

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

Akustický difúzní prvek s absorpčními rezonátory

Diplomová práce

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Diplomant: Martin Vitvar

květen 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Vitvar**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Akustický difúzní prvek s absorpčními rezonátory**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši na téma difúze a absorpce zvuku. Zaměřte se na spojení obou jevů do jednoho akustického prvku (difúzoru s absorpčními vlastnostmi). Navrhněte prvek, který bude rozptylovat zvuk v pásmu nad 1000 Hz a absorbovat na nízkých kmitočtech. Prvek realizujte a experimentálně ověřte.

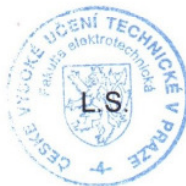
Seznam odborné literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, Praha SNTL/Alfa 1980
- [2] Cox, T, D’Antonio, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers, Taylor and Francis, New York, 2009.
- [3] Everest, A.F.: Master Handbook of Acoustics., McGraw Hill, 2001

Vedoucí: Dr.Ing. Libor Husník

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování méj diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 6. 5. 2014

.....

podpis

Bibliografická citace

VITVAR, Martin. Akustický difúzní prvek s absorpčními rezonátory. Praha: ČVUT 2011. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra radioelektroniky, 65 s. Vedoucí diplomové práce: Dr. Ing. Libor Husník.

VITVAR, Martin. Acoustic diffusion element with absorbing resonators. Prague: CTU 2011. Magister theses, CTU, Faculty of Electrical Engineering, department of radioelectronics, 65 p. Supervisor of theses: Dr. Ing. Libor Husník.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá metodami rozptylování zvuku. Je navrhnut PRD difuzor s rozměry 7x10 ks využívající fraktálového uspořádáním a kombinovaný s Helmholtzovými rezonátory k rozšíření pásma pohltivosti směrem k nižším kmitočtům. Tyto rezonátory je navíc možné po dokončení prvku snadno z vnějšku přeladovat a tato schopnost nepřidává navíc příliš nákladů ani složitosti. Pro ověření návrhu byla vytvořena počítačová simulace směrových charakteristik, difuzity, rozptylu a činitele pohltivosti. Následně byla postavena rozsáhlá měřicí aparatura a zkonstruovaný difuzor byl změřen v měřítku 1:1 dle nové normy ČSN ISO 17497-2 metodou hraniční roviny. Pohltivá rezonující složka akustického prvku byla experimentálně ověřena měřením akustického tlaku uvnitř duté struktury. Nakonec proběhlo srovnání navrhovaných parametrů ze simulace se změřenými daty.

Klíčová slova:

Difuzní prvek, činitel difuze, rozptylový koeficient, MLS, QRD, PRD, fraktály, absorpční rezonátory, Helmholtzův rezonátor, membránový rezonátor, porézní tlumení, soustředěné parametry, tlumená rezonance, náhradní schéma, měření akustického tlaku v bodu vně a uvnitř rezonátoru, metoda hraniční roviny, zrcadlový odraz, časové okno.

Summary:

This theses concerns with methods of scattering sound. A PRD diffuser is proposed with 7x10 wells combined with fractal assembly and Helmholtz resonators with purpose of adding absorption in the low frequency region. These resonators are also possible to easily retune from the outside after the part is finished and this feature does not add much of a construction complexity and cost. For verification of the concept was created a computer simulation of directional characteristics, diffusion, scattering and absorption coefficients. Furthermore a large measurement setup was manufactured and the constructed diffuser was measured in scale 1:1 according to the new standard ČSN ISO 17497-2 by means of ground plane method. Absorbing and resonating part of diffuser was experimentally tested by measurement of acoustical pressure inside the hollow structure. Finally a comparison between proposed parameters from computer simulation and measured data was performed.

Index terms:

Diffuser, diffusion coefficient, scattering coefficient, MLS, QRD, PRD, fractals, absorption resonators, Helmholtz resonator, membrane resonator, porous absorption, lumped parameters, damped resonance, equivalent circuit, measurement of acoustic pressure at the point inside and outside of resonator, ground plane method, specular reflection, time window.

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Typy absorpčních prvků.....	2
2.1 Porézní tlumení.....	3
2.2 Rezonanční prvky.....	4
2.3 Helmholtzův rezonátor.....	5
2.4 Membránové rezonátory	6
2.5 Kmitající desky.....	6
3 Měření absorpce.....	8
3.1 Měření v dozvukové komoře.....	8
3.2 Měření v interferometru.....	9
3.2 Měření akustického tlaku v bodu vně a uvnitř.....	9
4 Typy difuzních prvků.....	11
4.1 Geometrické difuzory.....	11
4.2 Matematické sekvence.....	11
4.3 MLS.....	12
4.4 PRD.....	12
4.5 2D difuzory.....	13
4.6 Fraktálové prvky.....	14
4.7 Objemové difuzory.....	15
4.8 Numerická optimalizace difuzorů.....	16
4.9 Využití hluchých prostor konstrukce.....	16
5 Princip měření akustických difuzních prvků.....	18
5.1 Normovaný autokorelační difuzní koeficient.....	19
5.2 Rozptylový korelační koeficient.....	20
5.3 Váhování koeficientů.....	20
5.4 Měřicí signál.....	21
6 Kritéria návrhu difuzního prvku.....	22
7 Použitá simulační metoda.....	23
8 Výběr optimálního prvku.....	24
8.1 Rozšíření o pohltivost na nízkých kmitočtech.....	27
8.2 Parazitní pohltivost difuzoru.....	28
8.3 Útlum v modálním pásmu.....	28
9 Měřicí systém dle normy ČSN ISO 17497-2.....	33

10 Výsledky měření.....	37
11 Závěr.....	41
12 Seznam použité literatury.....	42
13 Přílohy.....	43

Seznam příloh

1. Matlab skript pro simulaci vlastností difuzoru kombinovaného s Helmholtzovými rezonátory – zkrácená verze bez vykreslení grafů – plnou verzi obsahuje přiložené DVD
2. Matlab skript pro zpracování naměřených impulsních charakteristik – zkrácená verze bez vykreslení grafů – plnou verzi obsahuje přiložené DVD
3. Nářezový plán difuzoru
4. Fotografie měřicího systému
5. Provedení měření ve sportovní hale v Roudnici nad Labem
6. Polární charakteristiky pro kolmý dopad ze simulace (vlevo) a z měření (vpravo)
7. Tabulka dat polárních grafů pro kolmý dopad na difuzor
8. Tabulka dat polárních grafů pro kolmý dopad na reflektor
9. Polární charakteristiky pro dopad z 30° od normály - měření
10. Polární charakteristiky pro dopad z 60° od normály - měření
11. Tabulka činitelů difuze pro 1/3 oktávová pásma
12. Seznam měřicího vybavení
13. DVD s plným textem práce, kompletními Matlab skripty a naměřenými daty

1 Úvod

Zatímco základní popis užití absorpčních akustických prvků je znám díky W. C. Sabinovi od roku 1898 a jejich využití k akustickým úpravám je rozšířeno i mezi laickou veřejností, prvky rozptylující zvuk neboli difuzory dostaly svůj první systematický popis až v roce 1975 díky Manfredu Schröderovi a jejich použití není stále tak rozšířeno. Originální popis difuzorů se zakládá na dobrých autokorelačních vlastnostech některých matematických číselných sekvencí a jejich plochému výkonovému spektru. Jsou-li podle takových sekvencí zvoleny hloubky studní oddělených tenkými příčkami, dopadající zvuk je rozptýlen do směrů hlavních směrových laloků se stejnou energií. Využívá se zde přechodu od abstraktních čísel matematické sekvence a jejího výkonového spektra k rozměrům fyzického objektu a prostorovým frekvencím – směrům šíření vlny.

Schröderův teoretický aparát byl později ověřován a vylepšován díky různým optimalizačním technikám zejména dvěma dalšími autory - Trevor Cox a Peter D'Antonio [1], kteří svůj výzkum rozvinuli uplatněním v komerční sféře ve firmě RPG Diffusor Systems, Inc. Během 90. let umožnil bouřlivý rozvoj výpočetní techniky přesnou predikci chování difuzorů různými metodami simulace ve frekvenční i časové doméně – zejména: BEM (Boundary Element Method) a FDTD (Finite Difference Time Domain). Další výzkum byl rovněž podniknut v oblasti standardizace metriky pro porovnávání různých typů konstrukcí, aby bylo možno jednotlivými výrobci deklarovat vzájemně porovnatelné parametry. Dva hlavní parametry se ukázaly jako dostatečně robustní při porovnávání vzorků a to autokorelační difuzní koeficient a korelační rozptylový koeficient. Nové nároky kladla kvantifikace vlastností difuzorů i na měřicí techniku. Při měření se vyžadují desítky vzájemných poloh zdroj-vzorek-mikrofon. Snadnější zpracování umožnily pozdější mnohakanálové měřicí aparatury, které zkrátily dobu měření a zpracování dat z několika hodin na pouhé minuty.

Dnes se již objevují první akustické návrhové programy, které berou v potaz kromě absorpčních prvků i prvky rozptylové. Pro účely moderního návrhu akusticky kritických prostor je proto nutné detailně ještě před samotnou realizací predikovat vlastnosti použitých difuzorů. Ačkoliv je kýžená pohltivost difuzoru nulová, nelze jí ani teoreticky dosáhnout. V celém svém pásmu má tedy difuzor jistou minimální pohltivost. I zde narážíme na základní akustický problém velké šířky slyšitelného pásma a tedy rozsahu vlnových délek. Vzhledem k fyziologickým vlastnostem slyšení a také dodržení praktických rozměrů difuzoru se obvykle navrhovaná šířka pásma difuzity pohybuje v rozmezí 1 – 8 kHz. V zájmu dosažení konstantní doby dozvuku přes celé slyšitelné pásmo jsou proto na místě opatření zvyšující pohltivost difuzoru i pod 1kHz. Tyto požadavky se staly hlavní náplní této práce.

2 Typy absorpčních prvků

Přestože se tato práce soustředí na metody rozptylování zvuku, budou později kombinovány s pohlcováním zvuku pro rozšíření pásma účinnosti. Je proto účelné si o způsobech absorbování zvuku něco říci.

Akustické pohltivé prvky lze rozdělit podle způsobu pohlcování zvukové energie na materiály s porézní strukturou a rezonanční prvky. Tyto prvky využívají principů pohlcování zvuku přeměnou na teplo třením, relaxací (poklesem) akustického tlaku a nepružnou deformací těles.

Pohlcování nepružnou deformací je vlastností materiálů s výraznou tvarovou hysterezí. Po kompresi materiálu nedochází k jeho okamžité opětovné expanzi, ta je podstatně zpomalena. Práce vykonaná při stlačování se pak nerovná práci vydané při rozpínání. Energie zůstává v materiálu, kde se přemění na teplo. Materiálové hystereze se využívá hlavně při konstrukcích akustických krytů a zástěn strojů k izolaci hluku a vibrací. Používá se různých druhů pryžových materiálů a zejména jejich recyklátů.

Relaxací akustického tlaku se rozumí nedodržení adiabatických termodynamických podmínek. Médium, ve kterém se zvuková vlna šíří, díky své tepelné vodivosti odvádí tepelnou energii z míst s lokálně zvýšeným tlakem do míst s lokálně sníženým tlakem a naopak. Konstrukce zejména s využitím kovových materiálů se vyznačují tímto mechanismem pohltivosti.

Tepelná energie vzniká také třením vzduchových částic v blízkosti plochy pevného materiálu – označované jako hraniční vrstva. Zvětšením plochy této hraniční vrstvy se docílí nárůstu pohltivosti. Využívá se proto látek s porézní strukturou. Póry si lze představit jako nahodilé bludiště chodbiček tvořených prostorem mezi vlákny nebo kanálky navzájem propojených otvory. Celková plocha stěn kanálků je řádově větší než vnější povrch materiálu. Objem kanálků dosahuje 80-99% z celkového objemu materiálu dle [2]. Mezi porézní látky patří různé tkané i netkané textilie, polyuretanové pěny, skleněné nebo kamenné minerální vaty, dřevoštěpkové desky s otevřenou strukturou a v poslední době i materiály ze spékané balotiny (drobných skleněných kuliček) a křemičitých písků. Naopak nepatří sem například pěnový polystyren s uzavřenou strukturou jednotlivých buněk. Pro základní modelování porézních materiálů se měří měrný stejnosměrný odpor. Jednoduše látky, kterými nemůže s určitým odporem procházet vzduch, nemohou pohlcovat třením uvnitř struktury.

Pohltivé obklady tvořené stěnami, deskami nebo membránami se mohou kromě principu tření podílet na pohlcování ak. energie i vlastním rozkmitáním a přeměnou části této mechanické energie na tepelnou vlivem vnitřního tlumení stěny. Zbylá energie je přenesena za takovou stěnu, kde se může dále přeměňovat na teplo třením uvnitř por. materiálu. Soustava kmitající hmotnosti pohybující se nad tlumeným vzduchovým polštářem pak zvýšeně pohlcuje v okolí rezonance.

2.1 Porézní tlumení

Účinnost porézních materiálů je ovlivněna zejména měrným stejnosměrným odporem. Kromě toho záleží výrazně na prostorovém umístění vzhledem ke zvukovému vlnění. Při umístění v kmitnách akustické rychlosti, kde je tření vzduchu o materiál nejvyšší, se dosáhne největší účinnosti. Vhodné je tedy umístit tlumicí materiál $\lambda/4$ daleko od stěny. Dobrou pohltivost ($\alpha > 0,6$) lze očekávat za splnění podmínky [3]:

$$f \geq \frac{1}{10} \frac{c}{h} \quad (1)$$

Z toho je patrné, že dobré pohltivosti porézního tlumení na nízkých frekvencích lze dosáhnout pouze při nepraktických tloušťkách materiálu (0,68 m pro 50Hz). Na vyšších frekvencích navíc činitel pohltivosti roste až téměř k 1, což by při snaze zatlumit nízké kmitočty vedlo k současnému přetlumení vyšších frekvencí. Pokud je dovolen průnik ak. vlny do materiálu z více směrů než jen z jedné stěny, pohltivost na vysokých kmitočtech roste i nad 1.

Poréznost je definována jako poměr objemu dutin k celkovému objemu materiálu. Látky s porézností 0 představují uzavřené buňky (pěnový polystyren), do kterých nemůže proniknout dopadající zvuková vlna. Poréznost 0,5 znamená, že polovina objemu je tvořena vzduchem, kterým může procházet a být pohlcena zvuková vlna. Druhou půlku objemu tvoří nosné stěny materiálu nebo samotná vlákna. Tato veličina se však obtížně měří a pro další účely modelování není využita.

Měrný stejnosměrný odpor se definuje jako úbytek tlaku na tloušťce materiálu při známé rychlosti proudění [2]:

$$r_s = \frac{\Delta p}{\Delta l} * \frac{1}{v} \quad (2)$$

Existuje mnoho různých způsobů modelování porézních materiálů, pro naše účely modelování vlastností porézních materiálů využijeme v dalším jednoduššího empirického modelu, který zavedli Delany a Bazley [4]. V tomto modelu se uvažuje poréznost jako rovna 1 a měří se pouze měrný stejnosměrný odpor. Tento jediný parametr bude později určovat účinnost rezonančních tlumících prvků. Jeho přesné stanovení je tedy klíčové pro správné modelování vlastností. Chyba tohoto empirického modelu oproti ostatním složitějším je nicméně dostatečně malá, abychom mohli využít tohoto výrazného zjednodušení.

Delany a Bazley odvodily empirické rovnice na základě velkého množství měření různých vláknitých porézních materiálů. Aproximace je však přesná pouze v rozsahu 1000 – 50000 MKS raylm^{-1} . Dovolená hodnota pomocného bezrozměrného parametru X je v pásmu 0,01 – 1 a omezuje

tak frekvence, pro které je model platný. Tento model je však i přes zmíněná omezení široce používán.

Nejprve je nutné stanovit bezrozměrný parametr:

$$X = \frac{\rho_0 f}{r_s} \quad (3)$$

Charakteristická impedance se následně vypočte z polynomu:

$$Z_s = \rho_0 c_0 (1 + 0,0571X^{-0,754} - j0,087X^{-0,732}) \quad (4)$$

Komplexní vlnové číslo vyjde:

$$k = (w/c_0)(1 + 0,0978X^{-0,700} - j0,189X^{-0,595}) \quad (5)$$

2.2 Rezonanční prvky

Tyto prvky se dělí na kmitající membrány, panely a Helmholtzovy rezonátory. Vždy se jedná o rezonanční soustavu složenou ze soustředěných parametrů akustické hmotnosti m_a připojené přes akustickou poddajnost c_a na pevnou podložku. Aby soustava pohlcovala, je tlumena akustickým odporem r_a . Činitel pohltivosti bude jednotkový, bude-li se reálná složka celkové impedance rezonanční soustavy právě rovnat akustické vyzařovací impedanci – dojde k přizpůsobení. Vhodné tlumení je tedy klíčové ke správné funkci rezonátorů.

Základním předpokladem všech výpočtů je možnost redukovat soustavu na soustředěné parametry. Hloubka vzduchového polštáře musí proto být menší než násobky $\lambda/4$ kolmo dopadající zvukové vlny, což omezuje kmitočtové pásmo modelování.

Za předpokladu, že soustava není tlumena, dochází k rezonanci splněním rovnice dle [2]:

$$j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} = 0, \text{ tedy } f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}}. \quad (6)$$

Vložením tlumení se rezonance přeladuje na mírně nižší frekvenci spolu se snížením činitele jakosti a maximální hodnotou indexu pohltivosti [2]. Důležitou teoretickou vlastností rezonančních prvků je převod akustického tlaku na akustickou rychlost. Akustický tlak rozkmitává čelní rezonanční stěnu, která způsobuje velkou akustickou rychlost vzduchového polštáře. Vhodné umístění se nachází, na rozdíl od porézního tlumení, v maximu akustického tlaku. V případě nízkých frekvencí v modálním pásmu místnosti, odpovídajících modelu soustředěných parametrů, se nejlepší umístění nachází na obvodových plochách. Mezera mezi rezonančním prvkem a stěnou je nežádoucí.

2.3 Helmholtzův rezonátor

Helmholtzovy rezonátory jsou tvořeny uzavřeným objemem vzduchu představujícím poddajnost v náhradním akustickém schématu a podélným zúžením, v němž obsažený sloupec vzduchu tvoří kmitající hmotnost. Poddajnost je možno si představit jako objem vzduchu, který mění svůj tlak v celém objemu současně a rovnoměrně. Zpravidla se v jedné z okrajových desek konstrukce vytvoří rovnoměrně rozmístěné štěrby stejného rozměru. Takové uspořádání s perforovanou čelní deskou konstrukčně omezuje na pásmo nižších středních kmitočtů. Maximální rychlost částic vzduchu se nachází u ústí jednotlivých otvorů, kam se zpravidla umísťuje porézní materiál pro zajištění nejučinnějšího tlumení. Někdy se však vyplňuje z důvodů jednoduchosti stavby celý objem rovnoměrně.

Možná je i realizace Helmholtzova rezonátoru pro nízké frekvence pod 100 Hz, která ale vede spíše na několik osamocených štěrbin tvořených delšími trubkami. Nebezpečí takových konstrukcí je náchylnost na průnik prachu, nečistot a menších předmětů dovnitř rezonátoru a následná změna jeho parametrů. Takové akustické prvky se nemusí shodovat s estetickými požadavky architekta. U nízkofrekvenčních Helmholtzových rezonátorů není možné přímo překrýt ústí štěrby dekorační látkou, která by narušila jeho funkci.

Hmotnost vzduchu ve štěrbině podle [5]:

$$m = \frac{\rho_0 D^2 t}{\pi a^2} = \frac{\rho_0 t}{\varepsilon}, \text{ kde } \varepsilon = \frac{\pi a^2}{D^2} \quad (7)$$

představuje činitel děrování, D rozteč děr, a poloměr děr a t jejich délku. S uvažování spolukmitajícího sloupce vzduchu a tím pádem větší efektivní délky štěrby pak:

$$m = \frac{\rho_0 (t + 0,85a)}{\varepsilon} = \frac{\rho_0 t'}{\varepsilon}, \quad (8)$$

kde t' znamená efektivní délku včetně koncových korekcí – štěrbina v rovině. Za předpokladu jediné štěrby můžeme položit ε rovno 1 a pak vyjde tuhost:

$$K = \rho_0 c^2 \frac{S^2}{V}. \quad (9)$$

Rezonanční frekvence pak vyjde po položení imaginární části rovné nule jako:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 (S^2 / V)}{\rho_0 t'}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V t'}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{d t'}}. \quad (10)$$

2.4 Membránové rezonátory

U membránových rezonátorů reprezentuje kmitající hmotnost tenká pružná folie uchycená na okrajích. Pružnost folie by měla zaručit okrajové podmínky odpovídající volnému upnutí. Membrána pak může kmitat jako píst a její tuhost nebo ohyb se při výpočtech neuvažuje.

Poddajnost membránového rezonátoru tvoří pouze objem vzduchu v dutině [5]:

$$C = \frac{d}{\rho_0 c^2} \quad (11)$$

Rezonanční frekvence pak vyjde:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{Md}} \quad \text{a běžně se uvádí } f_r = \frac{60}{\sqrt{Md}}. \quad (12)$$

M představuje plošnou hmotnost membrány v $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$. Rezonance s uvažováním vloženého tlumení

může být přepsána pro adiabatický děj jako:

$$f_0 = \frac{50}{\sqrt{Md}} \quad (13)$$

Porovnáním těchto zjednodušených výpočtů s reálným měřením ale dostáváme chyby návrhu až desítky procent. Tyto chyby zřejmě způsobuje zanedbání mechanických vlastností membrány – její ohybové tuhosti. Správné určení okrajových podmínek, typu upnutí membrány, se ukazuje jako nejdůležitější parametr.

Akustická impedance rezonátoru se přizpůsobuje vlnovému odporu vzduchu umístěním porézního materiálu za membránu. Mezi membránou a tlumením se ponechává malá mezera 5 – 10 mm. Pak se na kmitech nepodílí mechanická tuhost tlumení. Za předpokladu přizpůsobení roste činitel pohltivosti až k 1.

2.5 Kmitající desky

Posunutí rezonance směrem k nižším frekvencím se dosahuje použitím těžší membrány nebo desky, jejíž ohybovou tuhost není možné zanedbat. Mechanické parametry materiálu a hlavně konkrétní okrajové podmínky uchycení zde mají určující vliv. Ohybové vlastnosti desky na okrajích podepřené lze odvodit. Podepřením se rozumí nulová výchylka na okrajích s neomezenou možností ohybu jako kloub.

Tuhost desky lze dle [2] vypočítat jako:

$$B = c_L^2 \frac{\rho h^3}{12}, \quad \text{kde } c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (14)$$

Pro vlastní kmitočty desky lze pak dle [2] psát:

$$f_n = 0,45hc_L \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 \right], \quad (15)$$

kde index n označuje dvojici módových čísel. V případě vetknutí okrajů, kdy mají jak nulovou výchylku, tak nulovou možnost ohybu, by byla základní rezonance přibližně dvojnásobná.

Pod základním rezonančním kmitočtem s indexem 1,1 se pohyb desky řídí pouze její tuhostí – hmotnost ani tlumení zde nejsou podstatné. Nad několika základními rezonancemi nabývá na vlivu hmotnost desky a uplatňuje se až ke kritickému kmitočtu koincidence, kdy se vlnová délka ohybové vlny v desce rovná vlnové délce ve vzduchu. Nad kritický kmitočtem má opět zásadní vliv tuhost desky.

3 Měření absorpce

Měřenými akustickými parametry určujícími výsledné vlastnosti rezonátoru jsou povrchová impedance a činitel pohltivosti v závislosti na frekvenci. Laboratorním standardem je metoda měření v dozvukové komoře a měření vzorku v interferometru. V dozvukové komoře se získá fr. charakteristika pohltivosti pro všesměrový dopad. V interferometru lze kromě indexu pohltivosti pro kolmý dopad změřit také povrchovou impedanci. Pro vývoj a ověřování vzorků materiálu se používá více měření v interferometru pro kolmý dopad. Pro navrhování akustických úprav se vyžaduje činitel pohltivosti pro všesměrový dopad změřený v dozvukové komoře. U obou metod je největším problémem dodržet podmínky měření v případě požadavku na fr. rozsah pod 100 Hz, který klade enormní nároky na rozměry měřicí aparatury. Normativní požadavky se ale na takto nízké frekvence nevztahují, a proto jim bývá věnována malá pozornost.

3.1 Měření v dozvukové komoře

Pro nízké kmitočty rostou potřebné rozměry dozvukové komory, tak aby počet a rozložení vlastních kmitů prostoru byl dostatečně hustý. Nejnižší měřicí kmitočet dozvukové komory lze určit dle [2]:

$$f_{\min} = 125 \left(\frac{180}{V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

V typických rozměrech dozvukové komory 200 m³ tak lze měřit až od 1/3 okt. pásma 125 Hz. Pro platné měření od 40 Hz by byl nutný objem 5000 m³. Vyhodnocování měření v 1/3 okt. nebo dokonce oktávových pásmech není pro nízkofrekvenční rezonátory s vysokými činiteli jakosti dostatečné. Vývoj nových materiálů a prvků znesnadňuje nutné minimální množství vzorku stanovené normou na 10 m², aby naměřená data odpovídala standardu. Doba dozvuku se podle statistické akustiky počítá dle Sabina [2]:

$$T_s = \frac{55,3V}{cA} = \frac{0,161V}{\alpha S} = \frac{0,164V}{\alpha S} \quad , \text{ kde } A = \alpha S \text{ [Sabin]}, \quad (17)$$

kde teoreticky odvozená konstanta 0,161 byla nahrazena experimentálně stanovenou konstantou 0,163, přičemž literatura běžně uvádí 0,164. Vzhledem k nejistotám měření se ale jedná o zcela zanedbatelnou chybu. Veličina A pak představuje celkovou střední pohltivost v Sabinech (lze si představit jako otevřené okno – nulový činitel odrazu o ploše 1m²). Měřením doby dozvuku s a bez vzorku lze stanovit jeho index pohltivosti. Detailní popis měření lze nalézt v příslušné normě.

