1000 °C a 1200 °C. Pravděpodobným důvodem vzniklé odlišnosti mohou být odlišné podmínky při testování. Vypálením vzorku nad teplotu 900 °C vzniká nehasené vápno (CaO), které snadno absorbuje vzdušnou vlhkost, ale i gelový vazební prostředek použitý při

testování. Významnou roli může hrát i fakt, že vzorky byly měřicí aparaturou testovány s delším časovým odstupem od vypálení, na rozdíl od metody impact-echo.

Měření rychlosti UZ vln mikrofonním snímačem MEMS není přesné (tab. 5-15). Stačí malé oddálení snímače od vzorku a tato systematická chyba zásadně změní výsledek. Tento závěr byl potvrzen měřením na receptuře A (tab. 5-7) a zároveň měřením na receptuře B (tab. 5-16). Měření rychlosti UZ vln je výrazně spolehlivější, pokud se použije kontaktního vazebního prostředku (kapitola 5.9 tab. 5-6).

Porovnání výsledů s klasickými akustickými metodami pro jednotlivé vzorky kapitol 5.9 až 5.11 je v tabulkách zobrazeno jako podbarvený sloupec s limitní hodnotou 5%, respektive 10%.

Tab. 5-15: Srovnání výsledků aparatury s MLS signálem a přístrojem PUNDIT

Označení vzorku	v_{MLS} [m/s]	v_{PUNDIT} [m/s]	Δv (IE, MLS)
B01-20	3845	4545	18,2%
B02-20	3472	4348	25,2%
B05-20	4119	4444	7,9%
B10-200	4231	3922	-7,3%
B11-200	3712	4255	14,7%
B12-200	3748	4301	14,7%
B19-400	3199	3846	20,2%
B20-400	3738	4124	10,3%
B21-400	3336	3922	17,5%
B28-600	1689	1818	7,6%
B29-600	1775	1951	9,9%
B35-600	2308	2484	7,6%
B40-800	1344	1487	10,6%
B42-800	1192	1347	13,0%
B45-800	1056	1159	9,8%
B46-1000	767	833	8,6%
B47-1000	939	941	0,2%
B49-1000	761	800	5,1%
B56-1200	1051	966	-8,1%
B57-1200	1379	1303	-5,5%
B61-1200	1830	1633	-10,8%

Tab. 5-16: Srovnání výsledků aparatury s MLS signálem a metody IE.

Označení vzorku	MLS f_L [Hz]	IE f_L [Hz]	diff. v (IE, MLS) [%]
B01-020	5257	5382	2,4%
B02-020	5305	5406	1,9%
B04-020	5272	5352	1,5%
B05-020	5173	5334	3,1%
B06-020	5184	5340	3,0%
B07-020	5188	5334	2,8%
B10-200	5039	4977	-1,2%
B11-200	5091	5018	-1,4%
B12-200	5059	5006	-1,0%
B13-200	4935	4911	-0,5%
B14-200	4946	4917	-0,6%
B15-200	4870	4875	0,1%
B19-400	4739	4726	-0,3%
B20-400	4926	4923	-0,1%
B21-400	4672	4673	0,0%
B22-400	4485	4458	-0,6%
B23-400	4634	4577	-1,2%
B26-400	4209	4130	-1,9%
B28-600	2209	2038	-7,7%
B29-600	2464	2360	-4,2%
B33-600	3087	2968	-3,8%
B34-600	3509	3445	-1,8%
B35-600	3483	3415	-2,0%
B36-600	3830	3773	-1,5%
B40-800	1662	1508	-9,2%
B41-800	1469	1406	-4,3%
B42-800	1335	1329	-0,5%
B43-800	1270	1198	-5,7%
B44-800	1199	1217	1,5%
B45-800	1251	1162	-7,1%
B46-1000	829	703	-15,2%
B47-1000	982	804	-18,2%
B49-1000	968	816	-15,7%
B50-1000	878	865	-1,5%
B55-1200	1540	1371	-11,0%
B56-1200	1021	906	-11,3%
B57-1200	1484	1353	-8,8%
B58-1200	1822	1573	-13,7%
B61-1200	2012	1853	-7,9%
B63-1200	2053	1865	-9,1%

6 ZÁVĚR

Cílem disertační práce byl výzkum pulzní komprese signálu a využití pseudonáhodné sekvence pro zjištění akustických vlastností stavebních materiálů. Za tímto účelem byly popsány relevantní akustické metody používané ve stavebnictví a zároveň byla objasněna úskalí impulzního buzení a převodu signálu do frekvenční oblasti. Pro svoje ideální vlastnosti, které byly detailně popsány, byla sekvence maximální délky vybrána jako nejvhodnější pseudonáhodný budící signál. V experimentální části je popsána měřicí sestava a operce digitální signálové analýzy, kterou vykonává navržený program.

Testovací proces je automatizovaný do takové míry, že umožňuje kontinuální měření. Této funkcionality bylo využito při měření změny frekvence podélného kmitání schnoucího maltového vzorku. Experimentem se ověřilo, že mokré vzorky vykazují až o 13 % vyšší dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku ve srovnání se suchými vzorky. Měření je natolik přesné, že odhalilo i vliv teploty okolního vzduchu na frekvenci podélného kmitání vzorku.

V průběhu práce byly prováděny experimenty s různými druhy budičů, snímačů a vazebních prostředků. Gelová vazba budiče spolu s bezkontaktním mikrofonním snímačem výrazně urychlí přípravnou fázi měření za cenu méně přesného stanovení rychlosti šíření ultrazvukových vln. Pevná vazba budiče i snímače je vhodná především pro kontinuální měření, protože nedochází ke vstřebávání vlhkosti z vazebního prostředí do testovaného vzorku.

Jedna kapitola práce je věnována získání přenosové charakteristiky samotného vzorku bez vlivu měřicí sestavy. Byl použit časově náročný parametrický přístup pomocí modelu „output-error“, ale i neparametrický přístup využívající dekonvoluce.

Za účelem ověření použitelnosti navržené metody a aparatury bylo provedeno měření 68 vzorků nahnanými zvýšenou teplotu. Pro většinu výsledků bylo dosaženo dobré shody se srovnávacími akustickými metodami (impact-echo a pulzní ultrazvuková metoda). Pro úplnost byly provedeny i destruktivní srovnávací metody (pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem).

Výhody navržené testovací aparatury se signálem MLS

1. *Vysoké rozlišení ve frekvenční oblasti je umožněno pulzní kompresí budícího signálu.*
2. *Minimalizace nelinearit díky budícímu signálu s nízkým činitelem výkyvu.*
3. *Velká část frekvenčního spektra je téměř rovná, proto je signál ideální pro získání přenosové charakteristiky.*
4. *Blízké pole budiče je vyrušeno multifrekvenčním signálem.*
5. *Sekvence maximální délky je imunní vůči okolnímu šumu.*
6. *Signál lze jednoduše generovat několika hardwarovými komponentami.*
7. *Navržený binární zesilovač je schopný zesílit signál na 250 V.*
8. *Měřicí sestava umožňuje automatizované kontinuální měření.*
9. *Vysoká rychlost samotného testu a přípravy na test (pokud je použita gelová a bezkontaktní vazba).*
10. *Program hromadně zpracovává měření a klíčové údaje jsou vyexportovány spolu s grafy frekvenční analýzy.*
11. *Až na několik objasněných výjimek bylo dosaženo dobré shody se srovnávacími metodami (IE, PUNDIT).*
12. *Určení nelineárního parametru α z opakovaného testování s narůstající amplitudou budícího signálu.*
13. *Frekvence podélného kmitání vzorku je určena pro signál s nulovou amplitudou, takže lépe charakterizuje LTI systém.*
14. *Určení rychlosti podélného vlnění.*
15. *Program umožňuje testování IRS sekvencí, obdélníkovým signálem, nebo záznam a analýzu metody impact-echo.*

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WIRDELIUS, H. a G. PERSSON. *Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic inspection procedure. International Journal of Fatigue.* 2012, 41, 23-29. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.09.002. ISSN 01421123. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112311002398>
- [2] AGGELIS, Dimitrios G. *Wave propagation through engineering materials; assessment and monitoring of structures through non-destructive techniques. Materials and Structures.* 2013, 46(4), 519-532. DOI: 10.1617/s11527-013-0020-x. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0020-x>
- [3] CHIRA, Liviu-Teodor, Jean-Marc GIRAULT a Corneliu RUSU. *Into the ultrasound deconvolution using CLEAN algorithm - statistical analysis of scatters detection. 2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications. IEEE, 2012, , 299-302. DOI: 10.1109/ISETC.2012.6408106. ISBN 978-1-4673-1176-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6408106>*
- [4] DAI, Xiaowei, Michael R. HABERMAN, Yi-Te TSAI a Jinying ZHU. *Excitation of Rayleigh and zero-group-velocity (ZGV) Lamb waves using air-borne N-waves focused by an ellipsoidal reflector. , 030083-030083. DOI: 10.1121/1.4799645. Dostupné také z: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/poma/19/1/10.1121/1.4799645>*
- [5] LORENZI, Alexandre, Luciane Fonseca CAETANO, Josue Argenta CHIES a Luiz Carlos Pinto da SILVA FILHO. *Investigation of the Potential for Evaluation of Concrete Flaws Using Nondestructive Testing Methods. ISRN Civil Engineering.* 2014, 2014, 1-8. DOI: 10.1155/2014/543090. ISSN 2090-5114. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2014/543090/>
- [6] www.olympus-ims.com [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>
- [7] HSIAO, Chiamen, Chia-Chi CHENG, Tzunghao LIOU a Yuanting JUANG. *Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method. NDT.* 2008, 41(2), 98-107. DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.08.008. ISSN 09638695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869507001065>
- [8] LIU, Shukui, Jinying ZHU, Saamiya SERAJ, Rachel CANO a Maria JUENGER. *Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves. Construction and Building Materials.* 2014, 72, 248-255. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.044. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814009568>
- [9] FEYNMAN, Richard, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynman lectures on physics. [Nachdr.]. Boston, MA: Addison Wesley Longman, 1970. ISBN 978-020-1021-158.*
- [10] MARTINČEK, G. *Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1962, 244 str. 71-006-62.*
- [11] CARINO, Nicholas J. *The Impact-Echo Method: An Overview. In: Structures 2001. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2001, s. 1-18. DOI: 10.1061/40558(2001)15. ISBN 978-0-7844-0558-1. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40558\(2001\)15](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40558(2001)15)*
- [12] MAZZEO, Brian A., Anjali N. PATIL a W. Spencer GUTHRIE. *Acoustic impact-echo investigation of concrete delaminations using liquid droplet excitation.*