3.2 Měření v interferometru

Interferometr, impedanční neboli Kundtova trubice nabízí nesrovnatelně menší rozměry, kontrolovanější prostředí a možnost zjistit povrchovou impedanci vzorku. Spodní frekvenční limit je dán nutností nalézt alespoň dva uzly akustického tlaku [5]:

$$f_l = \frac{3c}{4l}, \quad (18)$$

kde l je délka trubice. Ve standardním interferometru o délce 1 m lze tak měřit až od 250 Hz. Pro měření od 40 Hz by byla nutná délka interferometru 6,4 m. Také průřez zařízení by musel být přizpůsoben rozměrům akustického prvku – tedy nejčastěji 600x600 mm.

Horní frekvenční limit omezuje první příčný mód:

$$f_u = \frac{c}{2d} \quad (19)$$

Tlak na co největší horní kritickou frekvenci limituje rozměry použitého vzorku. Pro měření lze využít metody stojatých vln s jedním posuvným mikrofonem nebo metody přenosové funkce využívající dvojice mikrofonů. Zatímco metoda přenosové funkce je výpočetně složitější, poskytuje jedním měřením zároveň výsledky v celém frekvenčním pásmu. Metoda stojatých vln hledá první minimum a maximum, z nichž lze zjistit poměr stojatých vln:

$$PSV = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \approx \frac{u_{\max}}{u_{\min}} = \frac{1+|R|}{1-|R|} \quad (20)$$

A povrchovou impedanci:

$$Z = \rho_0 c \frac{1+R}{1-R}, \quad (21)$$

$$\text{kde } R = |R|e^{j\phi} \quad \text{a} \quad \phi + (2n-1)\pi = 2kZ_{\min,n}. \quad (22)$$

Je vhodnější měřit na prvním minimu a maximu, jelikož se tím podstatně eliminuje vliv ztrát ve stěnách interferometru. Ačkoliv je metoda stojatých vln časově náročná a produkuje pouze jednotlivé frekvenční body, považuje se za přesnější metodu zaručující vždy správné výsledky. Díky její jednoduché implementaci a přímočarému měření je stále velmi rozšířená.

3.3 Měření akustického tlaku v bodu vně a uvnitř

Zajímavou informaci podává akustický tlak uvnitř rezonátoru. Hlavním předpokladem při měření je soustředěnost parametrů rezonátoru, akustický tlak tedy musí být v rámci objemu vzduchového polštáře nezávislý na poloze. To zajistí automatické průměrování pohybu membrány v průřezu do jediné hodnoty tlaku. V případě ohybových módů kmitajících desek je změřen pouze

příspěvek ke změně tlaku vzduchového polštáře, nikoliv pohltivost ztrátami uvnitř desky. Sude ohybové módy by proto neměly mít vliv na akustický tlak uvnitř.

Získaný graf ak. tlaku se může popsat rozdělením na 4 části podle frekvence odpovídající teorii neprůzvučnosti [2]. V první části pod rezonancí se vnitřní tlak vůči budícímu výrazně neliší, omezuje ho pouze poddajnost. Po odečtení měření tlaku vně se v tomto pásmu relativní akustický tlak blíží nule. Druhá část obsahuje samotný rezonanční vrchol – lze z něj odečíst rezonanční frekvenci i činitel jakosti. Ve třetí části tlak klesá přibližně se strmostí 12 dB/okt., která odpovídá dolnoproustnému filtru druhého řádu. Ve čtvrté části od desetinásobku rezonanční frekvence dochází k projevům vnitřního stojatého vlnění a ohybovým rezonancím kmitající desky. Předpoklad soustředěných parametrů zde přestává platit. Činitel pohltivosti zde klesá k téměř zanedbatelným hodnotám kolem 0,1.

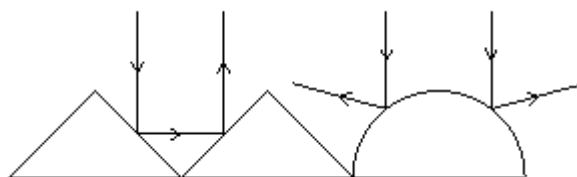
Umístění rezonátoru při měření v blízkém poli reproduktoru (do 250 mm) zajišťuje velmi malý vliv okolního prostředí i v běžných místnostech. K měření v blízkém poli se doporučuje uzavřený typ ozvučnice, protože bassreflex v tomto případě nemá dostatečný prostor na správné sečtení s měničem a vytváří fázové nepravidelnosti. Použití dvou mikrofonů dovoluje dále odečíst tlak v místě měření bez rezonátoru od tlakové charakteristiky uvnitř rezonátoru. Tím se odečte vliv přenosové funkce reprosoustavy, vlastních kmitočtů místnosti i rozdílů mezi mikrofony.

4 Typy difuzních prvků

Historicky byly dnešní vlastnosti difuzorů částečně obsaženy v široce členité výzdobě koncertních sálů. Později se začalo využívat geometrických principů ke konstrukci prvků rozptylujících zvuk. V dnešní době má na konstrukci difuzorů největší vliv teorie čísel. Současné koncertní síně vyžadují již cíleně funkční akustická řešení difuzorů pro splnění nejvyšších nároků.

4.1 Geometrické difuzory

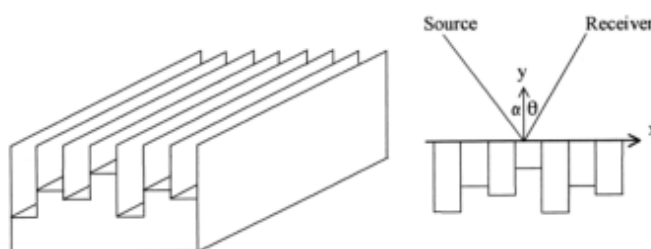
Potřeba rozptylování zvuku byla nejprve řešena jednoduchými geometrickými prvky. Nejpoužívanějšími byly trojúhelníkovité nebo polokruhovitě vypouklé útvary v jednom nebo obou rozměrech (konvexní). Vyduté – konkávní povrchy podle Everesta [6] koncentrují zvuk a zhoršují difuznost ak. pole. Jsou založené na geometrické analogii šíření akustické vlny jako paprsků, ale selhávají při periodickém umístění a jiném než kolmém dopadu vlny (zejména trojúhelníkové dle obrázku 1). Oblíbené byly zejména pro svoji jednoduchou realizaci prohnutím deskových materiálů a vizuální dojem z místnosti jimi vybavenými.



Obr. 1 Trojúhelníkové a polokruhové difuzory

4.2 Matematické sekvence

Manfred Schröder přišel s uplatněním matematických sekvencí s dobrými autokorelačními vlastnosti jako se vzorem, podle kterého lze vyrobit difuzory s dobrými vlastnostmi. To znamená, že hodnoty autokorelace na jiných indexech než 0 jsou velmi malé. Dobré autokorelační vlastnosti znamenají vyrovnané výkonové spektrum takové sekvence a převedeno do fyzických rozměrů rovnoměrnou energii obsaženou v rozptylujících směrových lalocích.

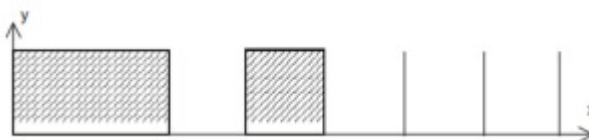


Obr. 2 Schröderův difuzor, převzato z [1]

Příkladem je realizace Schröderova difuzoru podle sekvence délky 7, někdy též nazývaného QRD (Quadratic Residue Diffuser), na obrázku 2. Jednotlivé studny jsou odděleny tenkými příčkami, které zajišťují šíření rovinné vlny uvnitř. Každá studna způsobuje jiný fázový posuv. Na výstupu se jednotlivé příspěvky s různými fázovými zpožděními sečtou a vytvoří tak rovnoměrné rozložení akustického tlaku na polokouli. Obecně se zlepšují difuzní parametry s počtem studní a tedy velikostí prvočísla, od kterého jsou odvozeny.

4.3 MLS

Mezi další číselné řady s dobrou autokorelací patří Maximum Length Sequence. Výsledné difuzory jsou tvořeny řadou 0 a 1 – studní s plnou a nulovou hloubkou. Na obr. 3 zobrazený MLS difuzor délky 7 má ale nevýhodu v úzké šířce pásma pouze 1 oktávy. Půl oktávy nad návrhovou frekvencí odpovídá fázový posun studny celému násobku vlnové délky a difuzor se zde chová virtuálně jako plochá deska. Tento problém lze překonat použitím sekvencí větší délky dle [1].



Obr. 3 MLS difuzer, převzato z [1]

4.4 PRD

Rozptylné prvky s označením Primitive Root Diffusers se vyznačují rovněž rovnoměrným rozložením odražené energie do jednotlivých směrových laloků na celočíselných násobcích návrhové frekvence. Navíc se ale ve směru dopadající vlny nachází na polárním grafu ostrý pokles. To znamená, že se dopadající energie nevrací do směru, odkud přišla [1]. Pro dané prvočíslo N a kořen r čísla $N-1$ se číselná sekvence rozvine podle následující rovnice.

$$s_n = r^n \bmod N ; n = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (23)$$

Návrhovou frekvencí a tedy i rozměr prvku popisuje rovnice (24), kde c je rychlost zvuku.

$$f_0 = \frac{s_{max}}{N} \frac{c}{2d_{max}} \quad (24)$$

Jednotlivé hloubky studní vycházejí z dané sekvence a vlnové délky návrhové frekvence.

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (25)$$

Podle této rovnice ale nejsou nuly v polárních charakteristikách na celočíselném násobku návrhové frekvence, kde je energie do laloků rovnoměrně rozdělena. Aby se obě kýžené vlastnosti dostali na stejnou frekvenci, je nutno rovnici (25) upravit do formy (26).

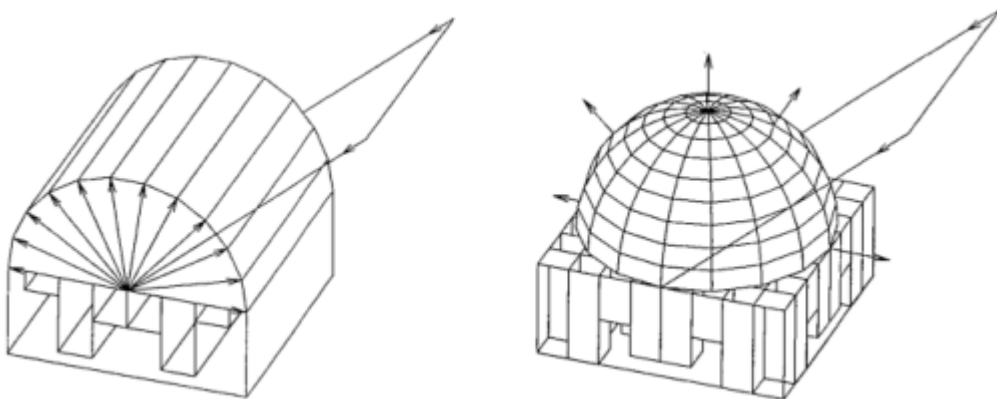
$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2(N-1)} \quad (26)$$

Maximální frekvence, při níž platí uvedená teorie, odpovídá šířce studny podle rovnice (27). Stejně jako návrhová frekvence ale nespecifikuje konkrétní difuzní vlastnosti, které mohou oba frekvenční limity ve skutečnosti výrazně přesahovat.

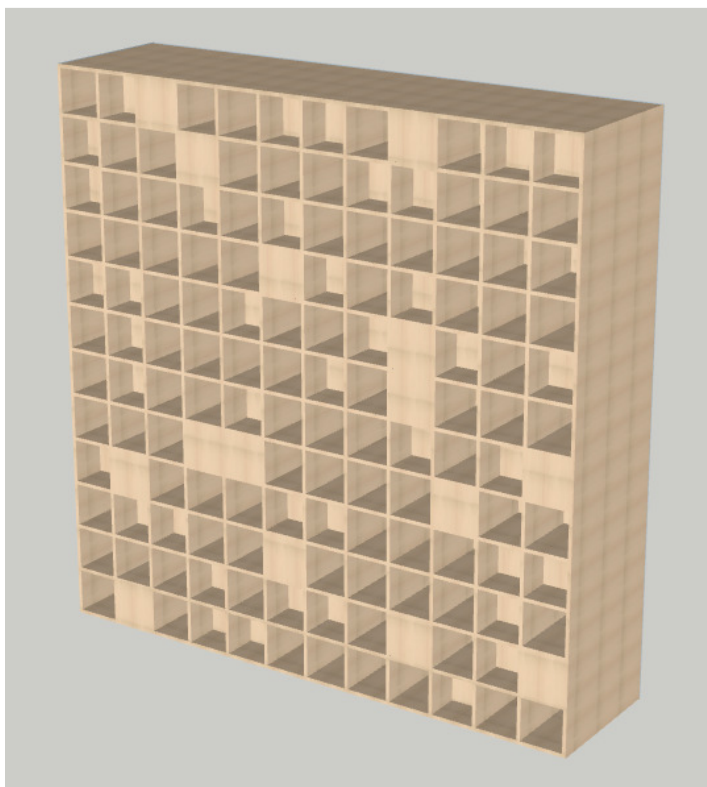
$$w = \lambda_{min}/2 \quad (27)$$

4.5 2D difuzory

Od struktur rozptylujících v jednom směru s válcově symetrickou charakteristikou odražené vlny lze přejít k difuzorům rozptylujícím všesměrově v obou rovinách. Využívá se přitom tzv. čínské skládací teorie, díky které se sekvence (z většího prvočísla) rozloží do druhého rozměru, při zachování jejích původních vlastností. 1D sekvence se v původním pořadí zapíše úhlopříčně směrem dolů do tabulky nového 2D difuzoru. Jakmile se dosáhne konce tabulky, pokračuje se v dalším políčku periodicky, jakoby se tabulka přeložila, až se celá zaplní.



Obr. 4 Rozptýlené pole 1D (vlevo) a 2D (vpravo) difuzoru, převzato z [1]

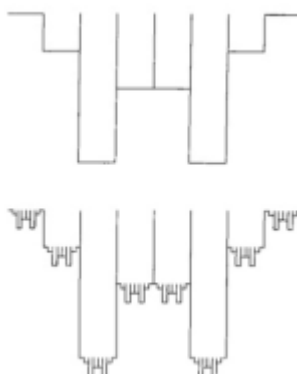


Obr. 5 Ukázka konstrukce 2D difuzoru

Nevýhodou PRD prvků rozložených do 2D je to, že nemohou být čtvercové, nehodí se tedy pro široce používanou montáž v modulech 60x60, 60x90 nebo 60x120 cm. Rovněž plocha stěn difuzoru a počet studní výrazně roste a stává se hlavní příčinou zvýšené absorpce na vyšších kmitočtech. Přestože směrové vlastnosti v jednom řezu polárních charakteristik 1D difuzoru převyšují 2D difuzor, nemohou tak výrazně přispět ke zvýšení počtu různých cest zvuku od zdroje k posluchači v místnosti. Právě k akustickému zvětšení menších prostor se s výhodou používají 2D difuzory.

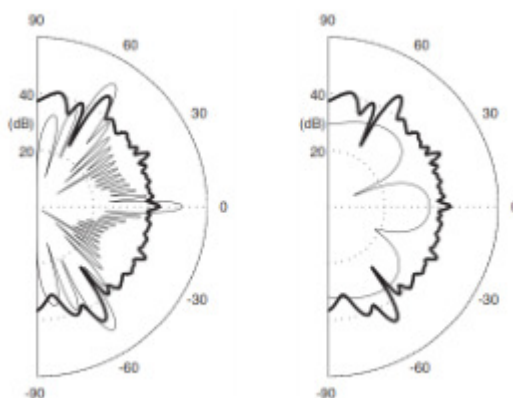
4.6 Fraktálové prvky

Pro dosažení velké šířky pásma by bylo nutné výrazným způsobem zvyšovat délku sekvencí a složitost konstrukce – počet stavebních dílů nad únosnou míru. Nepříjemným negativním efektem by byl také nadměrný růst pohltivosti. Tyto nedostatky výrazným způsobem odstraňuje vnoření menších difuzorů do studní většího rodiče na základě fraktálového principu - viz obrázek 6. Větší příčný rozměr základních studní umožňuje též lepší údržbu a zajišťuje vyšší bezpečnost zamezením použití malých dlouhých částí hrozících zraněním, které by jinak vznikly při rozšiřování pásma obyčejného 2D difuzoru. Jednotlivé difuzory se chovají prakticky nezávisle. Existují případy použití až tří stupňů fraktálových difuzorů [1].



Obr. 6 Princip uspořádání fraktálových difuzorů, převzato z [1]

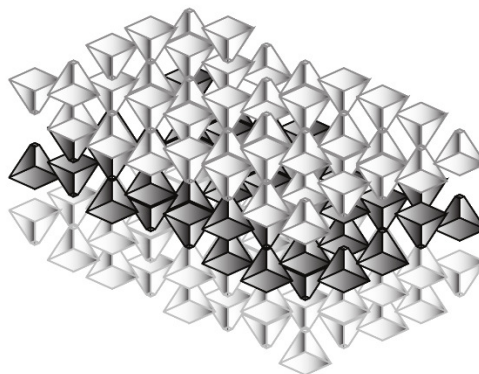
Většina difuzorů se pro dosažení estetického vzhledu používá ve sružených umístěních. Vliv skupinového použití názorně popisuje obrázek 7. Zachování rozptylných vlastností nebo dokonce jejich zlepšení umožňuje modulace jejich uspořádání otočením o 180° v případě asymetrických konstrukcí, použitím prvků s inverzní hloubkou studní, zrcadlových dvojic a kombinací těchto metod.



Obr. 7 Výsledek modulovaného a periodického uspořádání difuzorů (vpravo 1ks), převzato z [1]

4.7 Objemové difuzory

Tradičně se difuzory umísťují na stěny a stropy místností. Jiným způsobem, jak dosáhnout difuzního pole v místnosti, je umístění difuzoru přímo do prostoru – zavěšením pod strop. Potom může takový objemový difuzor ovlivnit zvuk dopadající ze všech směrů, nikoliv jenom z poloprostoru a má tak potenciál být účinnějším. Vlastně se jedná o přidání další roviny difuze a proto 3D difuzor. Bohužel právě proto je nesnadné takový prvek navrhovat, existuje jen velmi málo literatury zaměřené na toto téma. Příklad takového difuzoru uvádí obrázek 8.



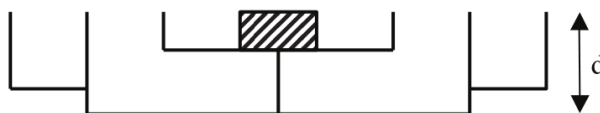
Obr. 8 Objemový difuzor, převzato z [1]

4.8 Numerická optimalizace difuzorů

Někteří autoři [7] se dále soustředí na numerickou optimalizaci hloubek jednotlivých studní podle výsledků simulace. Byly vytvořeny iterativní algoritmy hledání globálního maxima založené vesměs na metodě tzv. „slézání kopce“ (hill-climbing). Vzhledem k velkému počtu stupňů volnosti - počtu optimalizovaných hloubek studní - se většinou přistupuje ke snížení počtu směrů buzení, počtu frekvenčních bodů a simulovaných prostorových bodů měření. Takové zjednodušení v sobě skrývá nebezpečí hledání optimálního difuzoru vyhovujícímu pouze zadání – lokálnímu maximu a nikoliv skutečnému difuznímu poli. Jako metrika kvality simulovaného prvku se volí parametry, kterým se budeme věnovat v kapitole 5.

4.9 Využití hluchých prostor konstrukce

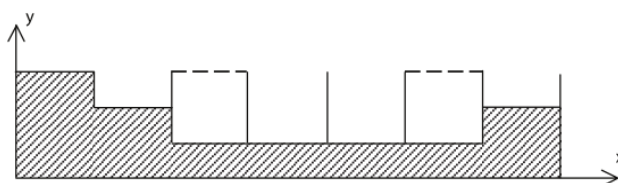
Všechny typy difuzorů vykazují velký objem konstrukce, který neplní žádnou jinou funkci, kromě podpory tuhosti. Často se jedná o téměř 50% objemu konstrukce bez žádného účelu a zbývá tedy jen najít způsob vhodného využití ke zvýšení efektivity takového prvku, jak z hlediska funkčnosti, tak z hlediska hmotnosti a nákladů na výrobu.



Obr. 9 Zalomení studní pod sousední v difuzoru – snížení hloubky na 63 %, převzato z [1]

Prostou úpravou geometrie a vytvořením odbočky z hluboké studny pod mělkou studnu lze dosáhnout prodloužení dráhy paprsku a tedy snížení dolního mezního kmitočtu nebo snížení hloubky konstrukce při zachování stejných vlastností. V praxi se používá i odebrání materiálu

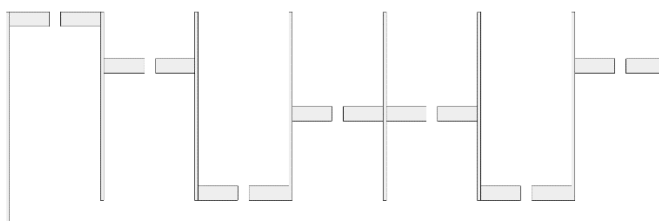
z vnější strany okrajových stěn difuzoru, které po sdružení více prvků dohromady tvoří další studny.



Obr. 10 Náhrada nejhlubších studní rezonátory, převzato z [1]

Základním principem Schröderových difuzorů je otáčení fáze akustické vlny na cestě v jednotlivých studních s náhodnou distribucí v prostoru. Fázi lze ovlivňovat ale i rezonančním principem, kdy se největší hloubky studní mohou zmenšit na polovinu a příslušné první otočení fáze nahradit rezonátorem bez vložného tlumení.

Na nízkých frekvencích lze bez újmy hlavní funkce difuzoru využít hluchý objem konstrukce podle [8] k pohlcování zvuku některým z pásmově omezených, rezonančních principů. Vzhledem k nenáročnosti konstrukce se většinou používá Helmholtzových rezonátorů, přestože i membránový princip je možný. Při výpočtech se postupuje dle vzájemné nezávislosti difuzní složky na vysokých frekvencích a pohlcující složky na nízkých frekvencích. Štěrbinou se proto přidává mnohem více kmitající hmotnosti – štěrbina zaujímá menší plochu a je delší. Přizpůsobení impedance a snížení činitele jakosti se provádí vložením porézního tlumení dovnitř rezonátoru.



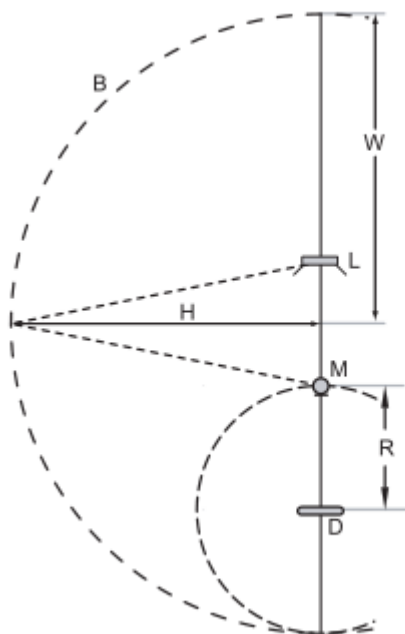
Obr. 11 Zvýšení kmitající hmotnosti s posunutím rezonance na nízké kmitočty

Vytvořením mezery mezi zadní stěnou a difuzorem se propojí jednotlivé komory a celý difuzor se pak chová jako jeden rezonátor se soustředěnými parametry.

5 Princip měření akustických difuzních prvků

Hlavním směrem, kterým se měřicí techniky difuzorů ubírají, je měření ve volném poli. Měření činitele směrové difuze ve volném poli se věnuje norma z července 2013 ČSN ISO 17497-2 [9], ze které bylo převážně čerpáno při sestavování měřicího aparátu. Nejčastěji se používá rovné plochy s velmi nízkou pohltivostí – vysokým činitelem odrazu, na kterou se těsně umístí celý měřicí aparát včetně vzorku, ten je pak dokonalým odrazem zrcadlen i do obrazové poloroviny pod podložkou a měří se pak vždy dvojice prvek - obraz. Volné pole se zabezpečuje bezodrazovou zónou o dostatečné velikosti. Další odrazy jsou pak odstraněny použitím váhovacího okna na naměřené impulsní charakteristiky. Princip, praktické provádění měření i zpracování signálů dobře popsal Hargreaves [10].

Zdroj zvukové vlny ani mikrofony nesmí zasahovat do akustického pole. Mikrofony proto musí být všesměrové se stejnou citlivostí na všech možných drahách odrazu od difuzoru v rozmezí $\pm 1\text{dB}$ v amplitudě a $\pm 10^\circ$ ve fázi. Zdroj musí zajistit pole o rovnoměrnosti $\pm 2\text{ dB}$ v amplitudě a $\pm 20^\circ$ ve fázi přes referenční plochý povrch. Jejich rozměry proto musí být minimální, což je důležitá podmínka zejména pro zdroj.



Obr. 12 Uspořádání měřicího aparátu, D – vzorek, M – mikrofon, L – zdroj, B – elipsa volného pole, převzato z [1]

Standardizován je poloměr oblouku mikrofonů 5 m a poloměr oblouku zdrojů 10 m. Bezodrazová zóna, kde by se neměly nacházet žádné jiné předměty, má pak poloměr 12,5 m od

bodů v polovině vzdálenosti mezi zdrojem akustického tlaku a mikrofonem. Uspořádání měření popisuje obrázek 12. Každou vzájemnou polohu mikrofonu a zdroje akustického tlaku je nutno posuzovat individuálně z hlediska bezodrazové zóny. Doporučená je i vizuální kontrola naměřených impulsních charakteristik

Pro dostatečné prostorové vzorkování odražené vlny od difuzoru je nutné zajistit maximální úhlové rozlišení mikrofonů 5° , které odpovídá min. 37 měřicím bodům. Pro posouzení vlastností v difuzním poli se používá několika směrů buzení akustickou vlnou a to buď rovnoměrně rozprostřené na polokouli nebo v případě měření na hraniční rovině ve zkrácené verzi v úhlech 0° , $\pm 30^\circ$ a $\pm 60^\circ$ od referenční normály.

Pro získání impulsové odezvy difuzoru je nutné změřit tři impulsové odezvy: h_1 – impulsová odezva zkoušeného povrchu, h_2 – impulsová odezva bez zkoušeného povrchu a v případě použití více kusů měřicích mikrofonů nebo zdrojů ještě h_3 – impulsová odezva se zdrojem v referenčním bodě orientovaným maximem vyzařování ke každému mikrofonu. Výsledná impulsová odezva se pak získá dekonvolucí podle následující rovnice.

$$h_4 = F^{-1} \left\{ \frac{F[h_1(t) - h_2(t)]}{F[h_3(t)]} \right\} \quad (28)$$

V případě, že lze po vizuálním posouzení daného prvku předpokládat rozdílné chování difuzoru v různých směrech dopadající vlny, má být anizotropie posouzena měřením ve dvou kolmých rovinách vzorku. Po posouzení výsledků měření se rozhodne, zda je nutné měření na polokouli, ve dvou rovinách, nebo stačí prezentovat výsledky v jedné rovině.

5.1 Normovaný autokorelační difuzní koeficient

Pro posouzení rovnoměrnosti rozptýlení zvukové energie do všech směrů se používá autokorelační difuzní koeficient. Vyšší číslo pak znamená rovnoměrnější rozptyl do všech směrů. Počet úhlů měření odraženého akustického tlaku je v rovnici (29) zastoupen v proměnné n odpovídající indexu i .

$$d_\psi = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (29)$$

$$d_{\psi,n} = \frac{d_\psi - d_{\psi,r}}{1 - d_{\psi,r}} \quad (30)$$

Aby se odečetl vliv okrajových podmínek na difuzitu, je výsledek normován oproti odrazivé ploše stejných rozměrů rovnicí (30). Většinou se opakuje měření pro difuzor otočený hladkou zadní stěnou ke zdroji a použije se pro normování tento výsledek. Eliminuje se tak vliv samostatně stojícího difuzoru ve volném poli, který jinak vykazuje výrazně zvýšenou difuzitu i na nízkých kmitočtech. V reálných podmínkách použití v těsné blízkosti stěny k ohybovým jevům nedochází. Normovaný autokorelační difuzní koeficient je dnes široce rozšířen, uznáván a zasídlil jak v mezinárodních, tak v českých normách (ČSN ISO 17497-2), podle které jsou další měření prováděna.

5.2 Rozptylový korelační koeficient

Pro posouzení množství energie odražené mimo spekulární zónu slouží rozptylový korelační koeficient. Podává přitom jinou informaci, než difuzní koeficient. Nevýhodou může být citlivost tohoto koeficientu na pouhé přesměrování dopadající energie, které ale není cílem aplikace difuzoru. Tento parametr byl proto zvolen jako pomocný při počátcích simulací a pro kontrolu správnosti podle D'Antonio a Rife [11].

$$\delta_c = 1 - \frac{|\sum_{i=1}^n p_1(\theta_i) p_0^*(\theta_i)|^2}{\sum_{i=1}^n |p_1(\theta_i)|^2 \sum_{i=1}^n |p_0(\theta_i)|^2} \quad (31)$$

Všeobecně je snadné dosáhnout hodnot blízcích se 1 u rozptylového korelačního koeficientu, obtížně se dosahuje hodnot překračujících 0,5 u normovaného autokorelačního difuzního koeficientu. I špatný difuzor z hlediska normovaného autokorelačního difuzního koeficientu může dosahovat dobrých hodnot rozptylového korelačního koeficientu. V posledních letech se proto k posuzování kvality difuzních prvků používá více normovaný autokorelační difuzní koeficient.

5.3 Váhování koeficientů

Pro posouzení vlastností v difuzním poli mají být výsledné charakteristiky koeficientů změřené na polokouli s rovnoměrným rozprostřením zprůměrovány. V případě metody hraniční roviny ve zkrácené verzi, kdy se připouští měření z budících úhlů 0° , $\pm 30^\circ$ a $\pm 60^\circ$, mají být tyto charakteristiky průměrovány s vahou 1 pro 0° a s vahou 3 pro úhly $\pm 30^\circ$ a $\pm 60^\circ$. Potom lze uvést jako výsledek činitel difuze v difuzním poli.

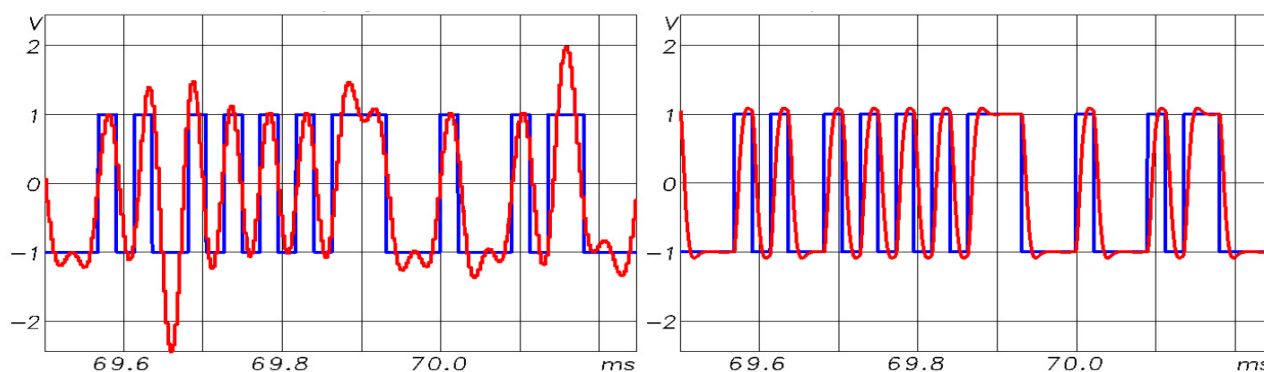
Samotné měření probíhá v jednotlivých směrech dopadu ve volném poli. Pro další zpracování nás více zajímá činitel difuze v difuzním poli, který popisuje chování v reálné aplikaci. Jiné měřicí

metody používají ke stanovení tohoto činitele přímo difuzní pole, ale nejsou tolik rozšířeny v odborné komunitě, ani zakotveny v normách a proto se jim tato práce nevěnuje.

5.4 Měřicí signál

Vzhledem k potřebným rozměrům měřicího stanoviště – potřebné délky signálu a velkému množství měřicích bodů získává na významu celková doba měření. Je nutné zvažovat každou sekundu měřicího signálu, která ve výsledku znamená téměř 10 minut času měření navíc, bez uvážení zvýšených nároků na výpočetní výkon a zpracování. Potřebná doba měření a nutnost nastavení časového okna před začátkem samotného měření téměř jistě vyřadí z použití jinak vynikající metodu TDS (Time Domain Spectrometry) [6]. Pro měření venku v dosahu občanské zástavby rovněž není možné z hlukových důvodů použít jako měřicí signál přeladovaný sinus. U měření ve vnitřních prostorech by bylo nutné zajistit ochranu sluchu obsluhy měřicího zařízení, což by ale ztížilo samotné provádění měření. Uživatelsky nejpřívětivější a široce implementovaný bývá měřicí signál typu MLS. Po přefiltrování dolnoproputným filtrem se strmostí 3 dB/okt. obsluha nepotřebuje ochranu sluchu. Přesto je nutno zdůraznit menší prakticky dosahovaný crest faktor přeladovaného sinu oproti signálům MLS podle obrázku 13, který pak umožňuje dosáhnout vyššího vybuzení. Dále jsou měřicí signály využívající přeladovaný sinus odolnější proti zkreslení, které lze z impulzové charakteristiky odfiltrovat a také mají vyšší odolnost proti malým odchylkám měřeného systému od LTI (Linear Time Invariant) definice podle Müller [12].

Vzhledem k potřebnému vysokému budícímu akustickému tlaku je nutné také zajistit výraznou preemfázi zvyšující energii měřicího signálu na nízkých kmitočtech. Typicky jsou totiž reprosoustavy konstruovány pro zatížení růžovým šumem a výškový měnič zvládne trvalé zatížení pouze několika jednotek wattů. Průběh výkonu akustického šumu klesá směrem k vyšším kmitočtům často i s větší strmostí než 3 dB/okt. a výrazná preemfáze proto pomáhá zvyšovat SNR.



Obr. 13 MLS po 8x převzorkování (vlevo) – crest f. = 7,76 dB, po průchodu filtrem 2. ř. 40 kHz typu Butterworth (v pravo) – crest f. = 1,48 dB, převzato z [12]

6 Kritéria návrhu difuzního prvku

- Dobré difuzní vlastnosti od 1 kHz a velká šířka pásma
- Ekonomičnost výroby
- Snadná přeprava a montáž
- Proveditelná údržba
- Nízká hmotnost kvůli dodržení BOZP 50kg/30min nebo 30kg/pracovní doba pro muže [13]
- Možnost kombinace s Helmholtzovými rezonátory

Všechny tyto požadavky směřovaly na volbu 2D difuzoru typu PRD s prvočíslem do 199. Podmiňují také úspěšné rozšíření takové konstrukce do mnoha aplikací, mezi širší veřejnost a zpětně tak povedou ke zvýšení zájmu o tuto problematiku. Konstruktivní řešení využilo desku MDF (Medium Density Fibre) o tloušťce 3, 10 a 22 mm pro minimální hmotnost a cenu. Duté prostory za dny studní jsou využity pro Helmholtzovy rezonátory na nízkých frekvencích – akustický prvek 2 v 1. Často používané plné konstrukce váží desítky kg a zmíněné prostory nijak nevyužívají. Při sestavování je potřeba dbát pečlivě na lepení spár, aby nedocházelo k nechtěným rezonancím narušujícím základní funkci difuzoru.

Zvýšení šířky pásma a zajištění snadné údržby umožnilo využití fraktálového principu vnořením menšího difuzoru dovnitř každé větší studny. Není proto potřeba stavět úzké hluboké studny, které by zbytečně zvyšovaly pohltivost v pásmu funkce difuzoru. Nárůst tloušťky stěny uvnitř každé studny pak umožnil naladění Helmholtzova rezonátoru pod 100 Hz. Vzhledem k asymetrické PRD konstrukci a ke zvýšení ekonomické výhodnosti jsem zvolil nadstandardní rozměry prvku jako 965x1373x230 mm š x v x h. Přesto lze takový prvek snadno transportovat běžnými typy středních automobilů po sklopení zadních sedadel.

Kvůli přeladění úzkopásmových rezonátorů na konkrétní frekvenci jsem zadní stěnu odsadil od difuzoru o 30 mm a vzniklá mezera pak propojuje jednotlivé studny. Celý prvek se pak chová jako jeden rezonátor a lze jej snadno přeladovat ucpáním jednotlivých štěrbin polyethylenovou zásepkou z vnějšku konstrukce.

7 Použitá simulační metoda

K simulaci jsem přistoupil intuitivním způsobem s využitím původní Schröderovy teorie a aplikací Huygensova principu ke složení výsledného tvaru akustické vlny ve frekvenční doméně. Předpokládá se rovinná dopadající vlna ve směru normály vzorku, která se dále šíří v jednotlivých studních. Na konci se vlna odrazí a až k ústí difuzoru si zachovává rovinný tvar i amplitudu, její části se pouze jinak fázově posunou. Na výstupu difuzoru tvoří všechny fázově posunuté části zvlášť novou kulovou vlnu. Složením těchto kulových vln v bodě pozorování získáme informaci o akustickém tlaku. Provedením několika takových pozorování rovnoměrně rozmístěných na polokouli pak dostaneme informaci o kompletním chování konkrétního difuzoru, kterou lze vynést jako řezu v polárních grafech akustického tlaku a dále zpracovávat do difuzních a rozptylových koeficientů.

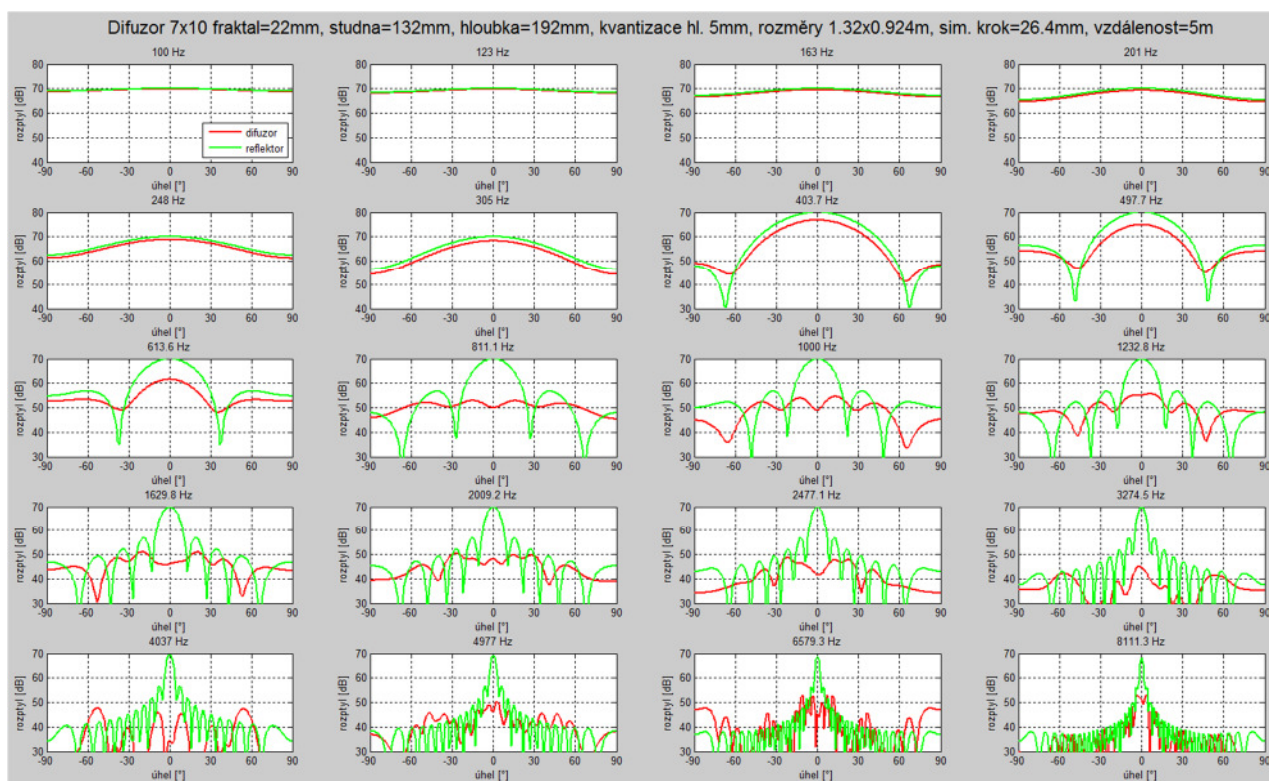
Mezi známá omezení takového druhu simulace patří zanedbání veškerých parazitních jevů a ohybu vln uvnitř struktury. Simulaci lze proto provádět pouze pro kolmý dopad akustické vlny. Neuvažuje se absorpce v hraniční rovině s povrchem, ani jeho konečná impedance nebo průnik akustické vlny přepážkou do vedlejší komory. Pohltivost samotného difuzoru byla simulována jako poměr sumy akustického tlaku odraženého od difuzoru a od reflektoru. Uvažuje se zde analogický princip pohlcování interferencí jako u rezonátoru s dutinou délky $\lambda/4$, kdy je polovina průřezu dopadající akustické vlny otočena ve fázi o 180° a odečte se s druhou polovinou. Difuzor se střední hloubkou studny 96 mm bude mít dle očekávání zvýšenou pohltivost v okolí 900 Hz.

K simulaci pohltivosti Helmholtzových rezonátorů se používá ekvivalentního obvodu se soustředěnými parametry. Předpokládá se vzájemná nezávislost Helmholtzových rezonátorů na vlastnostech difuzoru. Vzhledem k vysokému činiteli jakosti rezonátoru a vzdálenosti frekvenčních pásem rezonátoru a difuzoru o velikosti jedné dekády se zdá být takový předpoklad jako bezpečný. Matlabovský skript se simulací naleznete v příloze 1. Počáteční matice obsahují hodnoty hloubek studní difuzoru. Dále se počítá pohltivost rezonátorů v každé studni a nakonec samotný rozptyl difuzoru. Výpočet trvá na dvou-jádrovém procesoru Intel Core 2 Duo 2,66 GHz přibližně 20 minut a jeho postup lze sledovat na indikátoru průběhu. Simulační krok 26,4 mm byl zvolen jako kompromis mezi délkou výpočtu a přesností při hledání optimálního kandidáta. Lze jej libovolně nastavit, ale jeho velikost kvadraticky ovlivňuje délku výpočtu. Simulační mřížka se odvozuje od rozměrů studny a nevzniká proto problém s jejím správným zarovnáním. Body pozorování byly rovnoměrně rozmístěny na polokouli s krokem odpovídajícím délce oblouku vyřiznuté úhlem 1° na rovníku v pozorovací vzdálenosti 5 m. Všechny parametry simulace lze snadno změnit.

8 Výběr optimálního prvku

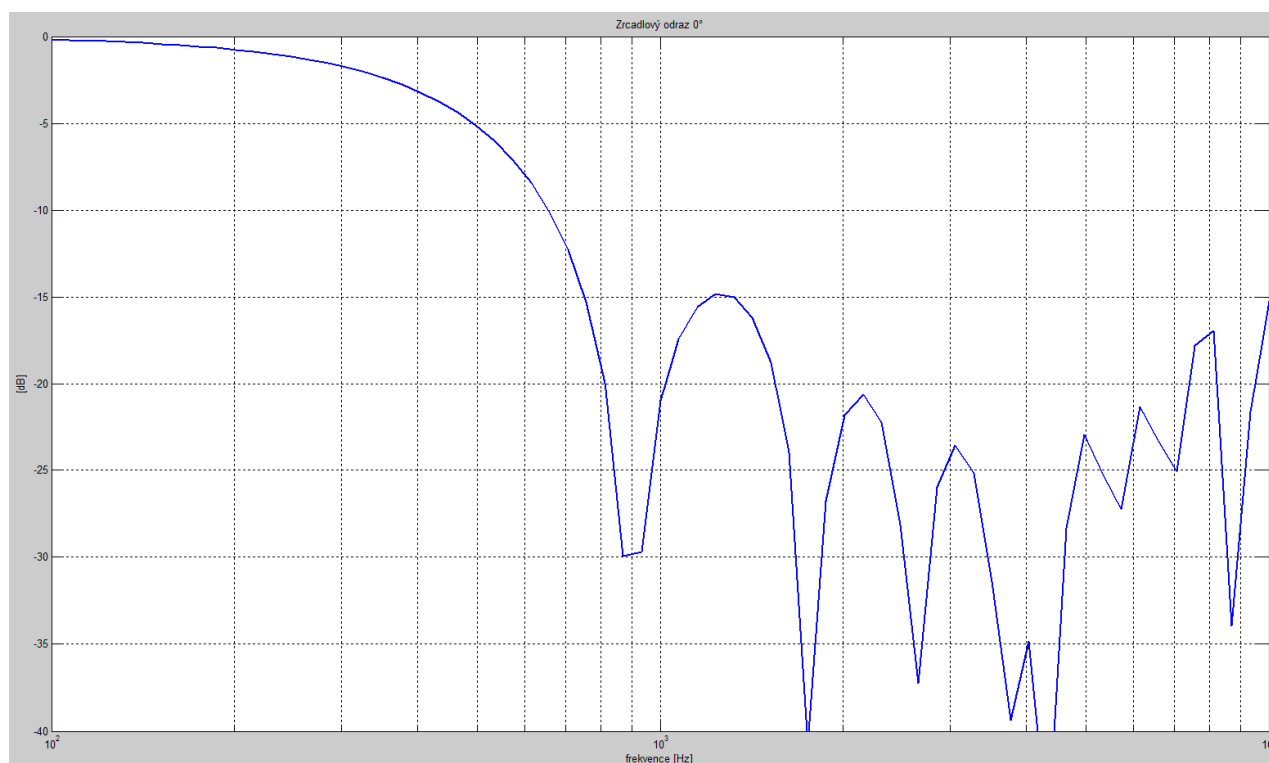
Ačkoliv jsem se v zadání omezil na prvočísla do maximálně 199. Prošel jsem všechna prvočísla až do 401. Nejdříve jsem vyřadil ta prvočísla, která vedou na difuzory s poměrem stran větším než 1 : 2, které nejsou vhodná z praktických důvodů a ani nemají dobré akustické vlastnosti. Postupně jsem díky simulacím vyřadil z výběru difuzory s horšími difuzními nebo pohltivými vlastnostmi. Difuzor se studnami 5x6 ks neměl dobré vlastnosti, dále téměř čtvercové difuzory 12x13 ks měly horší vlastnosti než typy s větším poměrem stran. Všeobecně difuzory nerovnoměrně rozdělenými nebo násobnými kořeny návrhového prvočísla - 1, podle kterého jsou sestavené, neměly dobré vlastnosti. Nakonec z mnoha posuzovaných kandidátů zvítězil difuzor odvozený od prvočísla 71 (P-1) s rovnoměrně rozmístěnými kořeny 2x5x7 o rozměrech 7x10 ks. Pro dané vnější rozměry toto prvočíslu umožňuje i snadnější výrobu a hlavně údržbu manuálním čištěním uvnitř jednotlivých studní o rozměru 123x123 mm.

Vyšší frekvence jsem vyřešil umístěním menšího difuzoru dovnitř každé studny většího rodiče na základě fraktálového principu. Po mnoha experimentech nakonec stačilo do studny 123x123 mm přidat doprostřed destičku o rozměrech 79x79x22 mm.



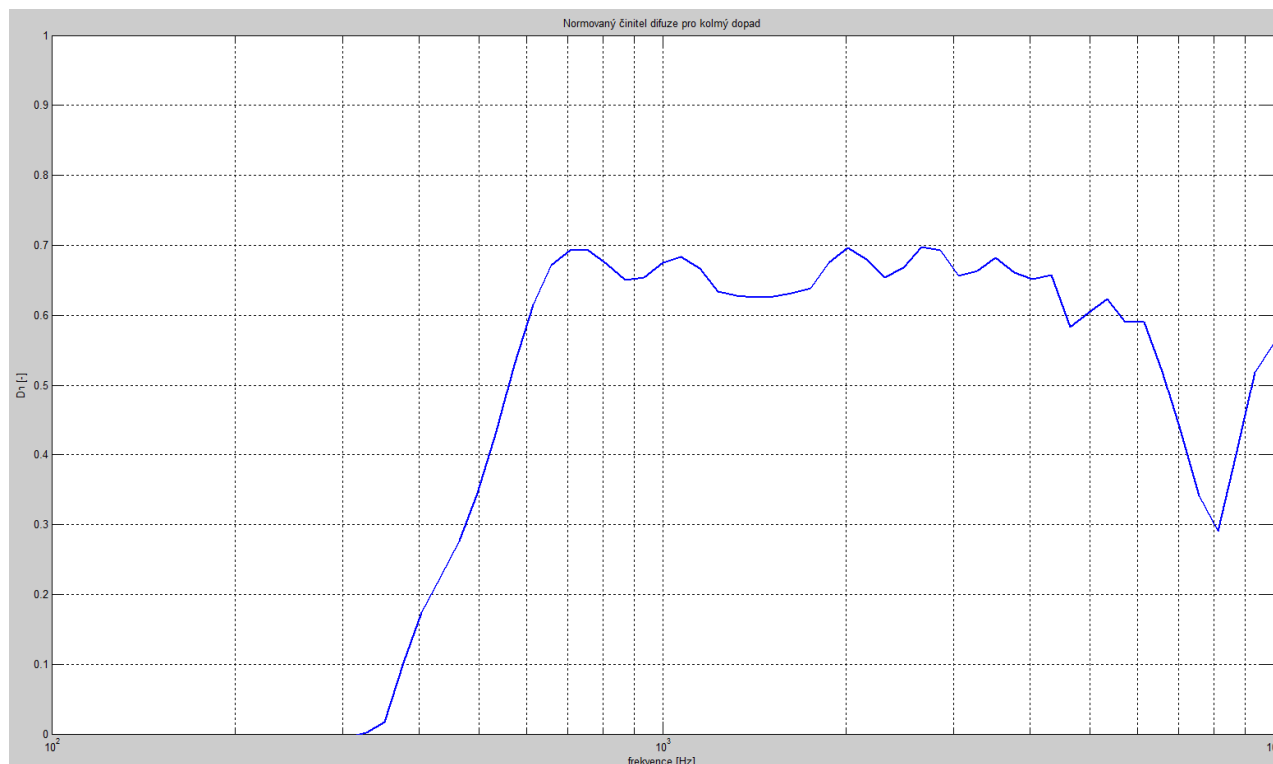
Obr. 14 Směrové charakteristiky difuzoru a kontrolního reflektoru

Výsledné simulované směrové charakteristiky uvádí obrázek 12. Účelově jsem zvolil zobrazení v kartézském systému souřadnic, který umožňuje zobrazit více detailů v menších grafech pro první přehled. Detailní polární grafy naleznete v příloze 6. Udány jsou vždy směrové charakteristiky difuzoru a reflektoru o stejném rozměru. Prezentace pouze samotných výsledků difuzoru by byla zavádějící, neboť na nízkých frekvencích dominují okrajové ohybové jevy akustického prvku společné pro difuzor i reflektor (hladkou desku). V běžné aplikaci na stěně v sousedství dalších prvků k těmto ohybovým jevům nedochází. Z grafů je patrná vynikající schopnost rovnoměrného rozptýlení zvuku do všech směrů v pásmu od 800 do 5000 Hz. Na nižších frekvencích je kvalita difuze ve srovnání s reflektorem vzhledem k funkční hloubce difuzoru 192 mm minimální. Ve vyšších pásmech končí optimalizovaná oblast předpokládané funkce a také přesnost rozlišení i samotné metody simulace.