- NDT. 2012, 51, 41-44. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.05.007. ISSN 09638695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869512000795>
- [13] Innovative AE and NDT techniques for on-site measurement of concrete and masonry structures. 1st ed. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-940-1776-059.
- [14] LU, Xiaobin, Qichen SUN, Wei FENG a Juntao TIAN. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2013, 47, 231-239. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181300384X>
- [15] ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Český normalizační institut, 2012.
- [16] IAEA. Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures. 2002, , 242. ISSN 1018-5518. Dostupné také z: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf
- [17] VAN DEN ABEELE, K. E.-A., P. A. JOHNSON, A. SUTIN a . Nonlinear ElasticWave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*. 2000, 12(1), 17-30. DOI: 10.1007/s001640000002. ISSN 0934-9847. Dostupné také z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs001640000002#>
- [18] Hájek K., Hefner Š.: Possibility of the Use of a Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy for the Ultrasonic NDT in Civil Engineering. In Proc. Of Workshop NDT CMC 2003. Brno, December 3, 2003, pp. 29 – 35, ISBN 80-7204-318-8.
- [19] AGGELIS, D.G., S. MOMOKI a T. SHIOTANI. Experimental study of nonlinear wave parameters in mortar. *Construction and Building Materials*. 2013, 47, 1409-1413. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.056. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813005746>
- [20] MEO, Michele, Umberto POLIMENO a Giuseppe ZUMPARO. Detecting Damage in Composite Material Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy Methods. *Applied Composite Materials*. 2008, 15(3), 115-126. DOI: 10.1007/s10443-008-9061-7. ISSN 0929-189x. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10443-008-9061-7>
- [21] MULLER, M., J.A. TENCATE, T.W. DARLING, A. SUTIN, R.A. GUYER, M. TALMANT, P. LAUGIER a P.A. JOHNSON. Bone micro-damage assessment using non-linear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) techniques: A feasibility study. *Ultrasonics*. 2006, 44, e245-e249. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.06.043. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X06003064>
- [22] YUCEL, Mehmet, Sina FATERI, Mathew LEGG, Adam WILKINSON, Vassilios KAPPATOS, Cem SELCUK a Tat-Hean GAN. Coded Waveform Excitation for High Resolution Ultrasonic Guided Wave Response. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. , 1-1. DOI: 10.1109/TII.2015.2501762. ISSN 1551-3203. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7331308>
- [23] www.dspguide.com [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/ch13/4.htm>
- [24] VÁLEK, J., Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot: disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2014, 188 s, Vedoucí disertační práce: Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [25] HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013-01-1, 61(1), -. DOI:

- 10.2478/bpasts-2013-0013. ISSN 0239-7528. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/bpasts.2013.61.issue-1/bpasts-2013-0013/bpasts-2013-0013.xml>
- [26] SVILAINIS, Linas, Andrius CHAZIACHMETOVAS a Vytautas DUMBRAVA. Efficient high voltage pulser for piezoelectric air coupled transducer. *Ultrasonics*. 2013, 53(1), 225-231. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.06.004. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X12001114>
- [27] ABRAHAM, O., B. PIWAKOWSKI, G. VILLAIN a O. DURAND. Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2012, 37, 904-915. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.03.015. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812001894>
- [28] HUTCHINS, David, Pietro BURRASCANO, Lee DAVIS, Stefano LAURETI a Marco RICCI. Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation. *Ultrasonics*. 2014, 54(7), 1745-1759. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.03.007. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X14000626>
- [29] RICCI, Marco, Luca SENNI a Pietro BURRASCANO. Exploiting Pseudorandom Sequences to Enhance Noise Immunity for Air-Coupled Ultrasonic Nondestructive Testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012, 61(11), 2905-2915. DOI: 10.1109/TIM.2012.2200409. ISSN 0018-9456. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6222332>
- [30] LAM, F.K. a M.S. HUI. An ultrasonic pulse compression system for non-destructive testing using maximal-length sequences. *Ultrasonics*. 1982, 20(3), 107-112. DOI: 10.1016/0041-624X(82)90070-1. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0041624X82900701>
- [31] NIEDERDRÄNK, T. Maximum length sequences in non-destructive material testing: application of piezoelectric transducers and effects of time variances. *Ultrasonics*. 1997, 35(3), 195-203. DOI: 10.1016/S0041-624X(96)00097-2. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X96000972>
- [32] LONDHE, Niranjan, Mohan D. RAO a Jason R. BLOUGH. Application of the ISO 13472-1 in situ technique for measuring the acoustic absorption coefficient of grass and artificial turf surfaces. *Applied Acoustics*. 2009, 70(1), 129-141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2007.12.011. ISSN 0003682x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X07002009>
- [33] MORGAN, P.A. a G.R. WATTS. A novel approach to the acoustic characterisation of porous road surfaces. *Applied Acoustics*. 2003, 64(12), 1171-1186. DOI: 10.1016/S0003-682X(03)00085-9. ISSN 0003682x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X03000859>
- [34] ROINILA, T., M. VILKKO a T. SUNTIO. Fast Loop Gain Measurement of a Switched-Mode Converter Using a Binary Signal With a Specified Fourier Amplitude Spectrum. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009, 24(12), 2746-2755. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2027706. ISSN 0885-8993. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5200547>
- [35] POTCHINKOV, Alexander. Digital signal processing methods of global nonparametric frequency domain audio testing. *Signal Processing*. 2005, 85(6), 1225-1254. DOI: 10.1016/j.sigpro.2004.12.007. ISSN 01651684. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168405000459>

- [36] ROINILA, Tomi, Lei LIHUI, Matti VILKKO, Gu DANDAN, Xi WENMING a Pasi KALLIO. Pseudo-random sequences in analysis of polyvinylidene fluoride piezoelectric sensors. In: 2012 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). IEEE, 2012, s. 389-394. DOI: 10.1109/3M-NANO.2012.6472996. ISBN 978-1-4673-4590-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6472996>
- [37] SUN, Tao, Shady GAWAD, Catia BERNABINI, Nicolas G GREEN a Hywel MORGAN. Broadband single cell impedance spectroscopy using maximum length sequences: theoretical analysis and practical considerations. *Measurement Science and Technology*. 2007, 18(9), 2859-2868. DOI: 10.1088/0957-0233/18/9/015. ISSN 0957-0233. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/18/i=9/a=015?key=crossref.32e5b86912931844affdbe384d92e4fa>
- [38] MOOK, G. a A. TCHERNOV. New methods of signal excitation and processing in magneto-inductive testing of structures and alloys. *NDT*. 1994, 27(5), 269-273. DOI: 10.1016/0963-8695(94)90132-5. ISSN 09638695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0963869594901325>
- [39] HUANG, Z.G., C.J. QIAO a Y.K. WANG. Accurate ultrasonic range measurement using MLS-modulated continuous waves. *Measurement*. 2015, 60, 178-185. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.10.017. ISSN 02632241. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224114004849>
- [40] AI HUI TAN a K.R. GODFREY. The generation of binary and near-binary pseudorandom signals: an overview. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2002, 51(4), 583-588. DOI: 10.1109/TIM.2002.802243. ISSN 0018-9456. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1044653>
- [41] BARKER, H. A., A. J. TUCKER a K. R. GODFREY. Comparison of perturbation signals for linear system identification in the frequency domain. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*. 1999, 146(6), 535-548. DOI: 10.1049/ip-cta:19990529. ISSN 1350-2379. Dostupné také z: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-cta_19990529
- [42] TAN, Ai Hui a Keith R. GODFREY. A guide to the design and selection of perturbation signals. *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. IEEE, 2009, , 464-469. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400077. ISBN 978-1-4244-3871-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5400077>
- [43] BOHÓRQUEZ, Jorge a Ozcan ÖZDAMAR. Signal to noise ratio analysis of maximum length sequence deconvolution of overlapping evoked potentials. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006, 119(5), 2881-. DOI: 10.1121/1.2191609. ISSN 00014966. Dostupné také z: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/119/5/10.1121/1.2191609>
- [44] HERLUFSEN, H. Dual Channel FFT Analysis (Part II). *TECHNICAL REVIEW*. Denmark: Nærum Offset, 1984, 1984(2), 3-45. ISSN 007-2621
- [45] GARNIER, Hugues. a Liuping. WANG. Identification of continuous-time models from sampled data. London: Springer, 2008. ISBN 18-480-0161-4.
- [46] PAULO, Joel Preto, Carlos Rodrigues MARTINS a J.L. BENTO COELHO. A hybrid MLS technique for room impulse response estimation. *Applied Acoustics*. 2009, 70(4), 556-562. DOI: 10.1016/j.apacoust.2008.07.007. ISSN 0003682x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X08001539>