Obr. 15 Potlačení zpětného odrazu od difuzoru v závislosti na frekvenci

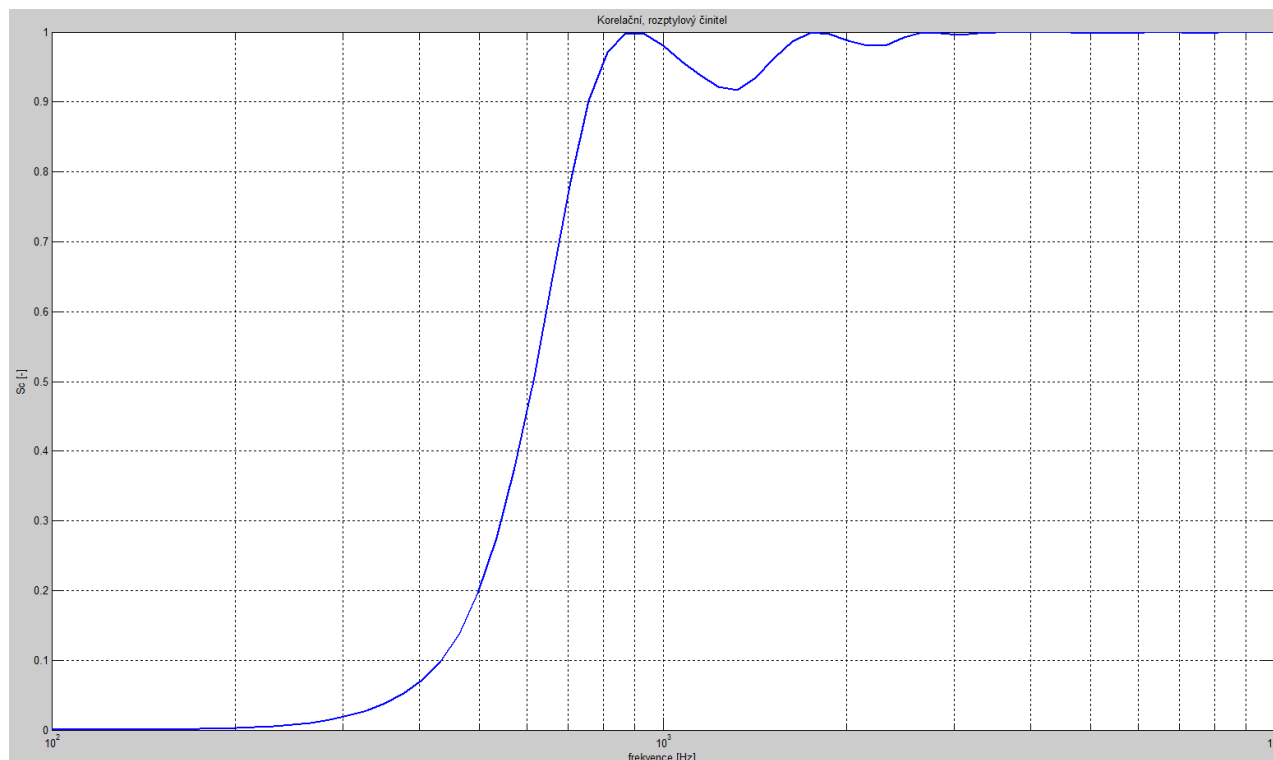
Pro navržený fraktálový PRD bylo zajímavé vynést i samostatný graf potlačení spekulárního odrazu na obrázku 15. Difuzor podle simulace potlačuje zrcadlový odraz minimálně o 15 dB, přes většinu pásma pak až o 20 dB - ekvivalentní činiteli odrazu 0,1.



Obr. 16 Normovaný činitel difuze pro kolmý dopad

Podle rovnic 29 a 30 byl vypočítána fr. charakteristika normovaného činitele difuze pro kolmý dopad na obrázku 16. Hodnoty větší než 0,6 se zde dosahuje v rozsahu 800 – 5000 Hz v souladu se zkoumáním grafů polárních směrových charakteristik. Propad na 8 kHz je sice možné optimalizovat volbou složitějšího fraktálového subdifuzoru, to ale vede na výrazně složitější prvek. Navíc v tomto pásmu nelze očekávat dokonalou shodu simulace s následným měřením. Normativní požadavky v ČSN ISO 17497-2 končí na 5 kHz.

Pouze pro informativní doplnění a kontrolu správnosti simulace byl na obrázku 17 vykreslen podle rovnice 31 korelační rozptylový činitel, který se dle očekávání blíží 1 v navrhovaném fr. pásmu.

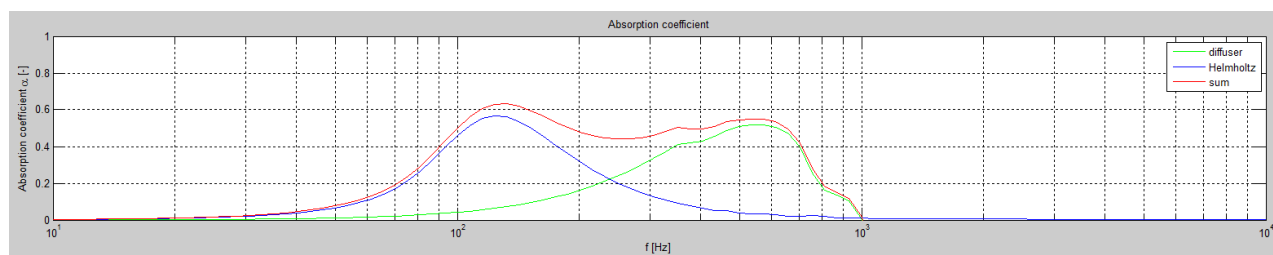


Obr. 17 Korelační rozptylový čísel

8.1 Rozšíření o pohltivost na nízkých kmitočtech

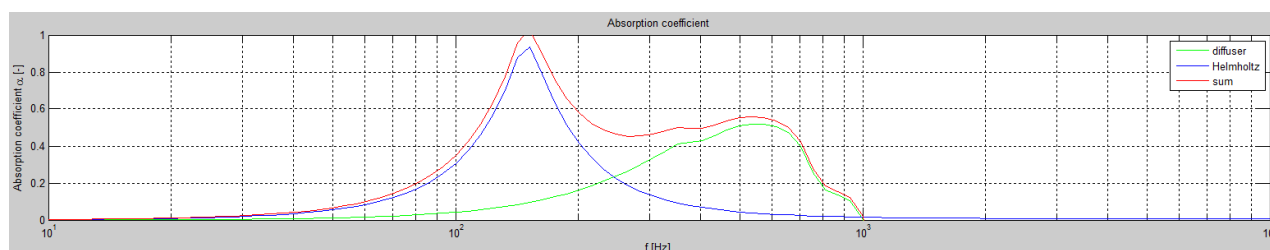
Nevyužitý prostor za studni difuzoru jsem využil pro rozšíření pásma pohltivosti směrem k nižším kmitočtům s Helmholtzovými rezonátory. Původním záměrem bylo použít dvouvrstvého rezonátoru s rezoncemi na 44 a na 150 Hz. Vzhledem k tomu, že při použitelné hloubce 192 mm vychází čísel jakosti pro 44 Hz vysoký, bylo by nutné dvojici rezonátorů v každé studni optimalizovat podle její konkrétní hloubky určené výpočtem difuzoru. Jinak by při konstantním průměru štěrby byly rezonance každé komory příliš rozdílné a nepodařilo by se po zprůměrování čísel pohltivosti dosáhnout významného maxima. Vzhledem k nutnosti ladit 70 různých rezonátorů a citlivosti takového ladění na výrobní nepřesnosti jsem tento koncept opustil.

Další simulace se proto věnovaly jednoduchým rezonátorům a jejich optimalizaci. Nejprve jsem vyzkoušel konstantní průměr štěrby délky 25 mm. Výsledek ukazuje obrázek 18.



Obr. 18 Čísel pohltivosti difuzoru pro konstantní průměr štěrby Helmholtzových rez. 25mm

V dalším kroku jsem přistoupil k optimalizaci průměrů štěrbin rezonátorů pro konstantní rezonanci na 150 Hz. Podle obrázku 19 se podařilo dosáhnout selektivnější pohltivosti, než v předchozím případě, ale pouze za cenu neúměrného zvýšení složitosti výroby. Každý rezonátor musel mít vlastní průměr štěrbin a to v širokém rozsahu. Činitel jakosti jednotlivých rezonátorů se dost liší a některé tak k celkové pohltivosti přispívají velice malým dílem. Náhradní řešení za pomoci více menších otvorů standardizovaného průměru a přeladění jejich počtem v jednotlivých rezonátorech nevedla ke kýženému výsledku. Aplikace úzkopásmového rezonátoru kolem 150 Hz odpovídá umístění na stropu a tlumení vertikálních stojatých vln.



Obr. 19 Činitel pohltivosti s konstantní rezonancí Helmholtzových rezonátorů 150 Hz, přeladěné průměrem

8.2 Parazitní pohltivost difuzoru

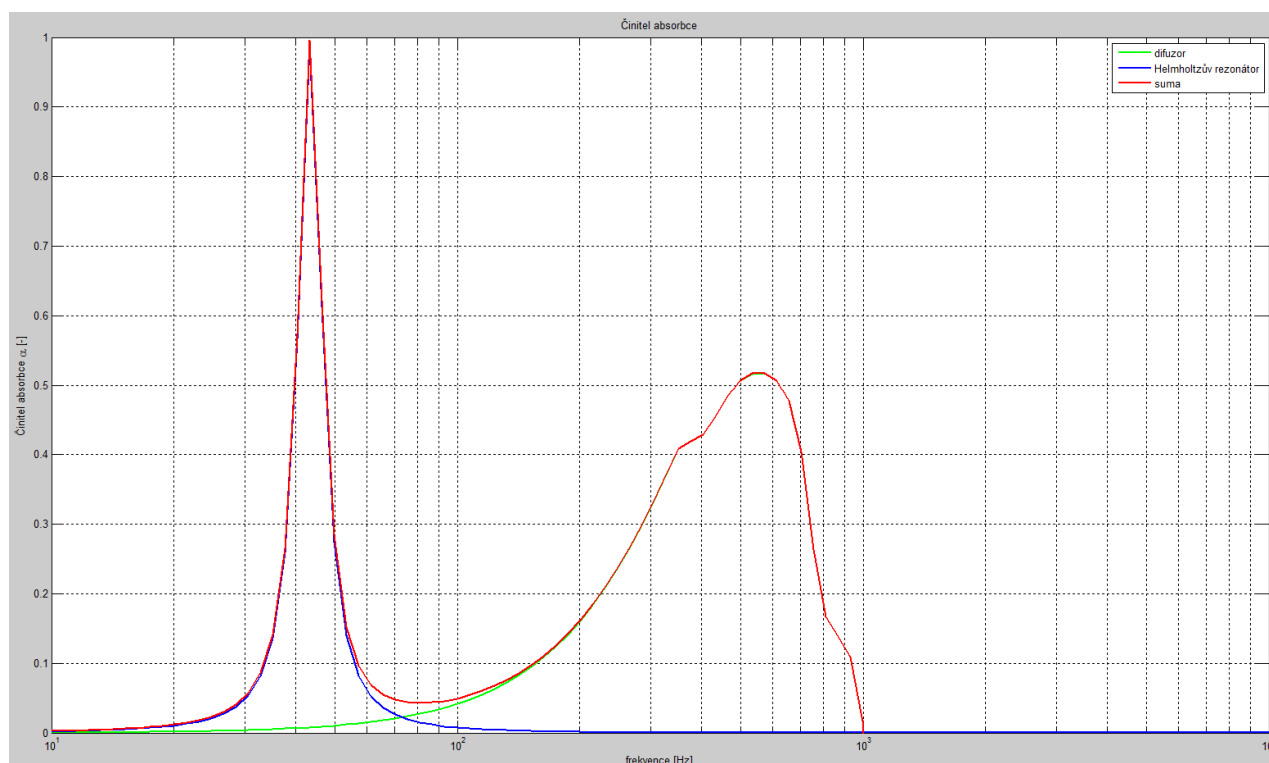
Vzhledem k prostorové složitosti difuzoru lze očekávat, že bude na začátku svého pracovního pásma vykazovat zvýšenou pohltivost způsobenou destruktivní interferencí, podobně jako je tomu o absorbérů využívajících rezonanci rozměru $\frac{1}{4}$ vlnové délky. To se potvrdilo i v simulaci – zelená křivka na obrázku 19. Jednou z možností bylo Helmholtzovými rezonátory plynule navázat na tuto pohltivost a vytvořit tak pásmo konstantní pohltivosti.

8.3 Útlum v modálním pásmu

Další možností uplatnění Helmholtzových rezonátorů byla nejproblematičtější modální oblast akustiky – kritická zejména v malých prostorech, kde zasahuje často až do 250 Hz. Jako první hraniční hodnotu rezonance jsem zvolil 44 Hz. Po prvním pokusu s naladěním jednotlivých štěrbin se ukázalo, že lze jen velmi obtížně realizovat vysoce účinný absorbér na této frekvenci, pokud se tolerance průměrů štěrbin nemá pohybovat v řádu desetin mm.

V dalším pokusu jsem se tedy rozhodnul vyřešit problém přeladitelnosti rezonátorů jejich spojením do jednoho funkčního celku se štěrbinami průměru 18 mm. Zadní stěnu difuzoru jsem odsadil o 30 mm, což podle provedené simulace stačí na to, aby se přechody mezi objemy studní

nestaly sami o sobě štěrbinami a nechtěnými rezonátory. Výsledek pro 75 % zakrytí štěrbin zobrazuje obrázek 20.

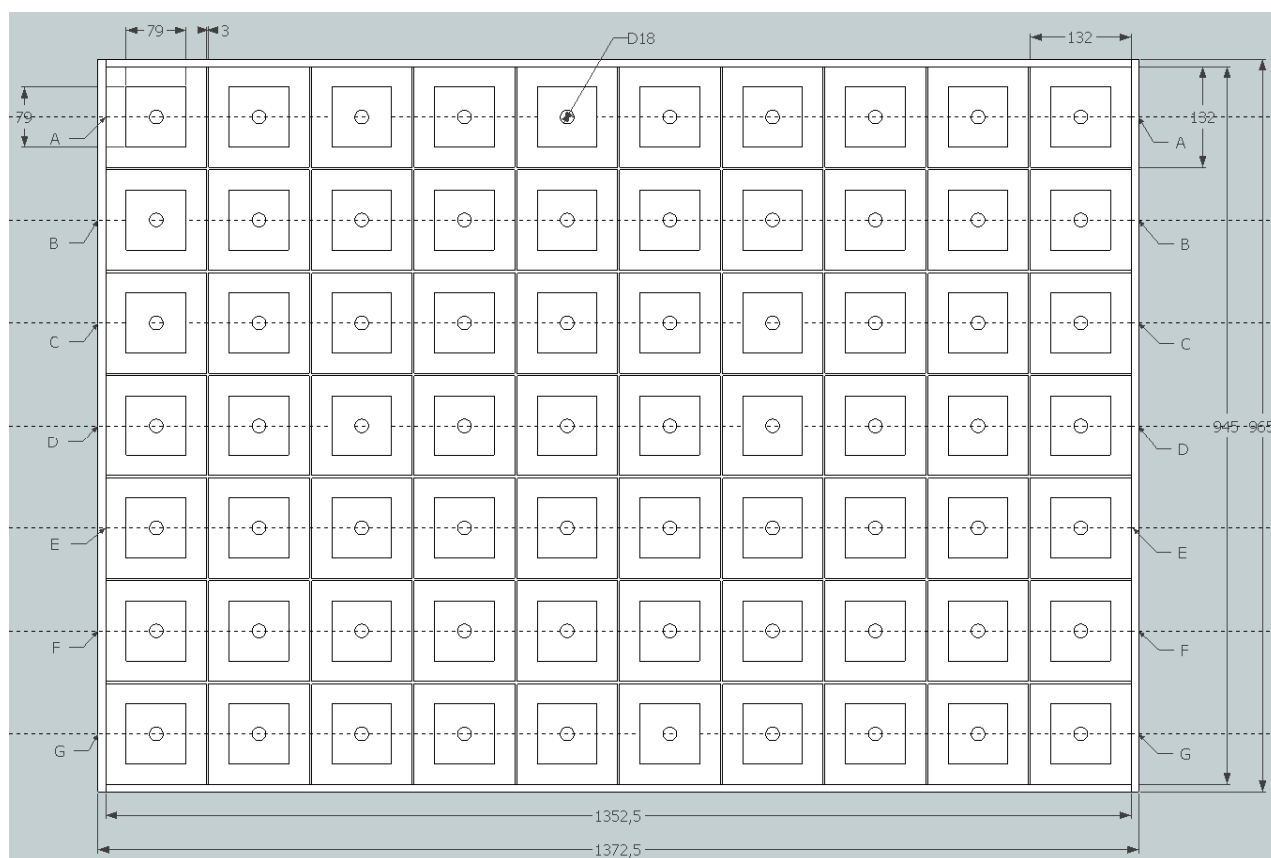


Obr. 20 Činitel pohltivosti difuzoru s rezonancí přeladitelnou v pásmu 40 - 80 Hz

Malá šířka pásma pohltivosti Helmholtzova rezonátoru zajišťuje také minimální vzájemné ovlivňování funkce rezonátoru a difuzoru. Rezonátor je zamýšlen k potlačení základních nejvýraznějších módů místnosti. Je třeba dodat, že šířka pásma odpovídá frekvenci ladění rezonátoru a objemu vzduchového polštáře dle náhradního modelu. Jakkoliv jinak tvarovaný rezonátor se stejným objemem a frekvencí ladění bude mít i stejný průběh pohltivosti. Experimentoval jsem i s vícenásobnými vrstvenými rezonátory, ale došel jsem k poznatku, že mají zcela stejný efekt jako více rezonátorů umístěných vedle sebe. Nepřinášejí proto žádnou výhodu, pouze zvyšují komplexnost konstrukce a zamezují nezávislému přeladění jednotlivých rezonančních vrcholů. Lepšího výsledku se dosáhne použitím více jednoduchých rezonátorů vedle sebe.

K přeladění finálního návrhu difuzoru kombinovaného s rezonátory je použito polypropylenové záslepky naražené přímo do vyvrtané štěrbině. Záslepka lze snadno aplikovat a přiměřeně obtížně vytáhnout bez poškození povrchu difuzoru. Vzhledem ke složitosti výkresu na obr. 21 a 22 jsem si dovolil použít jeho nestandardní prezentace a kóty hloubek jednotlivých studní uvádím v tabulce 1.

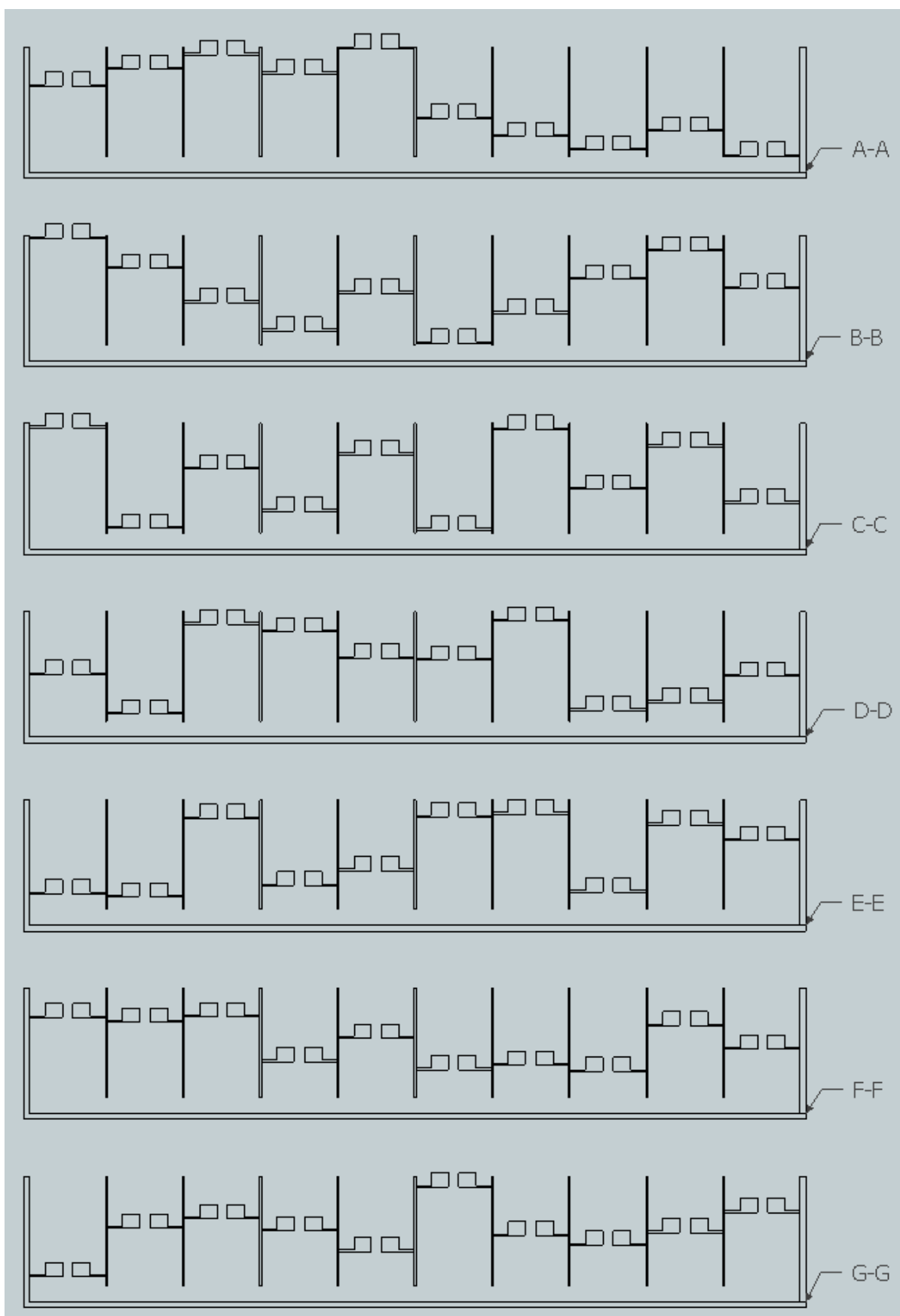
Realizovaný difuzor bez povrchové úpravy zobrazují fotografie 23 a 24 s detailem na přeladění a fraktál.



Obr. 21 Výkres difuzoru – čelní pohled

Hloubky studní difuzoru [mm]						
173	49	162	107	5	3	66
88	57	167	176	181	55	36
71	47	30	19	77	115	11
93	126	148	33	151	165	44
129	85	121	79	52	99	0
16	140	27	82	184	187	123
101	132	22	14	8	134	154
118	143	159	170	112	74	178
96	63	41	156	38	25	145
60	104	68	110	137	90	189

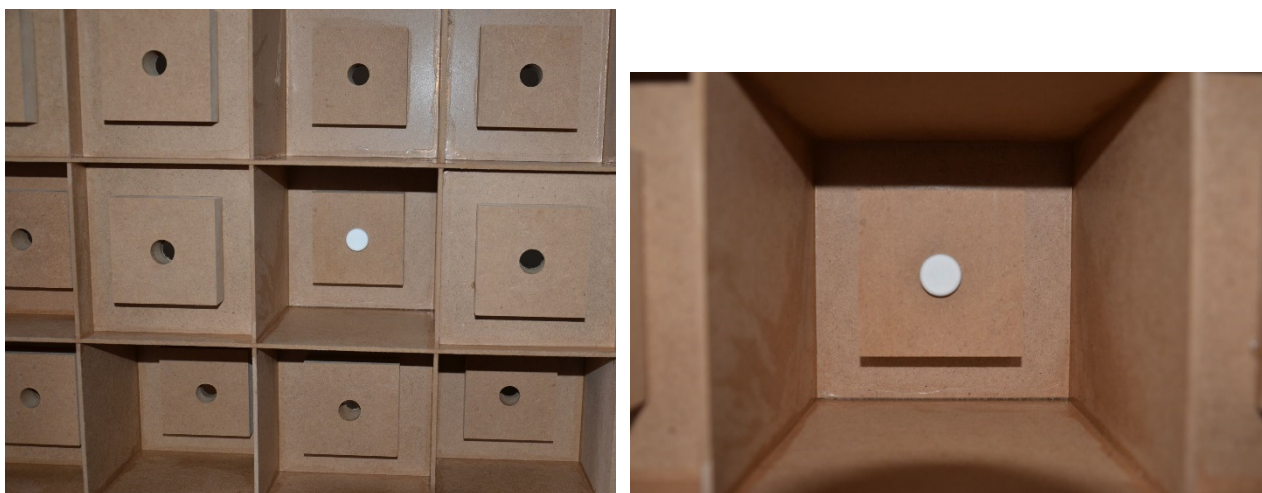
Tab. 1 Hloubky studní difuzoru



Obr. 22 Řezy difuzoru, pro přehlednost bez kót, hloubky studní obsahuje tabulka 1



Obr. 23 Realizovaný difuzor 7x10 ks studní

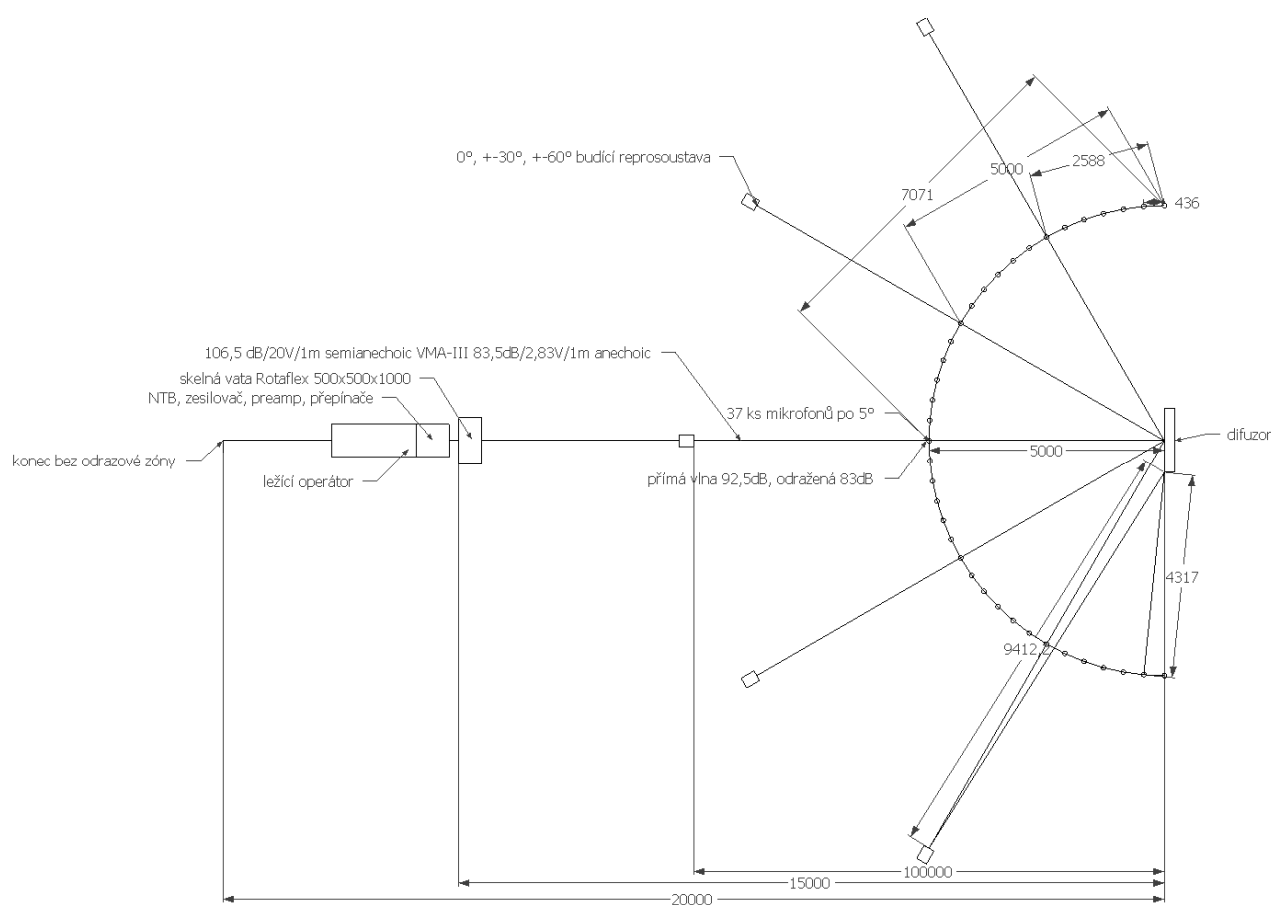


Obr. 24 Detail fraktálové části s přeladováním pomocí ucpávky

Realizovaný difuzor kombinovaný s rezonátorem váží 37 kg a sestává ze 160 dřevěných dílů, až 70 polyethylenových ucpávek, 28 šroubů a por. tlumení. Hmotnost by bylo možno snížit použitím překližkového materiálu (650 kg/m^3) namísto MDF (800 kg/m^3) a snížením tloušťky bočních a zadní stěny za předpokladu zvýšení složitosti konstrukce ke zvýšení tuhosti struktury.