- [47] DENCKS, Stefanie a Georg SCHMITZ. Estimation of multipath transmission parameters for quantitative ultrasound measurements of bone. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2013, 60(9), 1884-1895. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2773. ISSN 0885-3010. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6587397>
- [48] ROINILA, Tomi, Matti VILKKO a Teuvo SUNTIO. Frequency-Response Measurement of Switched-Mode Power Supplies in the Presence of Nonlinear Distortions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010, 25(8), 2179-2187. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2043688. ISSN 0885-8993. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5420006>
- [49] POTCHINKOV, Alexander. Measurement of frequency responses of nonlinearly distorted SISO systems in noisy environments with generalized parameter frequency response estimators. *Signal Processing*. 2006, 86(8), 2094-2114. DOI: 10.1016/j.sigpro.2005.10.010. ISSN 01651684. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168405003646>
- [50] NAUMOV, S. S. Deconvolution Method for Measuring Impulse Responses of the Channel in a Reverberating Medium. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2005, 48(8), 623-630. DOI: 10.1007/s11141-005-0107-5. ISSN 0033-8443. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11141-005-0107-5>
- [51] HERLUFSEN, H. Dual Channel FFT Analysis (Part I). *TECHNICAL REVIEW*. Denmark: Nærum Offset, 1984, 1984(1), 3-60. ISSN 007-2621.
- [52] GODFREY, K.R., A.H. TAN, H.A. BARKER a B. CHONG. A survey of readily accessible perturbation signals for system identification in the frequency domain. *Control Engineering Practice*. 2005, 13(11), 1391-1402. DOI: 10.1016/j.conengprac.2004.12.012. ISSN 09670661. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066105000080>
- [53] CARINI, Alberto. Efficient NLMS and RLS Algorithms for Perfect and Imperfect Periodic Sequences. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2010, 58(4), 2048-2059. DOI: 10.1109/TSP.2009.2039821. ISSN 1053-587x. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5372001>
- [54] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Český normalizační institut, 2009.
- [55] ČSN EN 12390-4 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. Český normalizační institut, 2001.
- [56] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Český normalizační institut, 2009
- [57] THOMAS D. ROSSING (ED.). *Springer handbook of acoustics*. New York, N.Y: Springer, 2007. ISBN 978-038-7304-250.
- [58] HAVELOCK, David Ian, Sonoko. KUWANO a Michael. VORLANDER. *Handbook of signal processing in acoustics*. Volume 1. New York, NY: Springer, 2008. ISBN 978-038-7304-410.
- [59] FLADUNG, W.A. Windows Used for Impact Testing. In: *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference February 3-6, 1997 Sheraton World Resort Orlando, Florida*. Part 2. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 1997, s. 1662-1666. ISBN 9780912053530 [0912053534]. ISSN 0277786X. Dostupné také z: <http://tdl.libra.titech.ac.jp/journaldocs/recordID/article.bib-01/ZR000000169757>
- [60] LAM, F.K. a M.S. HUI. An ultrasonic pulse compression system for non-destructive testing using maximal-length sequences. *Ultrasonics*. 1982, 20(3), 107-112. DOI: 10.1016/0041-624X(82)90070-1. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0041624X82900701>

- [61] CHACÓN, D., G. RODRÍGUEZ-CORRAL, L. GAETE-GARRETÓN, E. RIERA-FRANCO DE SARABIA a J.A. GALLEGU-JUÁREZ. A procedure for the efficient selection of piezoelectric ceramics constituting high-power ultrasonic transducers. *Ultrasonics*. 2006, 44, e517-e521. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.117. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X06001533>
- [62] MORENO, E., P. ACEVEDO, M. FUENTES, A. SOTOMAYOR, L. BORROTO, M.E. VILLAFUERTE a L. LEIJA. Design and Construction of a Bolt-Clamped Langevin Transducer. 2005 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering. *IEEE*, 2005, , 393-395. DOI: 10.1109/ICEEE.2005.1529652. ISBN 0-7803-9230-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1529652/>
- [63] LEE, Hyeong, Shujun ZHANG, Yoseph BAR-COHEN a Stewart SHERRIT. High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers. *Sensors*. 2014, 14(8), 14526-14552. DOI: 10.3390/s140814526. ISSN 1424-8220. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/14526/>
- [64] www.visaton.de [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: http://www.visaton.de/en/industrie/koerperschall/ex60s_8.html
- [65] www.analog.com [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/products/obsolete/admp401.html>
- [66] ŘÍČNÝ, Václav. Televizní distribuční sítě a systémy: Přednášky a numerická cvičení [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/literature/tdss.pdf
- [67] ALVAREZ, Nicolás, Andrea CARDONI, Niccolo CERISOLA, Enrique RIERA, Marco ANDRADE a Julio ADAMOWSKI. Nonlinear Dynamic Modeling of Langevin-Type Piezoelectric Transducers. *Actuators*. 2015, 4(4), 255-266. DOI: 10.3390/act4040255. ISSN 2076-0825. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2076-0825/4/4/255>
- [68] VAN DEN ABEELE, K. E.-A., J. CARMELIET, J. A. TEN CATE a P. A. JOHNSON. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single-Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2000, 12(1), 31-42. DOI: 10.1080/09349840009409647. ISSN 0934-9847. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09349840009409647>
- [69] LI, C. a E. NORDLUND. Effects of couplants on acoustic transmission. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1993, 26(1), 63-69. DOI: 10.1007/BF01019869. ISSN 0723-2632. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01019869>
- [70] TSAI, Yi-Te a Jinying ZHU. Simulation and Experiments of Airborne Zero-Group-Velocity Lamb Waves in Concrete Plate. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012, 31(4), 373-382. DOI: 10.1007/s10921-012-0148-6. ISSN 0195-9298. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10921-012-0148-6>
- [71] SOLTANI, Fethi, Marc GOUEYGOU, Zoubeir LAFHAJ a Bogdan PIWAKOWSKI. Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content. *NDT*. 2013, 54, 75-83. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.12.003. ISSN 09638695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869512001648>
- [72] KREIDL, Marcel, Radislav ŠMÍD, Václav MATZ a Stanislav ŠTARMAN. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha: Starmans electronics, 2011. ISBN 978-80-254-6606-3.

- [73] *BetonKalender* 2009. Berlin: Ernst & Sohn, 2009, 1476 SS. ISBN 978-3-433-01854-5.
- [74] SHETTY, M.S. *Concrete technology: theory and practice*. 6th ed. Ram Nagar, New Delhi: S. Chand, 2005. ISBN 81-219-0003-4.
- [75] OHDAIRA, Etsuzo a Nobuyoshi MASUZAWA. *Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE*. *Ultrasonics*. 2000, 38(1-8), 546-552. DOI: 10.1016/S0041-624X(99)00158-4. ISSN 0041624x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X99001584>
- [76] GOPAL MISHRA. *ULTRASONIC TEST FOR CONCRETE*. *The Constructor* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://theconstructor.org/concrete/ultrasonic-test-on-concrete/2847/>
- [77] Kloiber, Michal; Kotlíková, M. *Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva*. In *Applied mechanics 2006*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, s. 115-129. ISBN 80-7043-441-4. *Applied mechanics 2006*, Srní, 03.04.2006-05.04.2006, CZ
- [78] ROVNANÍK, P.; ROVNANÍKOVÁ, P.; BAYER, P. *Vlastnosti bezslínkových kompozitů po tepelném namáhání*. In *Zpevnování, í těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí 2007*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. s. 164-171. ISBN: 978-80-248-1291-5.

Autorské publikace související s tématem disertace

- [A1] MARTINEK, J.; CARBOL, L. *Comparison of Modal Analysis Using FEM and Eigenfrequency Measurements*. In *Ecological and New Building Materials and Products, Advanced Materials Research*. 1. Switzerland, Trans Tech Publications. 2015. p. 294 - 300. ISBN 978-3-03835-587-8, ISSN 1022-6680.
- [A2] CARBOL, L.; MARTINEK, J. *Deterministic white noise generator based on microcontroller*. In *11th WORKSHOP NDT 2013 NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING PRACTICE*. Brno, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o. 2013. p. 72 - 80. ISBN 978-80-7204-864-9.
- [A3] CARBOL, L.; MARTINEK, J.; ŠTEFKOVÁ, D. *Correct Choice of Maximum Length Sequence in Nondestructive Testing*. In *Ecological and New Building Materials and Products, Advanced Materials Research*. Switzerland, Trans Tech Publications. 2015. p. 280 - 287. ISBN 978-3-03835-587-8, ISSN 1022-6680.
- [A4] CARBOL, L. *Signal Processing With Force Window*. In *Sborník abstraktů*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2016. p. 270 - 270. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [A5] CARBOL, L. *Approximation of Impulse response length*. In *12th WORKSHOP NDT 2014 NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING PRACTICE*. Brno, CERM. 2014. p. 7 - 12. ISBN 978-80-214-5099-8.
- [A6] CARBOL, L.; MARTINEK, J. *Deterministický generátor bílého šumu na bázi jednočipového mikropočítače*. In *JUNIORSTAV 2014 - 16. odborná konference doktorského studia*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2014. p. 1 - 7. ISBN 978-80-214-4851-3.
- [A7] CARBOL, L.; KUSÁK, I.; MARTINEK, J. *Measurement of Material Properties Using Deterministic White Noise*. In *XIth European Conference on NDT, The e-Journal of Nondestructive Testing*. Praha, Vysoké učení technické v Brně. 2014. p. 1 - 7. ISBN 978-80-214-5018-9, ISSN 1435-4934.