9 Měřicí systém dle normy ČSN ISO 17497-2

Vzhledem k tomu, že je nutné měřit impulsové charakteristiky ze stejných bodů pro difuzor, odrazivá záda, pozadí bez vzorku i budící reprosoustavu a výsledky jsou dále účastny dekonvoluce, zvolil jsem možnost použití samostatného mikrofonu pro každý měřicí bod. Mikrofony pak není nutno při měření přemisťovat a nevzniká tak chyba v jejich umístění, která by se projevila ve zpoždění impulsové charakteristiky – chybné fázi fr. charakteristiky. Zkonstruoval jsem proto tedy 37 ks všesměrových mikrofonů s back-elektretovou kapslí Panasonic WM61A, což odpovídá úhlovému rozlišení 5° na polokruhu.



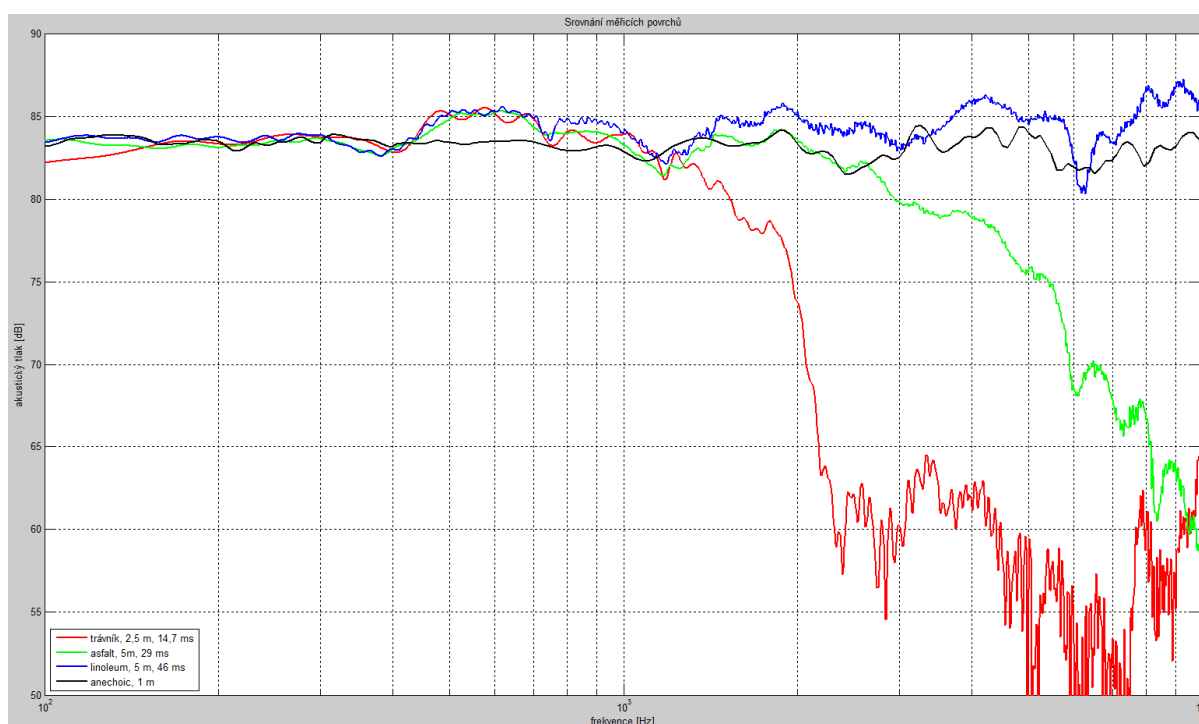
Obr. 25 Měřicí stanoviště včetně skutečného prvního odrazu difuzoru

Dále norma požaduje volnou bezodrazovou zónu o poloměru 12,5 m se středem v polovině mezi budící reprosoustavou a mikrofonom. Vzhledem k počtu kombinací umístění budících reprosoustav a mikrofonů - viz obrázek 25 - má celková bezodrazová zóna rozlohu přibližně 25x35 m. Zvolil jsem proto kompromis a operátora měření, včetně NTB, mikrofonního předzesilovače, přepínače mikrofonů a výkonového zesilovače umístil 5 m v bezodrazové zóně. Pro potlačení odrazu jsem před operátora umístil skelnou vatu Rotaflex 500x500x1000 mm, která potlačí odraz

min. o 20 dB již od 100 Hz. Od každého jednotlivého mikrofону vede koaxiální kabel RG-174/U k přepínači u operátora, který tak může rychle přepínat mezi měřicími body z jednoho místa. Celková délka kabeláže k mikrofonom se vyšplhala na 511 m. Pokud by měl být operátor v bezodrazové zóně, narostla by délka o dalších 185 m. Měřicí systém lze posoudit na fotografiích v přílohách 4 a 5. Seznam měřicího vybavení uvádí příloha 12.

Budící reprosoustava bude vždy posunuta do příslušné polohy. Nelze zde použít stejného principu jako u mikrofónů – tedy umístit na všechna požadovaná místa reprosoustavy a přepínat je z měřicího stanoviště, protože by svými rozměry zasahovaly do bezodrazové zóny sousedních budících reprosoustav. Pro jednotlivé směry buzení je z tohoto důvodu reprosoustavu nutné přenášet. Měření proto probíhala po jednotlivých úhlech buzení pro difuzor, reflektor i plochu vždy postupně.

Pro metodu hraniční roviny se vyžaduje odrazivost povrchu větší než 0,99. Proto byla provedena testovací měření na různých površích podle obrázku 26. Ukázalo se, že pro měření není v žádném případě vhodný trávník a dokonce ani hladký asfalt. Vzhledem k šíření ak. vlny podél roviny dochází vlivem porézности povrchu asfaltu k výraznému útlumu na vysokých kmitočtech. Jako vhodný povrch se ukázal asfalt překrytý linoleem ve sportovní hale v Roudnici nad Labem, který dává dobrou shodu s měřením budící reprosoustavy za anechoických podmínek. Toto místo měření bylo vybráno na základě dobrých zkušeností firmy Soning Praha, a.s., která je průkopníkem vývoje a měření difuzních prvků v ČR. Měření proto napodobuje stejný postup, aby bylo možné porovnávat s výsledky prezentovanými v Katalogu akustických prvků [14].



Obr. 26 Vliv povrchu na měření – přímá vlna z budící reprosoustavy VMA-III

Sportovní hala v Roudnici nad Labem má vnitřní čisté rozměry 48 m x 24 m x 10 m délka x šířka x výška. Tyto rozměry snižuje zejména vnitřní ocelová nosná konstrukce, která do prostoru částečně zasahuje. Hala proto nesplňuje zcela požadavek na rozměr bezodrazové zóny 12,5 m. Na fotografii 27 a v příloze 5 je vidět pověšená zelená, tenisová zástěna s řídkým vzorem – ta byla považována pro účely měření za akusticky transparentní. Do bezodrazové zóny zasahoval rovněž cca 30 mm vysoký okraj asfaltového koberce. Ten měl menší vliv na měření v blízkosti 0 a 180°.



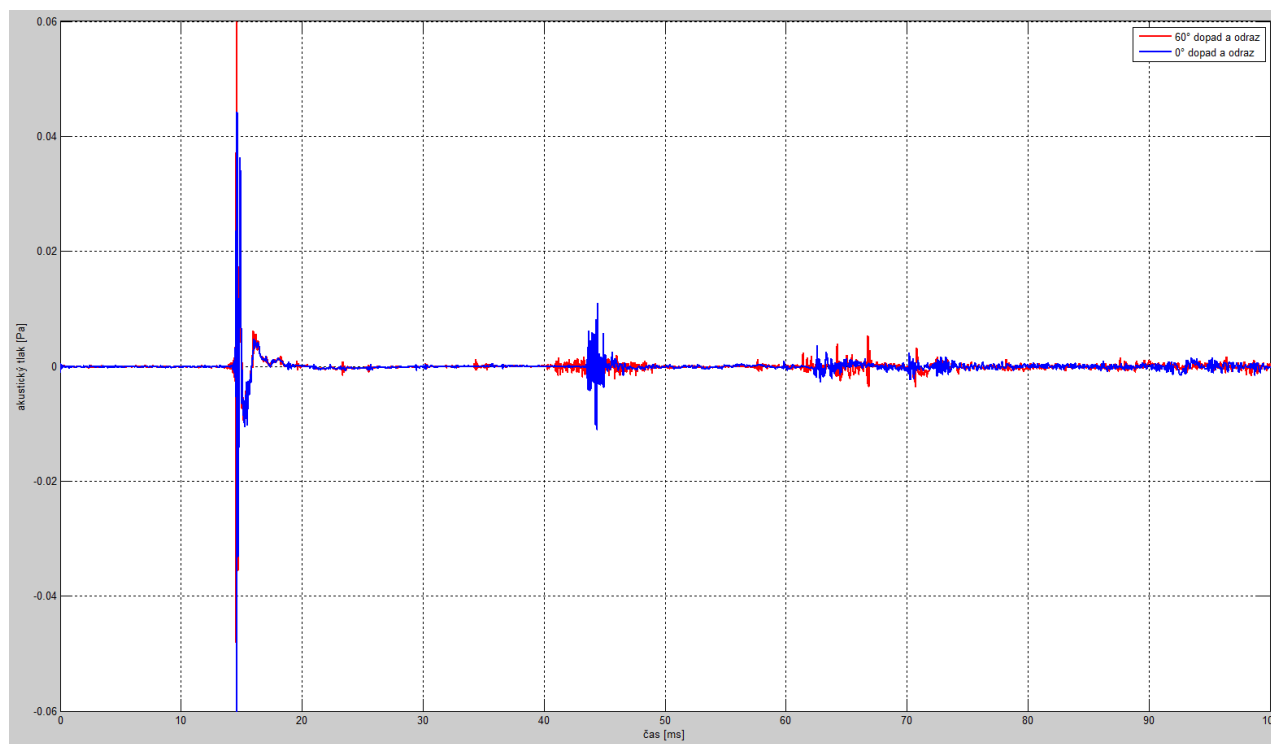
Obr. 27 Sportovní hala v Roudnici nad Labem s připravenou měřicí aparaturou

Pro účely výpočtů rozměrů váhovacího okénka byla odvozena aktuální rychlost zvuku podle času letu přímé vlny od reprosoustavy k mikrofonu jako 344 m/s. První představa rozměrů okénka vychází z bodové reprezentace měřicího systému podle obrázku 10. Ta by odpovídala začátku okna v čase 43,6 ms a délce okna 29 ms. Ve skutečnosti je nutné vycházet z fyzických rozměrů měřeného vzorku difuzoru a první nejkratší odražené vlny od jeho strany při buzení ve směru z 60°, jak uvádí obrázek 25. Odražená vlna místo 15 m urazí vzdálenost 13,729 m. Začátek váhovacího okénka by měl být proto umístěn v čase 40 ms. Vzhledem k menší velikosti bezodrazové zóny pak vychází délka okénka 14,5 ms. Podle doporučení normy proběhla ještě vizuální kontrola změřených impulsových charakteristik a ruční vyhodnocení začátků a délek váhovacího okénka pro vyvolené směry odražené vlny a buzení. Výsledky zjištění uvádí tabulka 2. Na základě experimentů při zpracování signálů jsem navýšil délku okénka na 20 ms, protože se vliv většiny odrazů podařilo odečíst dekonvolucí podle rovnice 28. Rozlišení FFT (Fast Fourier

Transform) se tedy zarovnávalo na bodech po 50 Hz. Vliv směru dopadu akustické vlny na její rozprostření v čase lze posoudit na obrázku 28.

Rozměry okna [ms]						
	difuzor - dopad 0°		záda - dopad 0°		difuzor - dopad 60°	
mikrofon	začátek	délka	začátek	délka	začátek	délka
0°	43,0	25,0	41,6	25,9	39,8	14,8
5°	42,6	24,0	42,7	22,0	39,5	15,0
25°	41,8	20,8	43,0	19,0	40,0	16,1
45°	42,6	15,7	42,3	19,0	40,4	19,0
70°	43,0	19,5	43,0	19,5	40,8	20,0
95°	43,5	18,7	43,0	19,0	42,0	23,0
125°	42,6	13,6	42,2	13,9	43,0	25,0
150°	41,9	19,5	41,9	19,5	43,5	24,0
170°	41,3	25,0	43,2	23,0	43,0	23,7
175°	41,6	26,0	43,0	25,0	43,0	23,5
180°	41,6	27,0	43,0	26,0	43,0	23,4

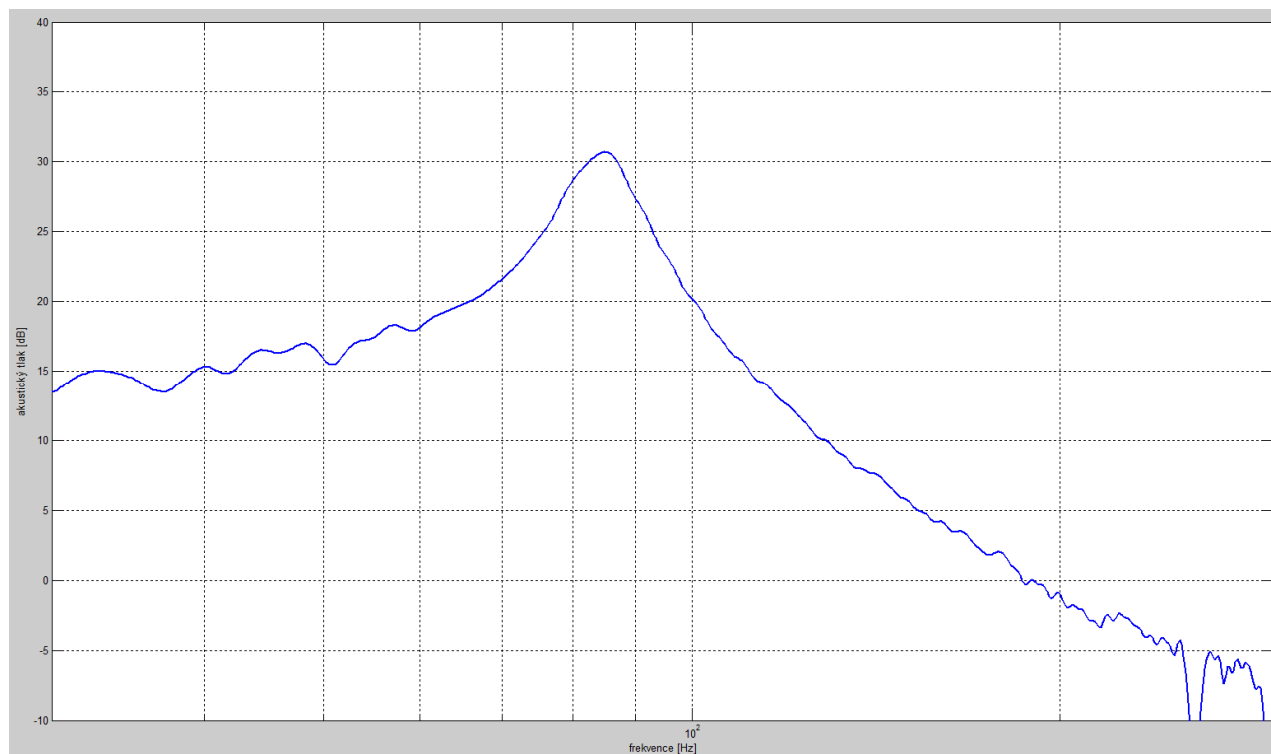
Tab. 2 Ručně zjištěné rozměry okna



Obr. 28 Ukázka prvních 100 ms z impulsových charakteristik pro směr dopadu 60° a 0°

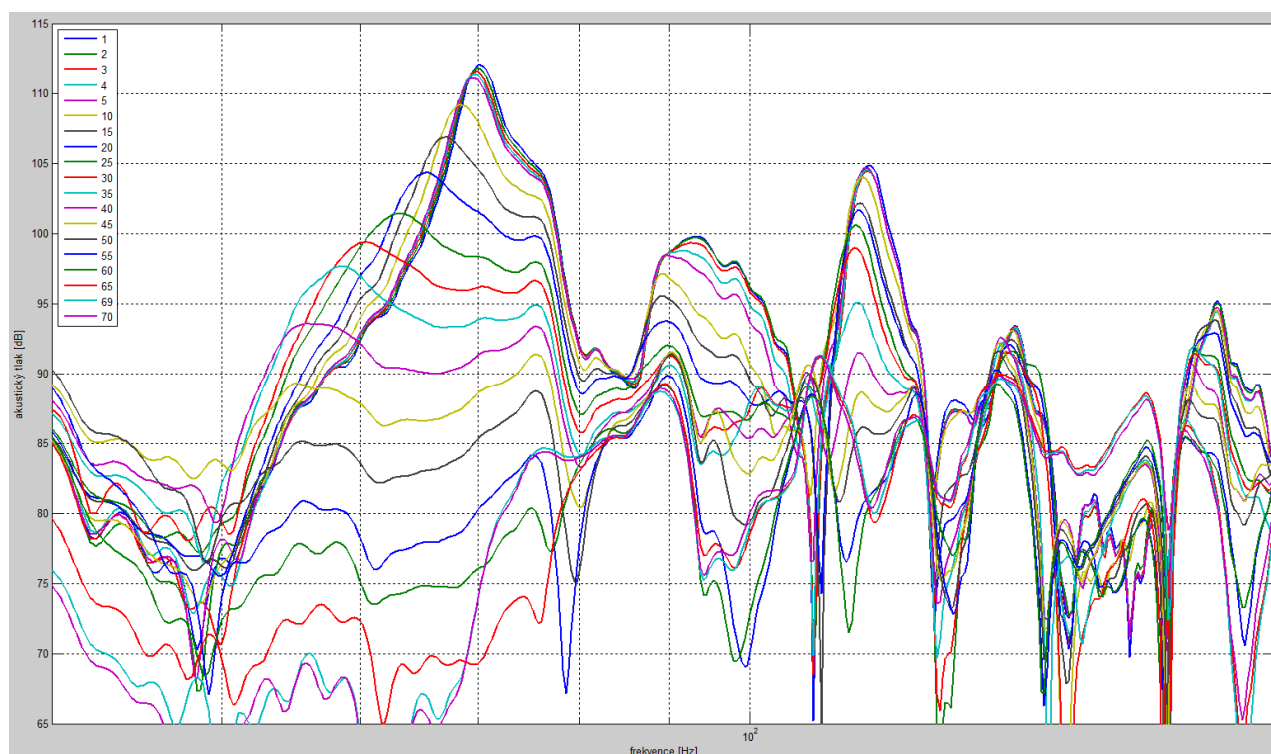
10 Výsledky měření

První měření probíhala na malém prototypu rezonátoru reprezentujícím jednu komoru difuzoru o průměrném objemu. Zde byl metodou měření tlaku uvnitř ověřen horní konec pásma přeladitelnosti na 85 Hz – obrázek 29.



Obr. 29 Jeden rezonátor o rozměrech 132x132x125 mm se štěrbinou 18x25 mm

Další měření probíhala na složeném difuzoru opět metodou měření tlaku uvnitř rezonátoru. Bohužel se nepodařilo dosáhnout dostatečné tuhosti zadní stěny, ani když byla přišroubována 6 ks šroubů rovnoměrně v ploše a 22 ks šroubů rovnoměrně po obvodu. Neurčité podmínky montáže aktuálně ovlivňují funkci rezonátoru a tento nelze zcela předvídatelně naladit na požadovanou frekvenci. Z tohoto důvodu není na obrázku 30 popsáno přesně přeladění ucpáváním jednotlivých štěrbin záslepkou. Dominuje zde pouze rezonance zadní stěny na 70 Hz, kterou lze snadno ověřit poklepem. Měření celého difuzoru bez ucpávek se neshoduje s měřením prototypu jedné komory. V dalších navazujících experimentech by bylo proto vhodné dále posílit tuhost konstrukce, aby se rezonance zadní stěny posunula směrem k vyšším kmitočtům a nevázala se na Helmholtzův rezonátor.

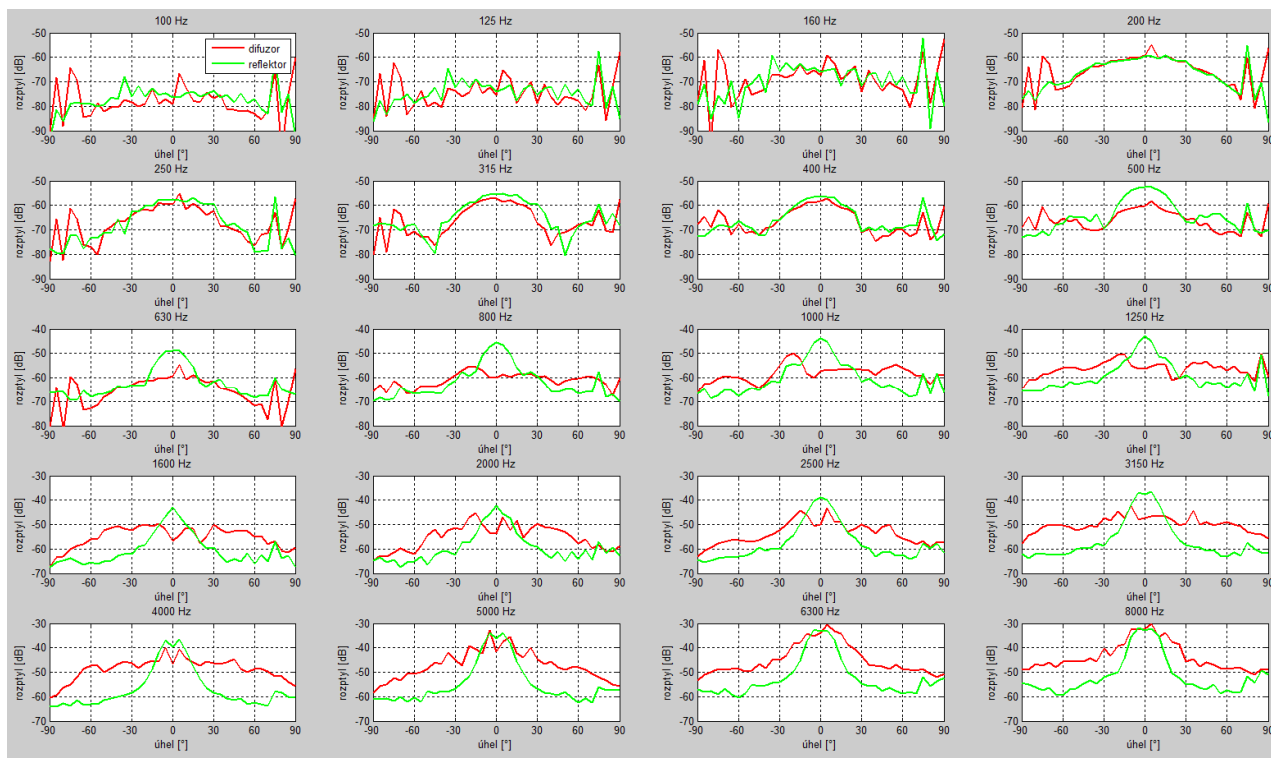


Obr. 30 Rezonátor přeladovaných ve společném objemu postupně 70 ks plastovými záslepkami

Poté jsem přistoupil k měření difuzity vysvětleném v kapitole 5 ve sportovní hale v Roudnici nad Labem. Bohužel vzhledem časové náročnosti jsem stihl změřit pouze budící směry 0° , 30° a 60° v jedné rovině, více se za den měření nedalo stihnout. Měření by výrazně urychlilo více osob zejména kvůli rozmístování měřicí aparatury nebo současné vícekanálové měření. Bohužel potřebný počet předzesilovačů, vícekanálová zvuková karta ani vhodný měřicí software nebyl k dispozici. Částka potřebná k jejich zakoupení přesahuje 60 000 Kč. Při zpracování jsem postupoval podle předpokladu, že se difuzor chová v ostatních směrech buzení podobně a odchylky od činitelů difuze a rozptylu nebudou větší než 10%. Výsledné činitele jsem pak průměroval s vahami 1, 6, 6.

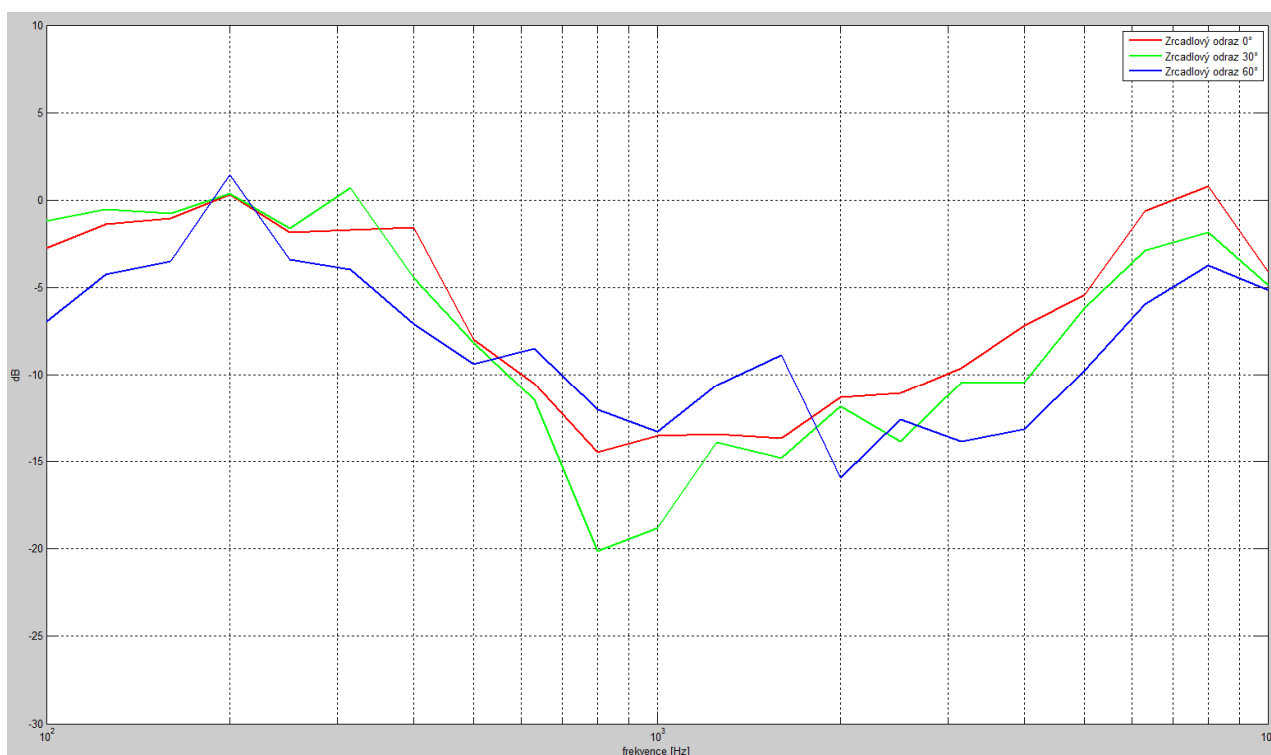
Celkově jsem za pomoci měřicího programu LSP LAB 3 získal 370 ks impulsových charakteristik délky $2^{17}-1$, které jsem exportoval do formátu TXT a dále zpracoval skriptem uvedeným v příloze 2 v prostřední Matlab a vykrelil zde i všechny grafy. Všechna zdrojová data o velikosti 1,4 GB naleznete na přiloženém DVD.

Při srovnání simulovaných charakteristik s měřením, je třeba vzít v úvahu rozdílné rozlišení. Simulace byla prováděna pro kolmý dopad s krokem 1° na polokouli, měření pro tři směry dopadající vlny s krokem 5° . Měření je tedy prostorově podvzorkováno a navíc ve frekvenci filtrováno do 1/3 okt. pásem.

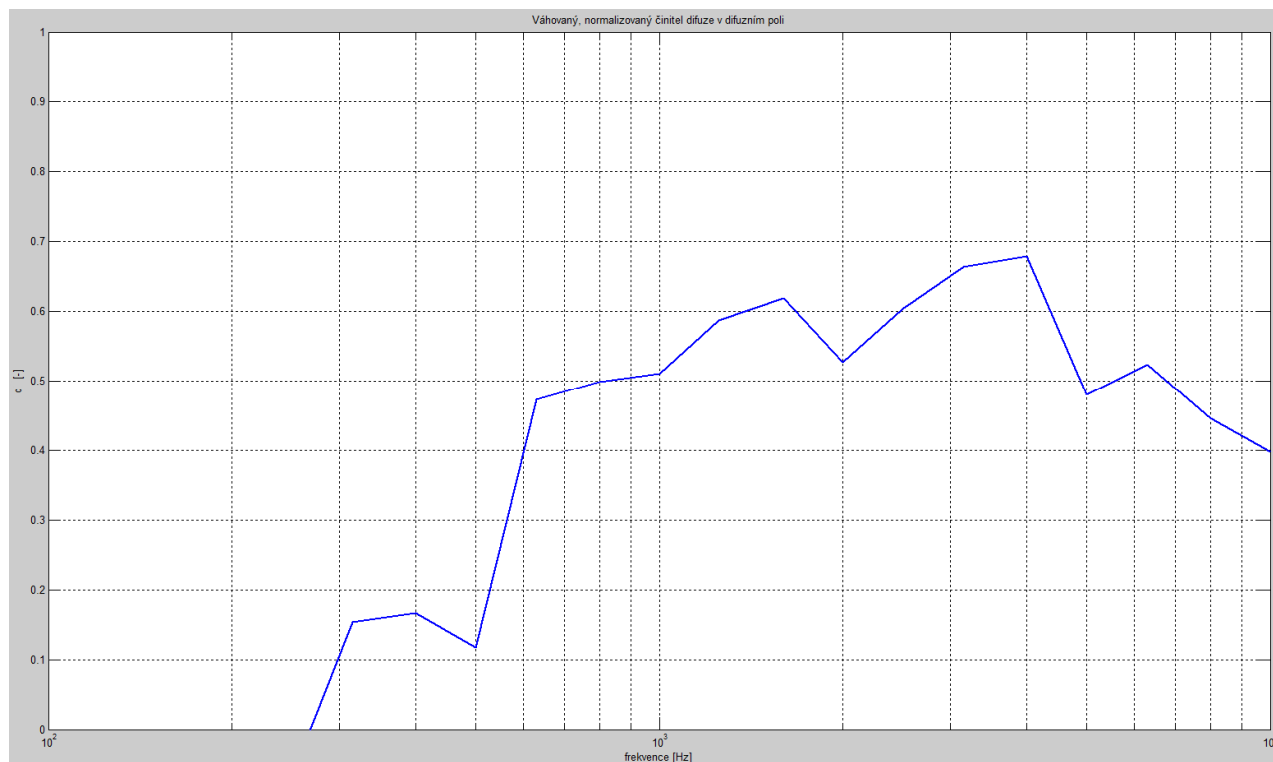


Obr. 31 Směrové charakteristiky ve 1/3 okt. pásmech

Obrázek 31 zobrazuje změřené směrové charakteristiky difuzoru a reflektoru pro kolmý dopad. Srovnání se simulací lze provést na obrázku 12. V polárních souřadnicích pak srovnává směrové charakteristiky příloha 6. Zrcadlový odraz na obrázku 32 je možné srovnat s obrázkem 13.

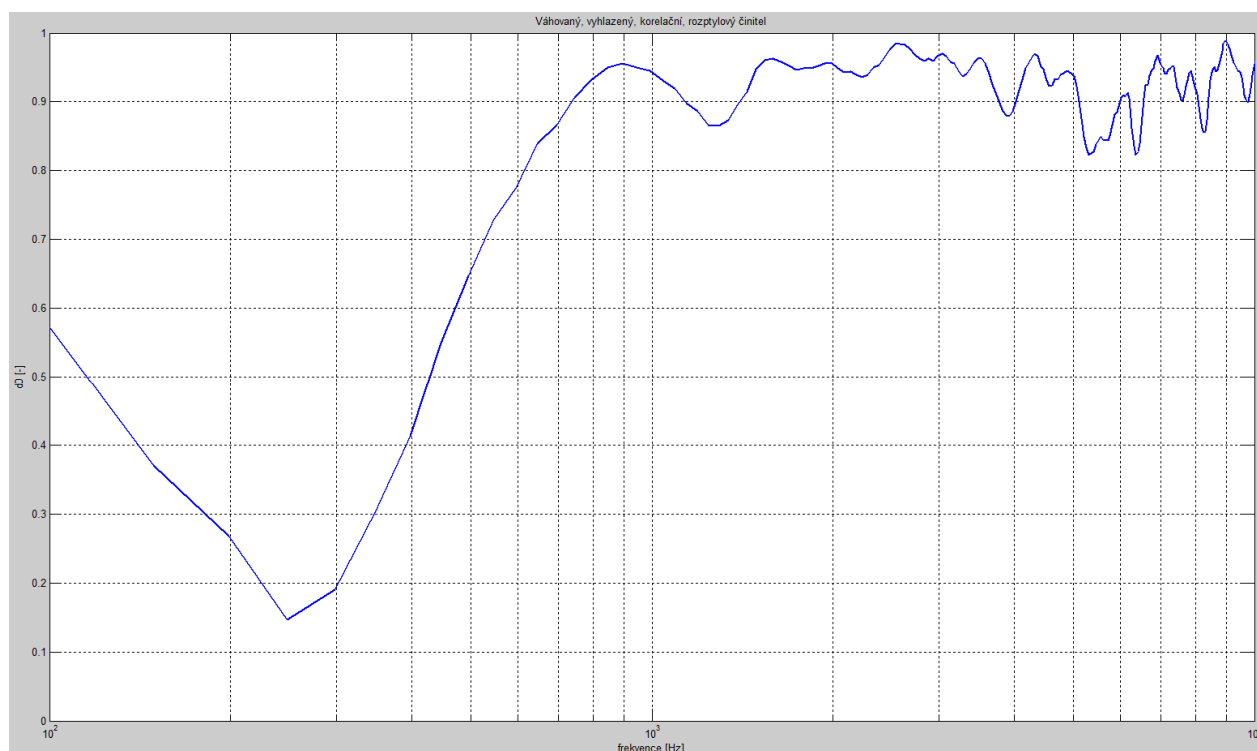


Obr. 32 Zrcadlový odraz ve 1/3 okt. pásmech



Obr. 33 Vážený normovaný čísel difuze v difuzním poli

Čísel difuze na obrázku 33 a rozptylový čísel na obrázku 34 je možno srovnat s obrázky 14 a 15. Změřená difuze dosahuje hodnot v průměru o 0,1 nižších než simulace, rozptylový čísel si v měření pohoršil o 0,05. Celkově lze z porovnání usoudit velmi dobrou shodu měření a simulace.



Obr. 34 Vážený vyhlazený korelační rozptylový čísel

11 Závěr

V této práci byly shrnuty možnosti rozptylu zvuku, následně byla zvolena nejlepší metoda a podle ní navrhnut difuzor dle zadání v pásmu od 1000Hz. Z důvodu rezervy a také zvýšené pohltivosti difuzoru na spodním konci pásma byla posunuta spodní frekvence návrhu na 800 Hz, tak aby od 1000 Hz difuzor pohlcovал minimálně. Volný prostor uvnitř difuzoru byl dále účinně využit k pohlcování nižších kmitočtů a tím pádem rozšíření pásma funkčnosti navrhovaného akustického prvku.

Bylo ukázáno několik variant takových rezonátorů na frekvencích 44, 150Hz a s proměnlivou frekvencí ladění. Vzhledem k široce proměnlivému objemu rezonátorů je pro dosažení vysokých hodnot pohltivosti nutné pečlivě optimalizovat průměr štěrbin. V případě volby konstantního průměru štěrbin, lze dosáhnout rozšíření pásma, za cenu snížení maximálního činitele pohltivosti, avšak plynule navazujícího na vlastní pohltivost difuzoru. Nejlepší nalezenou variantou bylo spojení rezonátorů do společného objemu a přeladění ucpáváním jednotlivých štěrbin záslěpkou.

Navrhnutý prvek byl dále zkonstruován spolu s rozsáhlým měřicím systémem a podroben měření. Po vyhodnocení naměřených dat se potvrdila kvalita a shoda a návrhem. Naměřená data na difuzoru jsou v souladu s normou ČSN ISO 17497-2 prezentována v přílohách 6 – 11.

Vzhledem k tomu, že běžné vybavení místnosti pohlcuje spíše na vyšších kmitočtech a pod cca 1 kHz doba dozvuku typicky mírně roste, není potřeba v místnosti používat žádných porézních absorbérů. Akustická úprava si vystačí s běžným vybavením místnosti, navrhnutými difuzory a zbylé potřebné úpravy obstarají selektivní Helmholtzovy rezonátory s laděním pod 200 Hz.

V práci by se dále mělo pokračovat s realizací více kusů difuzorů, opětovným měřením difuzity ve větší sestavě prvků a měřením pohltivosti vzorku o ploše 10m² v dozvukové komoře. Rovněž by mělo být provedeno detailnější měření vlastností navržené složky absorpčních rezonátorů ve volném poli metodou měření tlaku uvnitř rezonátoru. Nutná je úprava konstrukce rezonátoru vedoucí ke zvýšení tuhosti zadní stěny. Dále by bylo přínosné detailně popsat akustické pole místnosti bez difuzorů a s jejich postupnou zástavbou grafy izobar nebo animacemi šíření akustických vln od zdroje. Pro realizaci dalších měření by bylo vhodné zvýšit počet současně měřicích kanálů, což by umožnilo provést větší počet měření a otestovat více vzorků nebo jejich konfigurací.

Otevřené zůstávají otázky kvantifikace časového rozptylu dopadající vlny. Geometrické struktury mohou mít dobré vlastnosti pro kolmý dopad, ale horší pro všesměrový dopad a rozptyl v čase. Difuzor s dobrým rozptylem v časové oblasti pak zlepšuje difuznost pole v dané místnosti daleko více, když zahušťuje pole odražených vln. Rozptyl v prostoru i čase vytváří psychoakustický dojem větší místnosti.

12 Seznam použité literatury

- [1] COX, T.; D'ANTONIO, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers. 2. edition. New York: Taylor and Francis, 2009. 495 s. ISBN 0-203-89305-0
- [2] KOLMER, F.; KYNCL, J.: Prostorová akustika. Praha: SNTL, 1980. 244 s.
- [3] VAVERKA, J.; et. al.: Stavební fyzika 1: Urbanistická, stavební a prostorová akustika. Brno: Vutium, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6
- [4] DELANY, M.; BAZLEY, E. Acoustical properties of fibrous absorbent. Applied Acoustics, 3, 1970.
- [5] OLDFIELD, R.. Improved membrane absorbers - diplomová práce. Salford (Velká Británie). University of Salford. 2006. 194 s. Dostupný z WWW: < <http://www.acoustics.salford.ac.uk/profiles/oldfield/Thesis.pdf> >
- [6] EVEREST, A. F. Master handbook of acoustics. 4th ed. McGraw Hill, 2001. 615 s. ISBN 0071360972
- [7] PERRY T.: The lean optimization of acoustic diffusers: Design by artificial evolution, time domain simulation and fractals. Kanada. University of Victoria. 2011. 86 s.
- [8] WU, T.; COX, P.; LAM, Y.: Profiled structure with improved low frequency absorption. University of Salford: 2001.
- [9] ČSN ISO 17497-2: Akustika – Rozptylové vlastnosti povrchů – Část 2: Měření činitele směrové difuze ve volném poli. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2013.
- [10] HARGREAVES, J. T.: Acoustic Diffusion and Scattering Coefficients for Room Surfaces. Salford: University of Salford, 2000. 306 p.
- [11] D'ANTONIO, P.; RIFE B.: State-of-the-art in Determining the Absorption, Scattering and Diffusion Coefficients. 2012 Přednáška.
- [12] MÜLLER, S.; MASSARANI, P.: Transfer-Function Measurement with Sweeps. JAES Volume 49 Issue 6 pp. 443-471; June 2001. Dostupný z WWW: < <http://www.melaudia.net/zdoc/comparisonMeasure.PDF> >
- [13] Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci: číslo 178/2001, příloha 5, část C. Dostupný z WWW: < http://www.pravnipredpisy.cz/predpisy/ZAKONY/2001/178001/Sb_178001_-----_.php >
- [14] HRÁDEK, T.; TUČEK, J.: Katalog akustických prvků. Praha: Nakladatelství Akademie múzických umění v Praze, 2011. ISBN 978-80-7331-316-6

13 Přílohy

1. Matlab skript pro simulaci vlastností difuzoru kombinovaného s Helmholtzovými rezonátory – zkrácená verze bez vykreslení grafů – plnou verzi obsahuje přiložené DVD

```

clc;
close all;
clear all;
tic;

%%% matice subdifuzoru %%%
subdif01=[0 0 0 0 0;
          0 1 1 1 0;
          0 1 0 1 0;
          0 1 1 1 0;
          0 0 0 0 0]*0.022;
prd7x10=[19 143 30 85 187 189 126; %P71 root 7, 880-2500Hz, kvantizace 1mm,
d0.068
          104 135 25 16 11 137 156;
          121 145 162 173 115 77 181;
          99 66 44 159 41 27 148;
          63 107 71 113 140 93 192;
          176 52 165 110 8 5 69;
          91 60 170 178 184 58 38;
          74 49 33 22 80 118 14;
          96 129 151 36 154 167 47;
          132 88 124 82 55 102 3;]*0.001;

%%% zadání parametrů %%%
maximum=max(max(prd7x10)); % maximální hloubka studny
inverze=maximum-prd7x10; % inverzní panel pro modulaci v poli panelů
sekvence=prd7x10; % výběr matice panelu
c=344; % rychlost zvuku [m/s]
d=0.132; % příčný rozměr studny [m]
n=1; % počet simulačních bodů n*n na studnu, se subdifuzorem nutno nechat na
1 [ks]
vzdálenost=5; % vzdálenost mikrofону od 0 bodu uprostřed panelu [m]
f=logspace(1,4,100)'; % zadávaný rozsah frekvencí v logaritmickém rozdělení -
omezení na min 12 ks

%%% výpočet helmholzů %%%
rho = 1.21; % hustota vzduchu
Z0 = c*rho; % charakteristická impedance vzduchu
w = 2*pi*f; % úhlová frekvence
k = w/c; % vlnové číslo

hloubky=reshape (prd7x10,1,70);

prumery44Hz=[0.003 0.007 0.007 0.006 0.005 0.009 0.006 0.006 0.007 0.008 0.008
0.008 0.008 0.005 0.007 0.005 0.005 0.005 0.008 0.006 0.004 0.003 0.009 0.004
0.006 0.009 0.009 0.004 0.008 0.008 0.006 0.003 0.009 0.009 0.007 0.007 0.009
0.003 0.004 0.006 0.009 0.002 0.008 0.004 0.008 0.002 0.009 0.006 0.009 0.005
0.009 0.008 0.006 0.003 0.006 0.0015 0.005 0.007 0.009 0.007 0.007 0.008 0.009
0.008 0.009 0.005 0.004 0.002 0.005 0.001]; % buď na 150Hz +-5Hz nebo na 44 Hz
+-3Hz
prumery150hz=[0.01 0.03 0.032 0.029 0.021 0.043 0.027 0.024 0.028 0.035 0.037
0.035 0.037 0.022 0.030 0.019 0.021 0.018 0.034 0.026 0.014 0.012 0.040 0.017
0.023 0.041 0.042 0.014 0.038 0.033 0.026 0.009 0.042 0.040 0.031 0.031 0.043
0.011 0.015 0.025 0.045 0.008 0.032 0.016 0.036 0.006 0.044 0.025 0.039 0.020

```

```

0.045 0.036 0.024 0.013 0.028 0.005 0.020 0.032 0.041 0.029 0.034 0.039 0.044
0.038 0.045 0.023 0.016 0.009 0.018 0.004]; %+-5Hz

a = (((0.132)^2/pi)^0.5); % průměr desky
SD = pi*(a^2);

sigma = 10200; % Odpor protékání vzduchu absorpčním
materiálem
X = rho*f/sigma;
Z2 = rho*c*(1+0.0571*(X.^-0.754)-j*0.087*(X.^-0.732));
k2 = (2*pi/c).*f.*(1+0.0978*(X.^-0.700)-j*0.189*(X.^-0.595));
d2 = 0.01;
zs2 = -j*rho*c.*cot(k2*d2); % Delany a Bazley predikce porézního
materiálu

% rezonátor
RAF1 = (rho*c.*(k.^2))./(2*pi); % Vyzařovací odpor
MAF1 = j*w.*(8*rho)/(3*(pi^2)*a)); % Vyzařovací hmotnost
prumer1=0.018; % průměr díry helmholtze
pocet1=1/6; % počet kusů děr
delka1=0.025; % delka díry 1
hloubka1=mean(hloubky); % hloubka vzduchového polštáře 1
RAB = zs2; % Přibližné ztráty v ozvučnici
RAT = RAB+RAF1; % Celkové ztráty v akustických jednotkách
ZAF = Z0/SD;
CAB1 = hloubka1*SD/(rho*(c^2)); % Poddajnost ozvučnice v
akustických jednotkách
CAT1 = 1./(w.*CAB1); % Celková poddajnost v akustických
jednotkách
MMS1 = (rho*(delka1+1.7*(prumer1*0.5)))/(pi*(prumer1*0.5)^2*pocet1);
% Hmotnost desky s částí závěsu ,kg
MAD1 = (w.*MMS1); % Celková hmotnost v akustických jednotkách
Z = SD*(RAT + ZAF + MAF1 + (1i.*MAD1 + 1/1i.*CAT1)); % Celková
povrchová impedance systému
R = (Z-Z0)./(Z+Z0); % Komplexní koeficient odrazu systému
alfa_helm = 1-R.*conj(R); % Absorpční koeficient

%%% výpočty difuzoru %%%
cekani = waitbar(0,'Inicializace...','Name','Probíhá
výpočet','CreateCancelBtn','setappdata(gcf,'Storno',1)');
kvantizace=unique(sekvence);
f_pocet=max(size(f));
[a,b] = size(sekvence);
fraktal=repmat(subdif01,a*n,b*n);
n=n*sub_a;

sekvence2=ones(a*n,b*n); % výroba rozšířené matice pro větší přesnost výpočtu -
n*n bodů na studnu
for r=1:a
    for t=1:b
        for u=1:n
            for o=1:n
                sekvence2(n*(r-1)+u,n*(t-1)+o)=sekvence(r,t);
            end
        end
    end
end
sekvence2=sekvence2-fraktal; % přičtení subdifuzoru2 do každé studny velkého
difuzoru

[x,y]=meshgrid(1:b*n,1:a*n); % výroba souřadnic X a Y
x=(x-b*n/2-0.5)*d)/n;

```

```

y=( (y-a*n/2-0.5)*d)/n;

komplex_total=zeros(f_pocet,181,181); % prealokace matic
komplex_total2=zeros(f_pocet,181,181);
dilek=pi*vzdalenost/180;
pocet_bodu=0;

%%% jádro výpočtu %%%
vert=0:180;
uhel=-90:90;
frek=1:f_pocet;
for vert=0:180
    oblouk=pi*vzdalenost*sin((vert/180)*pi);
    pocet_dilku=round(oblouk/dilek);
    dil=oblouk/pocet_dilku;
    uhel_cast=(dil/oblouk)*180;
    fi=1; % číslování úhlu fi v horizontálním směru
for uhel=-90:uhel_cast:90
    if getappdata(cekani,'Storno')
        break
    end
    if pocet_dilku==0 || pocet_dilku==1
        uhel2=0;
    else
        uhel2=uhel;
    end
    pozor=[oblouk*sin((uhel2/180)*pi) vzdalenost*cos((vert/180)*pi)
    oblouk*cos((uhel2/180)*pi)]; % X Y Z složky pozorovatele od 0, X do prava, Y
    nahoru, Z dopředu
    pruvodic=((pozor(1)-x).^2 + (pozor(2)-y).^2 + (pozor(3)).^2).^0.5; %
    vzdálenost pozorovatele a příslušné krychličky
    for frek=1:f_pocet
        komplex=(1./pruvodic).*exp(-1i.*((pruvodic+2*(maximum-
    sekvence2))*2*pi*f(frek)/c)); %komplexní rovnice pro kulovou vlnu bez času
        komplex2=(1./pruvodic).*exp(-1i*(pruvodic*2*pi*f(frek)/c)); % komplexní
    rovnice pro odraz od rovinné plochy
        komplex_total(frek,fi,vert+1)=sum(sum(komplex));
        komplex_total2(frek,fi,vert+1)=sum(sum(komplex2));
    end
    procenta=(pocet_bodu/20809);
    waitbar(procenta,cekani,[num2str(procenta*100,3) ' %'])
    fi=fi+1;
    pocet_bodu=pocet_bodu+1;
end
end
% logaritmování
vystup=20*log10((abs(komplex_total)/(a*b*n*n))/0.00002);
vystup2=20*log10((abs(komplex_total2)/(a*b*n*n))/0.00002);
% correlation scattering coefficient
scattering=1-
((abs(sum(sum(komplex_total.*conj(komplex_total2),3),2))).^2)/(sum(sum((abs(ko
mplex_total)).^2,3),2)).*sum(sum((abs(komplex_total2)).^2,3),2));
% autocorrelation diffusion coefficient
difuze=((sum(sum(10.^(vystup/20),3),2)).^2-
sum(sum((10.^(vystup/20)).^2,3),2))./(pocet_bodu-
1)*sum(sum((10.^(vystup/20)).^2,3),2));
difuze2=((sum(sum(10.^(vystup2/20),3),2)).^2-
sum(sum((10.^(vystup2/20)).^2,3),2))./(pocet_bodu-
1)*sum(sum((10.^(vystup2/20)).^2,3),2));
% normalizace proti reflektoru
difuze_normal=(difuze-difuze2)/(1-difuze2);
% alfa - pohltivost - záporná čísla odpovídají zisku - zvýšení dozvuku

```

```

alfa=1-
((sum(sum(abs(komplex_total),3),2)).^2)./((sum(sum(abs(komplex_total2),3),2)).^
2);
disp(['čas výpočtu ' num2str(toc,4) ' s']);