- [A8] CARBOL, L.; KUSÁK, I.; MARTINEK, J. Transfer Characteristic Of An Ultrasonic Transducer. In *NDT for Safety / Defektoskopie 2015*. Praha, Vysoké učení technické v Brně se spolupráci s Českou společností pro NDT. 2015. p. 9 - 14. ISBN 978-80-214-5280-0.
- [A9] CARBOL, L.; KUSÁK, I.; MARTINEK, J.; VOJKŮVKOVÁ, P. Influence of Transducer Coupling in Ultrasonic Testing. In *NDT in Progress 2015 VIIIth International Workshop, The e-Journal of Nondestructive Testing*. Praha, Brno University of Technology. 2015. p. 23 - 29. ISBN 978-80-214-5262-6, ISSN 1435-4934.
- [A10] CARBOL, L.; MARTINEK, J.; KUSÁK, I. Influence of Water Content on Fundamental Frequency of Mortar Sample. In *Ecological and New Building Materials and Products, Advanced Materials Research*. Switzerland, Trans Tech Publications. 2015. p. 273 - 279. ISBN 978-3-03835-587-8, ISSN 1022-6680.
- [A11] CARBOL, L.; MARTINEK, J.; KUSÁK, I.; KUCHARCZYKOVÁ, B. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy with MLS Perturbation Signal. In *Elektronický sborník přednášek, Procedia Engineering*. Brno, Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s. 2016. p. 1 - 7. ISBN 978-80-87397-23-7, ISSN 1877-7058.
- [A12] CARBOL, L.; MATYSÍK, M.; CHOBOLA, Z.; DVOŘÁK, R. Monitoring of Thermally Damaged Concrete by Various Ultrasonic Methods. In *24th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY*. 1. Ljubljana, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije. 2016. p. 52 - 52. ISBN 978-961-94088-0-3.
- [A13] TUPÝ, M.; ŠTEFKOVÁ, D.; SOTIRIADIS, K.; KRMÍČEK, L.; CARBOL, L.; PETRÁNEK, V. Recycled poly(vinyl butyral) used as a barrier to prevent mortar carbonation. In *International Conference on Ecology and New Building Materials and Products, Advanced Materials Research*. Switzerland, Trans Tech Publications. 2014. p. 28 - 35. ISBN 978-3-03835-188-7, ISSN 1022-6680.
- [A14] KUSÁK, I.; LUŇÁK, M.; MARTINEK, J.; CARBOL, L.; ŠTEFKOVÁ, D. Thermal Stress of Building Materials Containing Rubber Granulate and Polymer Binder Characterised by Alternating Electric Field. In *XIth European Conference on NDT, The e-Journal of Nondestructive Testing*. Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2014. p. 1 - 8. ISBN 978-80-214-5018-9, ISSN 1435-4934.
- [A15] CARBOL, L. Nondestructive Testing at Chalmers University of Technology. In *NDT konference v České republice 2015*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. 2015. p. 56 - 59. ISBN 978-80-214-5315-9.
- [A16] KUSÁK, I.; LUŇÁK, M.; CARBOL, L. The Use of Simulation Models for Complex Description of Permittivity of Building Materials. In *Ecological and New Building Materials and Products, Advanced Materials Research*. Switzerland, Trans Tech Publications. 2015. p. 191 - 196. ISBN 978-3-03835-587-8, ISSN 1022-6680.
- [A17] CARBOL, L.; TOPOLÁŘ, L. Non destructive testing of alkali-activated slag setting with various admixtures. In *JUNIORSTAV 2015 - 17. odborná konference doktorského studia*. Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2015. p. 270 - 270. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [A18] ŠTOUDEK, R.; KOKTAVÝ, B.; CARBOL, L.; ŠTEFKOVÁ, D. Influence of the Maximum Grain Size of Aggregate on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Samples. In *12th Workshop NDT 2014 Non-Destructive Testing in Engineering Practice*. 1. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2014. p. 47 - 52. ISBN 978-80-214-5099-8.