```

2. Matlab skript pro zpracování naměřených impulsních charakteristik – zkrácená verze bez vykreslení grafů – plnou verzi obsahuje přiložené DVD

```

close all;
clear all;
clc;

tretinooktava=[100,125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500
,3150,4000,5000,6300,8000,10000];
fs=44100; %Hz
sekvence=2^17-1; %2^17-1=131071
cas=linspace(0,(sekvence*1000)/fs,sekvence); % v ms
zacatek=0; % snímací úhel od prava do leva
krok=5; % krok úhlu 5°=37 měření
konec=180; % koncový úhel
teplota=21; % ve stupních Celsia
vzdalenost=5; % poloměr mikrofonního oblouku a polovina vzdálenosti zdroje
c=331.82+0.61*teplota; % rychlost zvuku dle wiki

pozadi=zeros(sekvence,konec/krok+1,3); % generování prázdných matic, třetí
dimenze pro tři úhly budící bedny
difuzor=zeros(sekvence,konec/krok+1,3);
zada=zeros(sekvence,konec/krok+1,3);
bedna=zeros(sekvence,konec/krok+1); % bedna je pouze jednou
for u=0:2 % pro tři úhly budící bedny
for i=0:konec/krok % načtení dat z exportovaných impulsek do txt
cesta_pozadi=[num2str(u*30),'_volt\bez_difuzoru\'',num2str(i),'.txt'];

cesta_difuzor=[num2str(u*30),'_volt\difuzor_na_zemi_na_delku\'',num2str(i),'.txt
'];

cesta_zada=[num2str(u*30),'_volt\zada_na_zemi_na_delku\'',num2str(i),'.txt'];
pozadi(:,i+1,u+1)=dlmread(cesta_pozadi,'',1,1);
difuzor(:,i+1,u+1)=dlmread(cesta_difuzor,'',1,1);
zada(:,i+1,u+1)=dlmread(cesta_zada,'',1,1);
if u==0
cesta_bedna=['_bedna_volt\'',num2str(i),'.txt'];
bedna(:,i+1)=dlmread(cesta_bedna,'',1,1);
end
end
end

offset=floor((vzdalenost/c)*fs); % číslo vzorku odpovídající vzdálenosti
start=floor(0.0399*fs); % číslo vzorku začátku okna
stop=floor(0.06003*fs); % číslo vzorku konce okna
delka=stop-start; % délka okna ve vzorcích - pozor aby byla sudá
frekvence=((fs/delka)*(1:delka/2)); % frekvenční osa fs a délky okna

difuzor_rodzil=difuzor-pozadi; % rozdíl impulsky s difuzorem minus impulsky
změřené bez difuzoru (pozadí)
zada_rodzil=zada-pozadi; % to samé pro difuzor obrácený zády
difuzor_podil=zeros(delka+1,konec/krok+1,3); % generování prázdných matic,
třetí dimenze pro tři úhly budící bedny
zada_podil=zeros(delka+1,konec/krok+1,3);
for u=1:3 % pro tři úhly budící bedny

```

```

difuzor_podil(:, :, u) = fft(difuzor_rozdil(start:stop, :, u)) ./ fft(bedna(offset:offset+delka, :)); % podíl furierky rozdílu vzorku a pozadí s furierkou bedny
zada_podil(:, :, u) = fft(zada_rozdil(start:stop, :, u)) ./ fft(bedna(offset:offset+delka, :)); % to samé pro záda
end
difuzor_imp = ifft(difuzor_podil); % impulsky
zada_imp = ifft(zada_podil);
difuzor_podil_db = 20*log10(abs(difuzor_podil(1:delka/2, :, :))); % v relativních dB
zada_podil_db = 20*log10(abs(zada_podil(1:delka/2, :, :))); % to samé pro záda

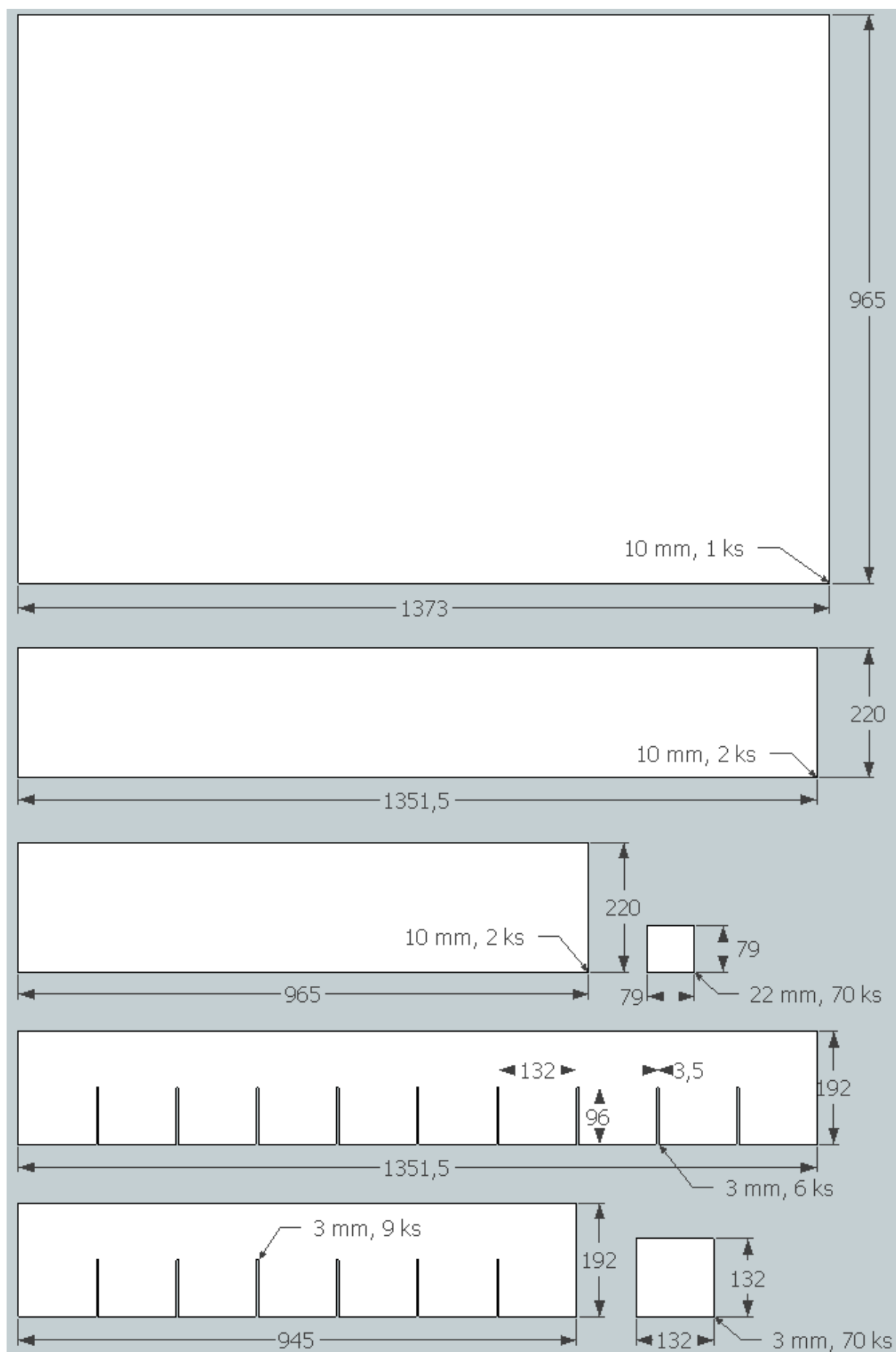
difuzor_difuze = zeros(3, delka/2);
zada_difuze = zeros(3, delka/2);
difuze_normal = zeros(3, delka/2);
scattering = zeros(3, delka+1);
for u = 1:3
difuzor_difuze(u, :) = ((sum(10.^(difuzor_podil_db(:, :, u)'/10))) .^2 - sum((10.^(difuzor_podil_db(:, :, u)'/10)).^2)) ./ ((konec/krok)*sum((10.^(difuzor_podil_db(:, :, u)'/10)).^2))); % difuze difuzoru
zada_difuze(u, :) = ((sum(10.^(zada_podil_db(:, :, u)'/10))) .^2 - sum((10.^(zada_podil_db(:, :, u)'/10)).^2)) ./ ((konec/krok)*sum((10.^(zada_podil_db(:, :, u)'/10)).^2))); % difuze odrazivých zad
difuze_normal(u, :) = (difuzor_difuze(u, :) - zada_difuze(u, :)) ./ (1 - zada_difuze(u, :)); % normalizování difuze difuzoru proti odrazivým zádům
scattering(u, :) = 1 - ((abs(sum(difuzor_podil(:, :, u)' .* conj(zada_podil(:, :, u)')))).^2) ./ (sum((abs(difuzor_podil(:, :, u)'))).^2) .* sum((abs(zada_podil(:, :, u)'))).^2));
end
difuze_normal_vaha = (difuze_normal(1, :) + 6*difuze_normal(2, :) + 6*difuze_normal(3, :)) / 13;
difuze_normal_vaha_smoothed = smooth(difuze_normal_vaha); % vyhlazení grafu
scattering_vaha = (scattering(1, :) + 6*scattering(2, :) + 6*scattering(3, :)) / 13;
scattering_vaha_smoothed = smooth(scattering_vaha); % vyhlazení grafu

% filtrování do třetinooktávních pásem
difuzor_imp_treti = zeros(delka+1, konec/krok+1, 3, max(size(tretinooktava)));
zada_imp_treti = zeros(delka+1, konec/krok+1, 3, max(size(tretinooktava)));
for i = 1:max(size(tretinooktava))
[B, A] = oct3dsgn(tretinooktava(i), fs);
difuzor_imp_treti(:, :, :, i) = filter(B, A, difuzor_imp);
zada_imp_treti(:, :, :, i) = filter(B, A, zada_imp);
end
difuzor_treti = 20*log10(squeeze(mean(abs(fft(difuzor_imp_treti))))));
zada_treti = 20*log10(squeeze(mean(abs(fft(zada_imp_treti))))));

difuzor_difuze_treti = zeros(3, max(size(tretinooktava)));
zada_difuze_treti = zeros(3, max(size(tretinooktava)));
difuze_normal_treti = zeros(3, max(size(tretinooktava)));
for u = 1:3
difuzor_difuze_treti(u, :) = (((sum(10.^(squeeze(difuzor_treti(:, u, :))/10))) .^2 - sum((10.^(squeeze(difuzor_treti(:, u, :))/10)).^2)) ./ ((konec/krok)*sum((10.^(squeeze(difuzor_treti(:, u, :))/10)).^2))))'; % difuze difuzoru
zada_difuze_treti(u, :) = ((sum(10.^(squeeze(zada_treti(:, u, :))/10))) .^2 - sum((10.^(squeeze(zada_treti(:, u, :))/10)).^2)) ./ ((konec/krok)*sum((10.^(squeeze(zada_treti(:, u, :))/10)).^2))); % difuze odrazivých zad
difuze_normal_treti(u, :) = (difuzor_difuze_treti(u, :) - zada_difuze_treti(u, :)) ./ (1 - zada_difuze_treti(u, :)); % normalizování difuze difuzoru proti odrazivým zádům
end
difuze_normal_vaha_treti = (difuze_normal_treti(1, :) + 6*difuze_normal_treti(2, :) + 6*difuze_normal_treti(3, :)) / 13;