- [A19] CARBOL, L.; MARTINEK, J.; TOPOLÁŘ, L. *Multi-method measurement of alkali-activated slag setting with various admixtures. In 12th WORKSHOP NDT 2014 NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING PRACTICE. Brno, CERM. 2014. p. 1 - 6. ISBN 978-80-214-5099-8.*
- [A20] CARBOL, L.; KUSÁK, I.; MARTINEK, J. *Měření vlastností materiálů metodou MLS. In Defektoskopie 2014. Praha, Vysoké učení technické v Brně. 2014. p. 1 - 7. ISBN 978-80-214-5035-6.*
- [A22] TOPOLÁŘ, L.; ŠTEFKOVÁ, D.; CARBOL, L.; PAZDERA, L. *Study of the Acoustic Emission and Temperature Characteristics of Concrete Hardening Process with Different Curing Way. In 11th WORKSHOP NDT 2013 NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING PRACTICE. Brno, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o. 2013. p. 61 - 66. ISBN 978-80-7204-864-9.*

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
NDT	<i>Nedestruktivní testování</i>
SHM	<i>Monitorování stavu konstrukcí (Structural Health Monitoring)</i>
PT	<i>Zkoušení kapilární metodou (Penetrant Testing)</i>
EC	<i>Zkoušení vířivými proudy (Eddy current)</i>
VT	<i>Vizuální zkoušení</i>
TOF	<i>Technika měření doby průchodu (Time-of-flight)</i>
TOFD	<i>Technika měření doby průchodu difrakčních vln (Time-of-flight diffraction)</i>
PUNDIT	<i>Komerční výrobek pro testování TOF</i>
SNR	<i>Odstup signálu od šumu (Signal to Noise Ratio)</i>
IE	<i>Impact-echo</i>
LTI	<i>Lineární časově neměnný systém (Linear Time Invariant)</i>
IR	<i>Impulzní odezva (Impulse response)</i>
NEWS	<i>Nelineární ultrazvuková spektroskopie (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy)</i>
FFT	<i>Fourierovu rychlá transformace</i>
STFT	<i>Krátkočasová Fourierova transformace</i>
WHT	<i>Walsh-Hadamard transformace</i>
MLS	<i>Sekvencí maximální délky (Maximum length sequence)</i>
PRBS	<i>Pseudonáhodné binární sekvence (Pseudorandom binary sequence)</i>
QRB	<i>(quadratic residue binary)</i>
HAB	<i>(Hall binary)</i>
TPB	<i>(Twin Prime binary)</i>
IRS	<i>Inverzně opakovaná sekvence (Inverse Repeat Sequence)</i>
D/A,DAC	<i>Digitální analogový převodník</i>
A/D,ADC	<i>Analogově digitální převodník</i>
DIO	<i>Digitálně vstupně-výstupní porty</i>
AI	<i>Analogový vstup</i>
AO	<i>Analogový výstup</i>
δ -funkce	<i>Diracova delta funkce</i>
DSP	<i>Digitální zpracování signálu (Digital signal processing)</i>
DC	<i>Stejnosměrný signál (direct current)</i>
XOR	<i>Operátor exkluzivní disjunkce</i>

PCI	počítačová sběrnice pro připojení periférií k základní desce
NI	National Instruments
LabVIEW	Grafický programovací jazyk od NI
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
GPIO	Rozhraní pro měřicí přístroje (General Purpose Interface Bus)
LC filtr	Frekvenční filtr skládající se pouze z kondenzátorů a cívek
MNČ	Aproximační metoda nejmenších čtverců
MOSFET	Druh tranzistorů řízených polem
TTL	Tranzistorově-tranzistorová logika
GND	Mínus pól, nebo země (Ground)
PC	Osobní počítač
PZT	Materiál piezobudičů: olovo-zirkonát-titanát
DUT	Testovaný vzorek (Device under test)
1D	Jednorozměrný prvek
2D	Dvourozměrný prvek
3D	Třírozměrný prvek
MEMS	Mikroelektromechanické systémy
RF	Rádiová frekvence
TX	Vysílač
RX	Přijímač

Značka	Jednotka	Význam
ppm	1e-6[-]	Jedna miliontina (Parts per milion)
α	[°]	Úhel rozptylu budiče
α	[%]	Vlhkost vzorku
α	[-]	Parametr charakterizující nelinearity
λ	[m]	Vlnová délka
D	[m]	Velikosti budiče
D_{max}	[mm]	Velikost maximální složky kameniva
T	[s]	Celkový čas průchodu
L	[m]	Délka měřicí základny
σ	[Pa]	Mechanické normálové napětí
ρ	[kg/m ³]	Objemová hmotnost
v_L	[m/s]	Rychlost podélného vlnění
f_L	[Hz]	Frekvence podélného kmitání vzorku
E_{crL}	[Pa]	Dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku zjištěný rezonanční

		<i>metodou z podélného kmitání</i>
E_{crf}	[Pa]	<i>Dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku zjištěný rezonanční metodou z prvního vlastního příčného kmitání</i>
G_{cr}	[Pa]	<i>Dynamický modul pružnosti ve smyku zjištěný rezonanční metodou</i>
E_{cu}	[Pa]	<i>Dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku, zjištěný ultrazvukovou pulzní metodou</i>