```

3. Nářezový plán difuzoru

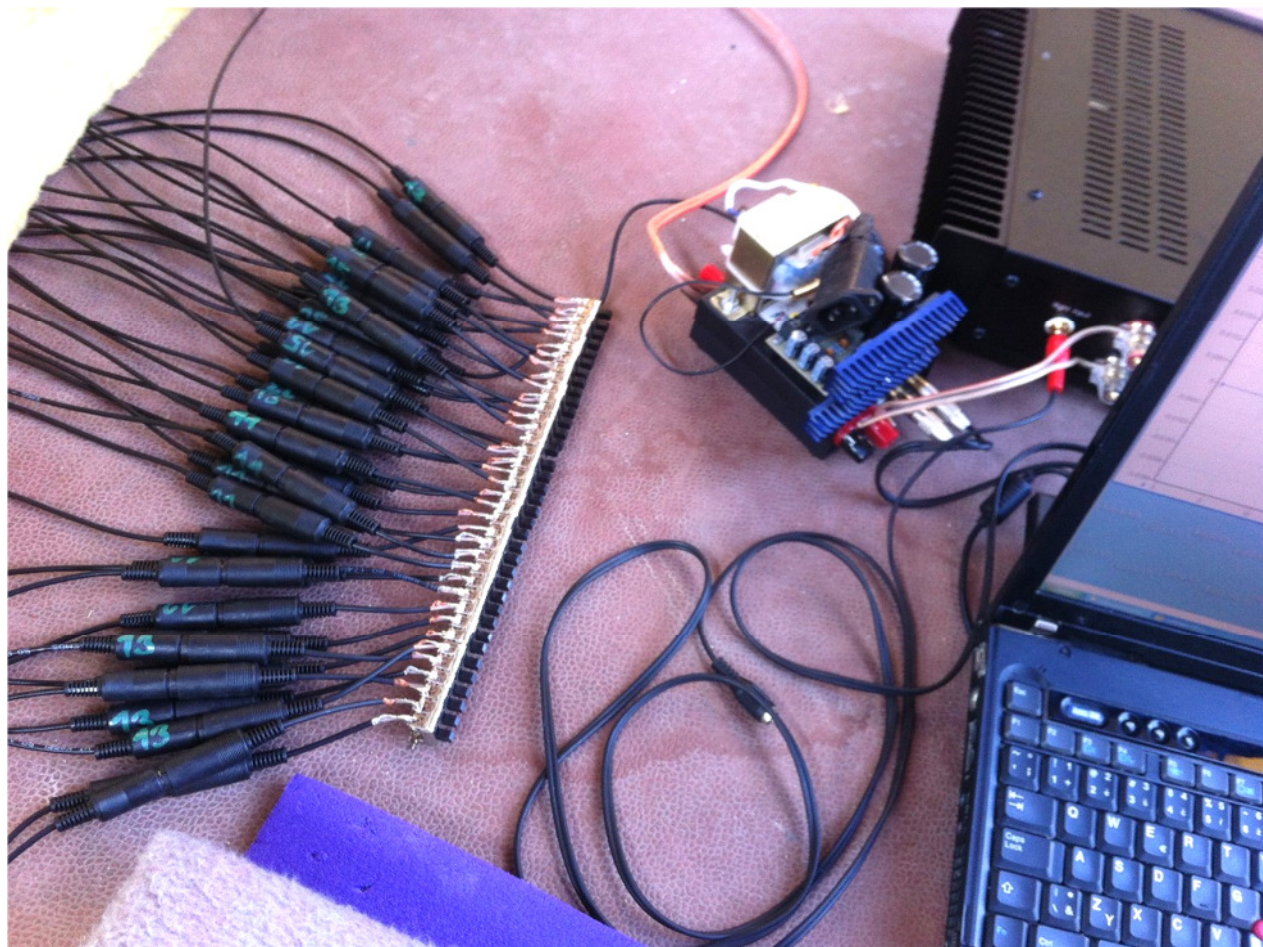


4. Fotografie měřicího systému



5. Provedení měření ve sportovní hale v Roudnici nad Labem

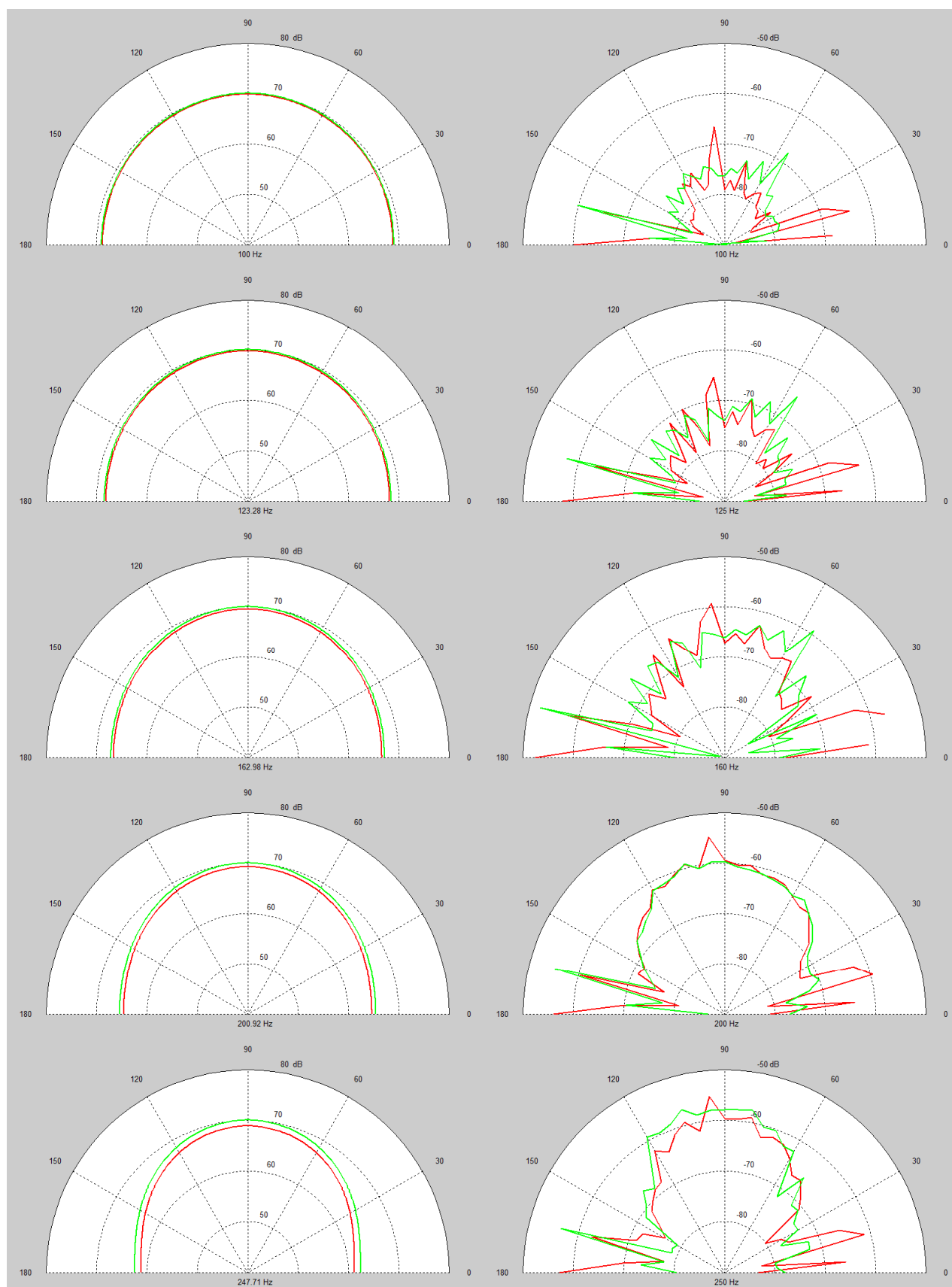


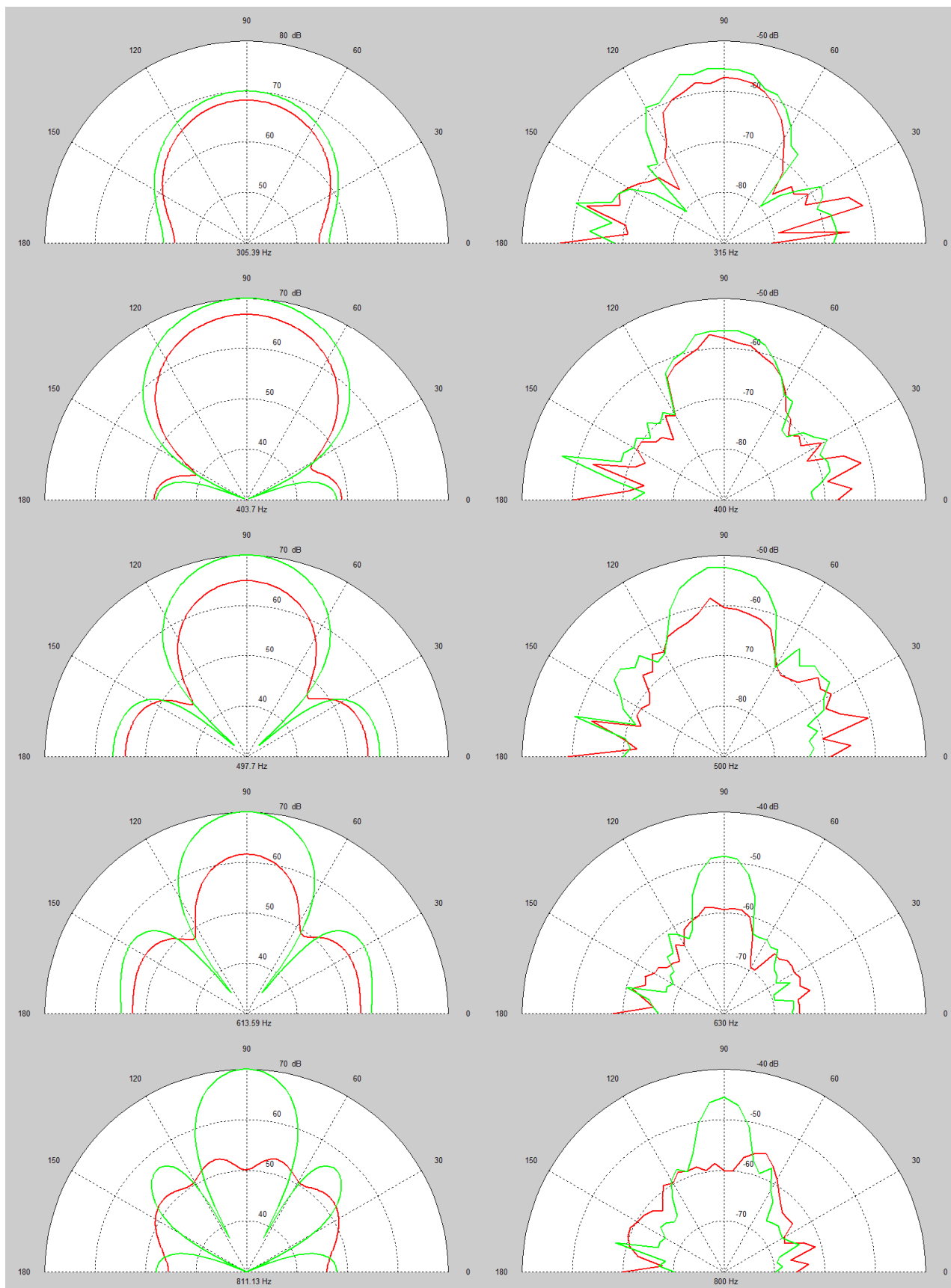


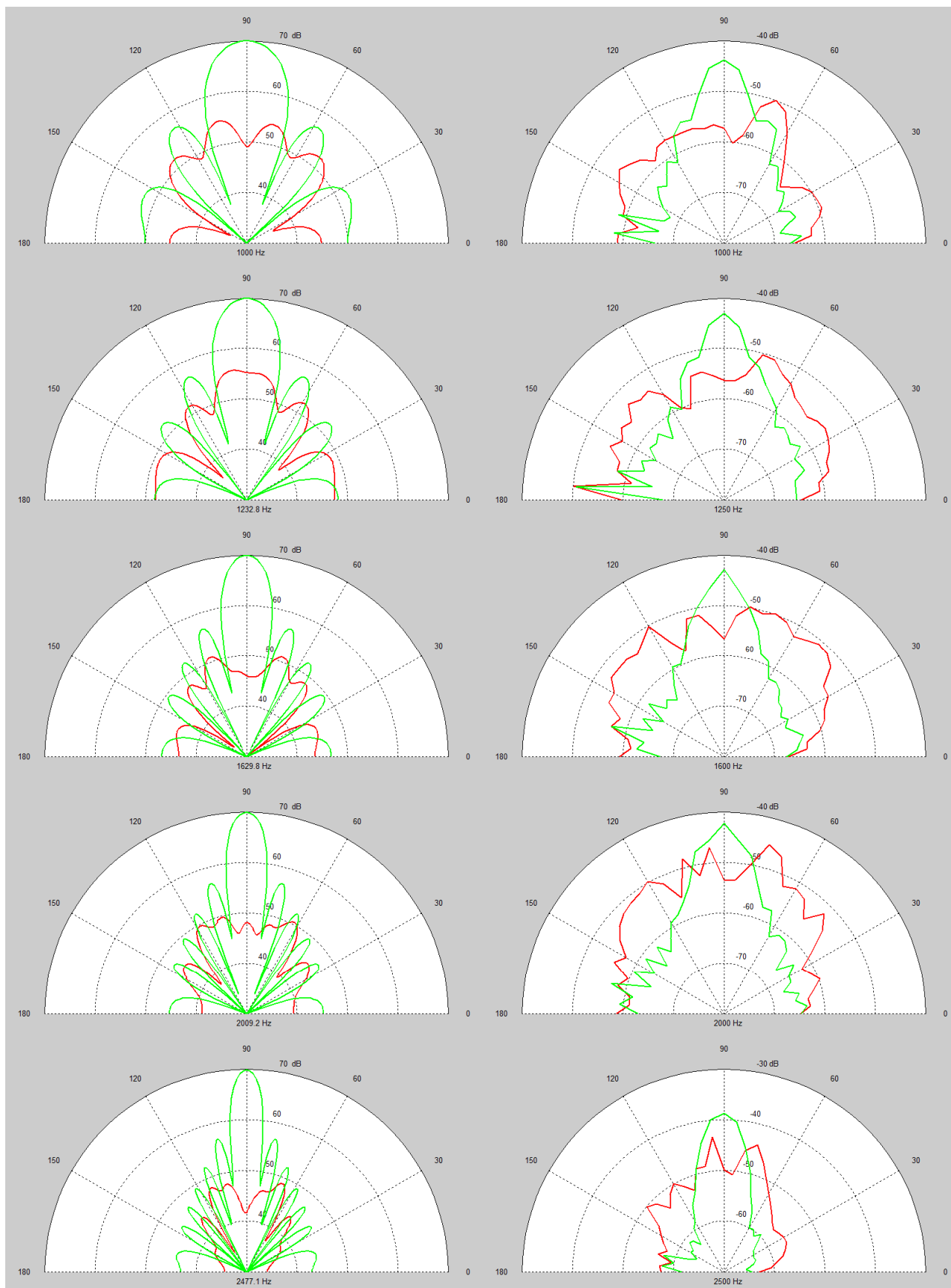


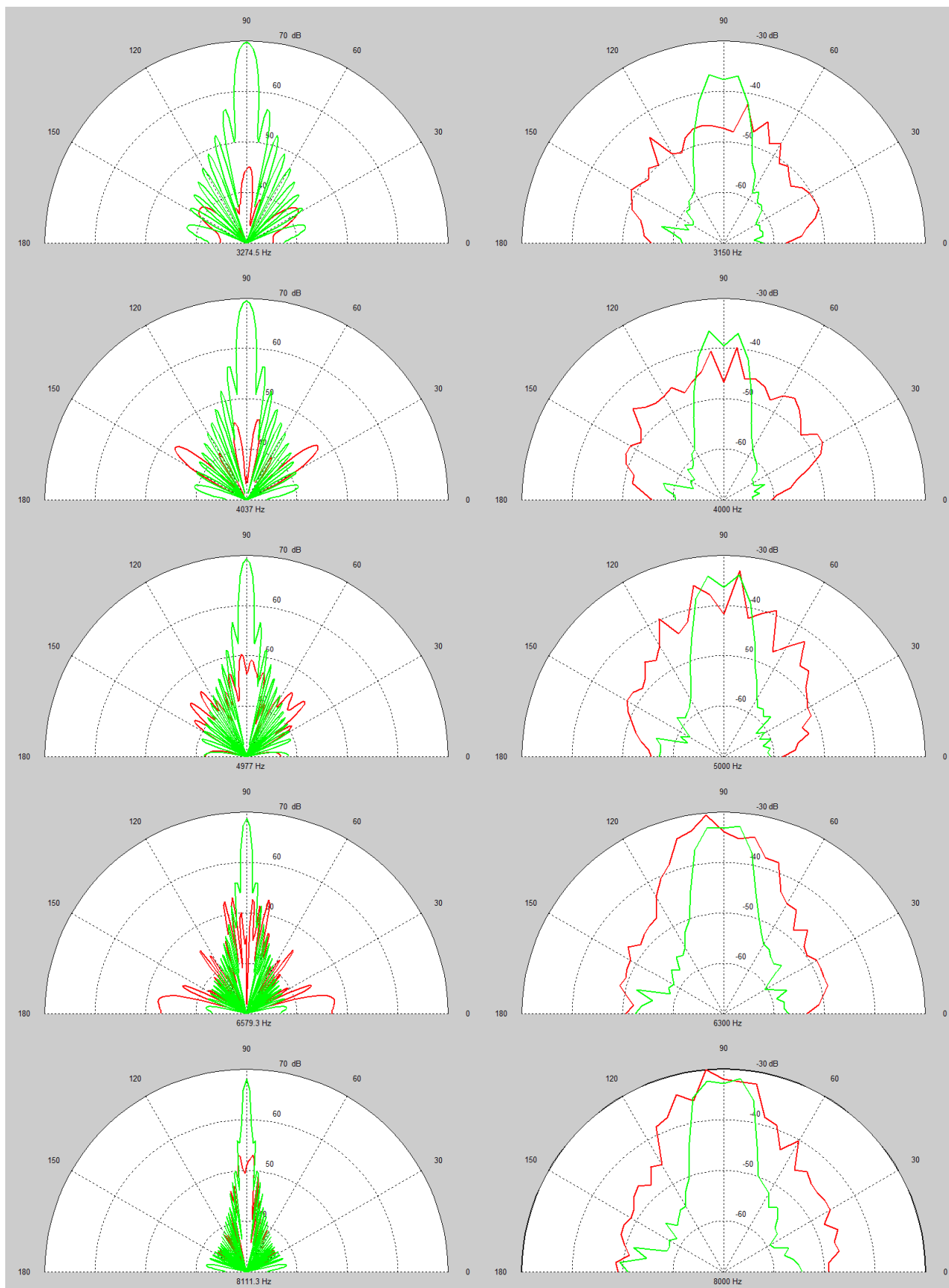


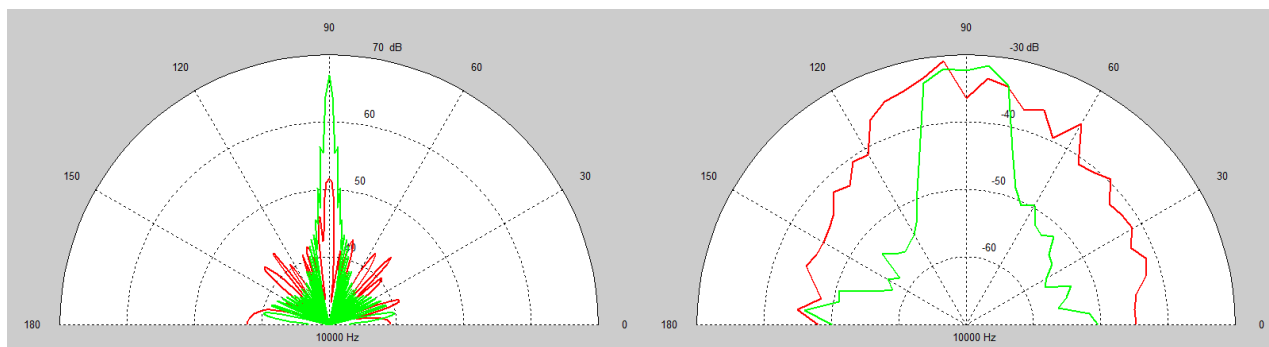
6. Polární charakteristiky pro kolmý dopad ze simulace (vlevo) a z měření (vpravo)











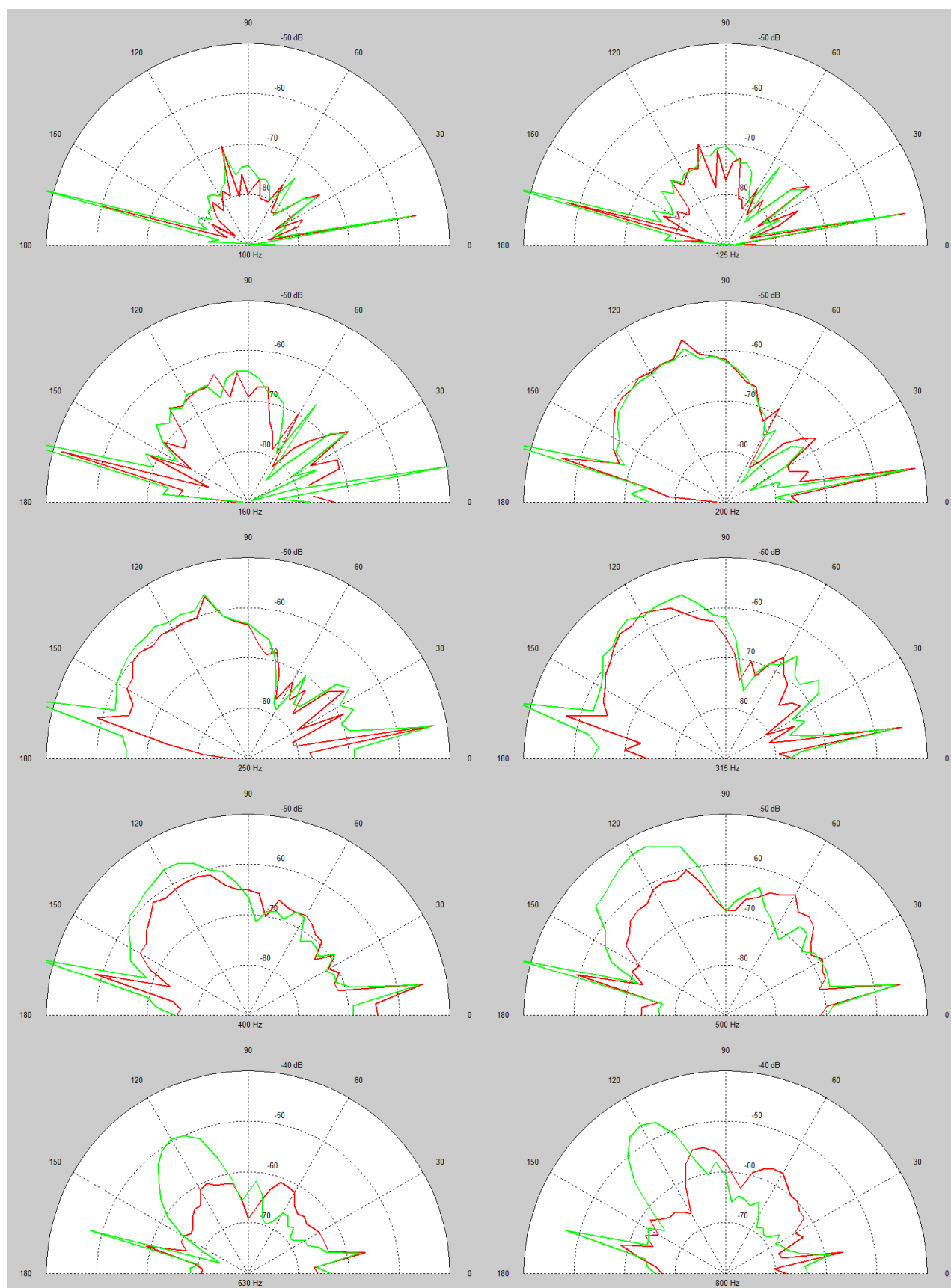
7. Tabulka dat polárních grafů pro kolmý dopad na difuzor

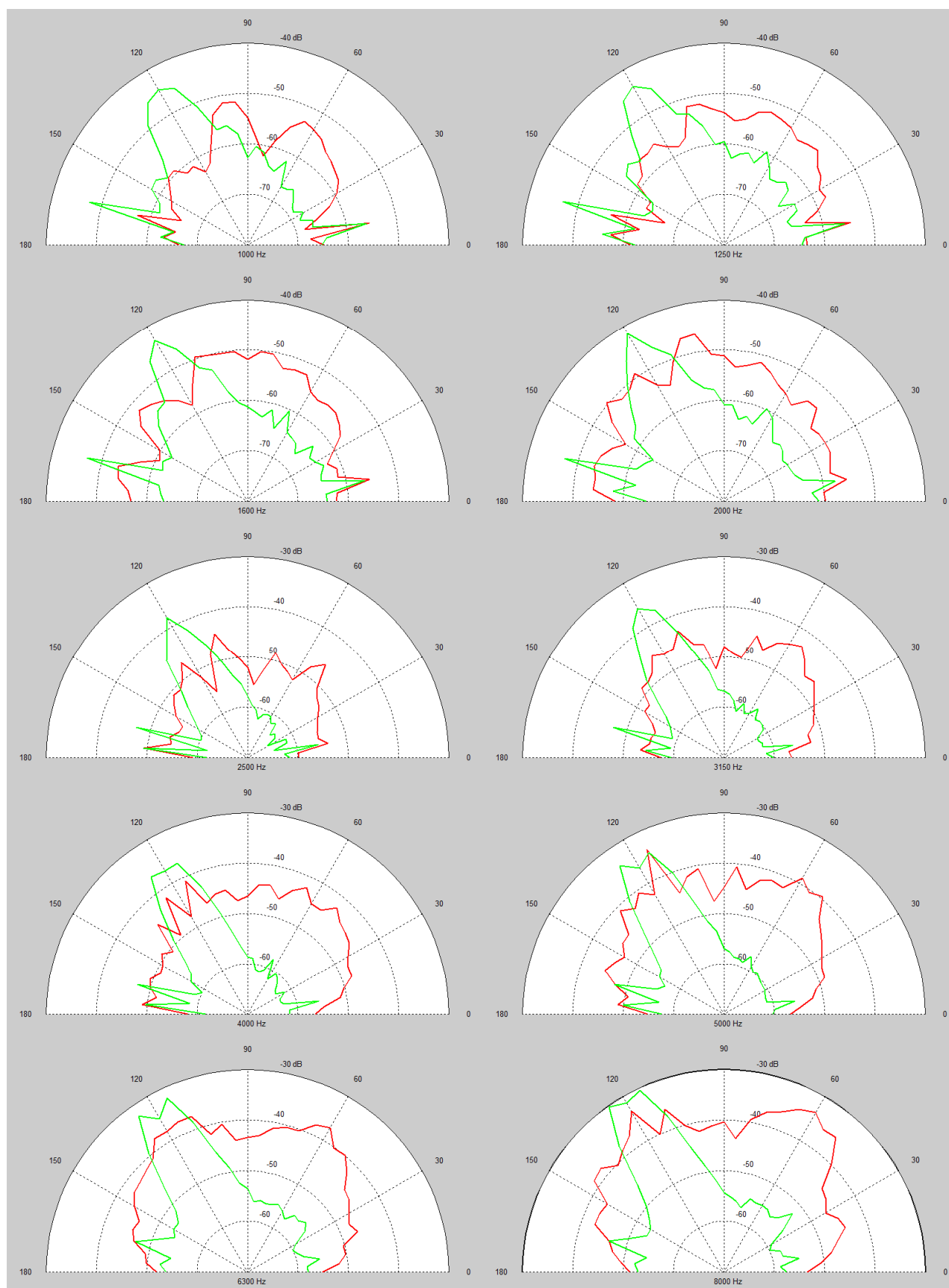
1/3 okt. pásmo [Hz]	kolmý dopad na difuzor [dB]																				
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0°	-92,8	-85,5	-77,7	-80,8	-83,2	-80,3	-67,5	-68,9	-65,1	-65,6	-66,0	-64,7	-67,2	-64,8	-63,0	-57,6	-60,4	-58,3	-53,4	-49,1	-44,7
5°	-68,4	-66,5	-61,2	-64,0	-65,8	-65,0	-64,5	-64,7	-65,0	-63,1	-62,6	-60,9	-63,5	-62,8	-60,6	-54,4	-59,4	-55,7	-51,1	-49,0	-44,8
10°	-88,2	-84,0	-95,9	-81,4	-82,5	-79,1	-69,1	-70,0	-65,1	-66,5	-62,4	-60,9	-63,1	-63,1	-59,4	-53,3	-56,6	-54,9	-50,0	-46,8	-44,3
15°	-64,3	-62,4	-57,0	-59,5	-61,3	-61,6	-61,9	-60,4	-62,3	-61,3	-60,4	-58,5	-60,2	-61,5	-57,8	-51,1	-55,0	-52,5	-48,6	-47,3	-42,4
20°	-69,2	-67,9	-62,5	-62,7	-65,7	-63,8	-64,7	-65,5	-64,1	-63,2	-59,4	-58,4	-58,8	-59,8	-57,1	-49,8	-52,0	-53,4	-48,9	-45,9	-41,5
25°	-84,4	-83,4	-80,3	-73,4	-76,0	-72,2	-71,9	-67,6	-63,4	-66,8	-59,7	-57,0	-58,1	-61,1	-56,3	-50,2	-48,7	-50,8	-48,7	-47,9	-43,1
30°	-83,7	-79,2	-75,8	-72,6	-77,0	-70,8	-67,6	-65,4	-63,9	-66,1	-59,9	-56,1	-56,1	-62,2	-56,4	-50,4	-47,4	-50,7	-48,7	-45,6	-41,5
35°	-78,8	-73,7	-69,0	-71,5	-80,1	-73,1	-71,4	-66,7	-63,5	-63,4	-61,0	-55,5	-55,9	-58,8	-56,7	-50,9	-47,4	-49,8	-49,8	-45,5	-41,7
40°	-82,0	-80,1	-75,3	-68,2	-70,7	-72,6	-70,5	-65,7	-63,6	-63,6	-62,8	-55,8	-52,4	-54,5	-57,1	-52,5	-50,1	-48,8	-49,2	-45,8	-42,2
45°	-80,5	-78,3	-73,9	-66,3	-68,6	-76,4	-72,0	-69,3	-64,6	-63,6	-64,3	-56,8	-51,2	-52,0	-56,4	-51,7	-48,3	-46,1	-46,5	-45,5	-39,6
50°	-80,4	-80,4	-73,2	-63,8	-66,4	-71,7	-69,3	-70,0	-64,4	-62,5	-62,0	-56,1	-50,8	-55,5	-55,2	-50,2	-46,7	-46,5	-48,4	-44,2	-40,6
55°	-77,4	-72,7	-66,8	-64,1	-66,7	-69,6	-68,6	-70,4	-69,4	-61,0	-58,9	-55,4	-51,8	-52,3	-53,9	-50,9	-45,5	-42,1	-44,9	-45,5	-41,0
60°	-78,4	-73,7	-67,2	-63,0	-64,1	-66,1	-65,6	-69,2	-69,3	-58,9	-54,9	-53,6	-52,4	-51,4	-52,2	-47,2	-46,3	-44,8	-44,8	-40,1	-35,7
65°	-80,0	-75,9	-68,4	-61,6	-62,2	-63,1	-63,1	-66,5	-67,4	-57,1	-51,3	-52,6	-50,6	-52,1	-50,0	-48,3	-48,3	-47,1	-43,2	-43,4	-39,5
70°	-79,0	-74,4	-66,9	-61,3	-61,7	-60,9	-61,4	-63,0	-63,3	-55,3	-50,0	-50,6	-49,9	-46,8	-47,1	-44,5	-46,2	-39,1	-38,1	-39,2	-36,2
75°	-73,2	-68,9	-62,8	-61,2	-62,4	-59,0	-60,6	-61,8	-60,2	-55,7	-52,1	-50,3	-50,6	-45,3	-44,1	-47,2	-45,3	-40,5	-38,0	-38,5	-37,1
80°	-79,1	-74,7	-67,0	-60,1	-59,0	-57,8	-59,1	-61,2	-59,2	-57,0	-58,4	-55,0	-49,8	-50,0	-45,8	-42,2	-45,6	-42,1	-34,4	-32,4	-34,2
85°	-77,2	-72,2	-65,2	-60,2	-59,7	-57,4	-58,8	-60,6	-59,0	-60,1	-60,1	-56,4	-51,9	-53,4	-50,7	-47,9	-39,8	-32,9	-35,2	-32,4	-33,4
90°	-79,1	-75,4	-67,2	-59,4	-59,7	-57,2	-58,1	-60,4	-59,3	-60,0	-57,3	-56,4	-56,6	-53,5	-49,9	-47,3	-46,8	-41,7	-33,9	-32,1	-36,5
95°	-66,5	-65,3	-59,2	-54,7	-55,2	-58,4	-57,2	-58,4	-58,9	-58,5	-56,6	-55,3	-54,2	-46,9	-43,4	-46,8	-40,5	-37,6	-30,4	-30,0	-30,8
100°	-72,5	-68,7	-62,5	-60,7	-61,7	-57,8	-59,7	-61,0	-58,5	-59,8	-57,1	-54,3	-51,4	-52,2	-48,9	-46,4	-44,3	-35,5	-33,2	-35,7	-33,0
105°	-77,7	-78,7	-69,1	-59,2	-59,3	-59,1	-60,8	-62,4	-60,0	-58,6	-56,5	-54,7	-51,6	-48,3	-49,0	-46,7	-45,9	-42,3	-34,1	-33,9	-34,2
110°	-78,5	-74,3	-67,1	-60,6	-61,1	-59,9	-61,7	-62,9	-60,6	-58,8	-56,7	-60,9	-57,8	-55,5	-52,9	-47,8	-47,5	-44,0	-38,5	-37,6	-34,9
115°	-74,3	-70,0	-63,8	-62,0	-63,8	-61,6	-63,4	-63,7	-61,4	-58,4	-56,6	-59,9	-55,0	-51,6	-51,5	-50,3	-45,5	-39,8	-40,5	-38,4	-36,5
120°	-76,7	-78,9	-73,9	-61,5	-62,3	-67,2	-70,9	-66,1	-64,4	-59,8	-56,6	-56,0	-50,2	-49,8	-50,0	-49,7	-46,4	-44,6	-43,3	-45,6	-40,9
125°	-75,3	-71,0	-65,2	-64,3	-68,2	-69,5	-69,8	-65,3	-63,3	-59,2	-57,0	-53,7	-52,0	-50,9	-51,4	-44,4	-46,6	-46,7	-46,8	-44,8	-40,7
130°	-80,9	-76,3	-70,1	-64,9	-68,7	-76,3	-74,6	-68,2	-66,4	-61,0	-58,8	-54,2	-53,4	-51,4	-53,6	-49,9	-46,0	-45,6	-47,2	-47,7	-43,1
135°	-81,3	-79,3	-73,6	-65,9	-69,9	-71,8	-72,5	-67,2	-65,7	-62,9	-56,8	-53,3	-52,7	-51,9	-51,1	-49,2	-44,7	-48,1	-47,8	-46,1	-42,3
140°	-82,1	-76,0	-70,4	-67,3	-71,2	-71,0	-72,3	-70,8	-65,5	-61,4	-55,7	-56,0	-52,8	-53,1	-50,1	-50,5	-48,7	-49,1	-48,6	-46,8	-44,5
145°	-81,7	-76,9	-72,1	-69,4	-74,6	-69,5	-70,1	-72,0	-64,1	-60,6	-54,7	-55,2	-52,8	-54,9	-54,2	-49,8	-50,1	-48,0	-46,9	-48,3	-45,2
150°	-83,0	-77,9	-73,3	-71,8	-76,5	-68,1	-70,0	-71,0	-64,2	-60,2	-56,1	-56,8	-54,9	-57,7	-55,7	-49,0	-48,8	-47,9	-48,7	-48,8	-45,6
155°	-85,4	-81,8	-80,3	-71,1	-72,2	-67,1	-72,8	-70,9	-62,8	-59,6	-57,3	-55,2	-54,9	-56,0	-56,9	-49,9	-48,7	-49,1	-48,9	-48,3	-45,5
160°	-81,6	-76,5	-70,8	-77,3	-71,4	-68,2	-71,2	-72,6	-63,6	-59,7	-59,2	-58,1	-58,1	-59,7	-58,1	-50,7	-49,6	-50,7	-49,4	-48,4	-44,7
165°	-65,2	-63,3	-57,8	-60,3	-62,8	-61,9	-63,1	-62,9	-61,1	-60,7	-59,3	-58,1	-56,9	-58,2	-56,6	-52,9	-51,7	-52,0	-48,8	-49,7	-46,7
170°	-97,9	-85,8	-78,7	-80,8	-77,8	-70,2	-73,9	-69,7	-64,0	-62,8	-62,7	-61,4	-60,7	-61,1	-59,5	-53,8	-51,7	-53,5	-50,5	-51,0	-48,1
175°	-75,1	-72,0	-66,3	-70,0	-69,7	-70,9	-71,1	-72,7	-66,0	-67,7	-59,0	-50,2	-61,5	-61,2	-57,2	-54,2	-54,1	-55,0	-52,1	-48,5	-44,9
180°	-60,1	-57,9	-52,5	-56,2	-57,4	-57,6	-60,1	-59,1	-58,1	-59,9	-58,9	-59,7	-59,4	-58,7	-57,5	-55,7	-55,8	-55,7	-50,7	-49,1	-48,0

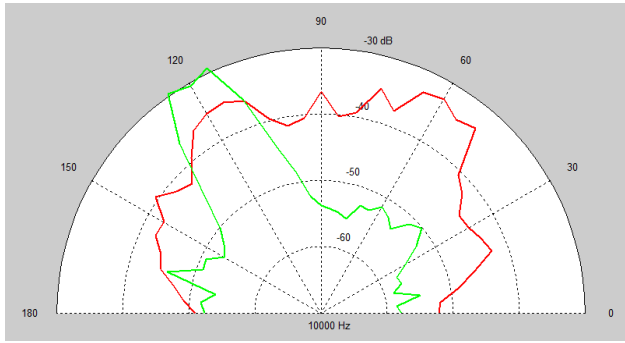
8. Tabulka dat polárních grafů pro kolmý dopad na reflektor

1/3 okt. pásmo [Hz]	kolmý dopad na reflektor [dB]																				
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0°	-94,1	-86,2	-79,0	-77,0	-77,9	-68,2	-72,2	-73,1	-66,5	-69,7	-66,7	-65,6	-67,6	-64,7	-64,4	-62,0	-64,1	-60,6	-57,1	-54,4	-50,4
5°	-81,5	-77,6	-70,9	-73,5	-79,5	-67,5	-72,7	-72,1	-66,1	-68,4	-64,6	-65,6	-65,5	-63,5	-65,6	-63,9	-64,2	-61,2	-58,0	-55,1	-51,6
10°	-86,3	-83,4	-85,2	-77,7	-79,8	-67,8	-70,5	-72,8	-65,9	-69,3	-68,7	-65,6	-64,8	-65,6	-64,8	-62,1	-62,8	-60,6	-57,8	-55,9	-56,0
15°	-79,1	-77,4	-75,9	-72,6	-72,5	-68,2	-68,2	-70,8	-69,5	-68,7	-67,4	-65,3	-63,7	-64,5	-63,9	-61,9	-63,7	-61,9	-59,0	-57,4	-54,6
20°	-78,4	-77,3	-79,0	-70,0	-72,2	-70,4	-68,2	-72,4	-69,5	-64,2	-64,9	-63,1	-65,3	-67,4	-63,3	-62,4	-61,3	-60,1	-56,7	-56,3	-53,3
25°	-79,0	-75,1	-69,8	-71,3	-77,7	-68,3	-69,0	-68,0	-65,5	-65,7	-65,5	-63,4	-66,6	-65,4	-63,5	-62,1	-63,4	-62,2	-58,9	-58,9	-57,0
30°	-78,9	-78,8	-84,7	-70,8	-73,2	-67,7	-66,4	-67,3	-68,0	-66,6	-67,6	-63,9	-65,4	-65,1	-63,1	-62,6	-63,1	-60,5	-60,6	-59,3	-56,2
35°	-80,1	-76,8	-72,2	-69,9	-73,3	-72,1	-68,3	-64,4	-67,2	-66,4	-65,8	-61,6	-66,3	-63,1	-62,8	-61,8	-63,1	-62,1	-58,7	-56,9	-54,4
40°	-79,4	-76,2	-70,7	-67,1	-71,0	-75,5	-69,4	-65,1	-66,8	-65,9	-64,4	-62,8	-65,0	-66,5	-61,6	-60,1	-61,3	-57,7	-55,0	-56,7	-53,9
45°	-76,4	-72,3	-67,0	-65,3	-71,2	-79,8	-72,5	-64,5	-65,8	-66,5	-65,3	-62,2	-64,7	-62,4	-59,5	-59,4	-60,7	-58,7	-55,9	-54,8	-51,6
50°	-77,2	-77,7	-74,2	-64,0	-65,6	-67,2	-72,1	-66,6	-63,4	-66,8	-63,2	-61,5	-62,9	-61,2	-60,8	-59,7	-60,0	-57,8	-55,4	-53,4	-52,7
55°	-67,8	-64,7	-59,1	-62,4	-71,8	-66,6	-66,3	-63,8	-63,9	-63,1	-61,5	-62,3	-62,0	-61,0	-59,8	-57,7	-59,4	-58,1	-54,4	-54,6	-52,1
60°	-76,0	-72,3	-65,8	-62,8	-62,5	-63,4	-66,0	-69,7	-63,0	-61,5	-62,0	-59,2	-62,2	-62,3	-60,1	-58,6	-58,4	-56,8	-54,0	-52,1	-49,7
65°	-71,7	-68,3	-62,2	-62,0	-62,5	-60,8	-63,1	-66,0	-63,4	-57,5	-55,3	-57,7	-59,1	-57,5	-56,8	-55,2	-56,7	-54,2	-52,3	-51,1	-50,5
70°	-76,1	-72,3	-65,1	-61,6	-60,3	-58,9	-60,7	-59,6	-63,2	-59,4	-54,4	-55,9	-58,4	-57,5	-54,4	-53,3	-53,9	-51,6	-49,6	-49,9	-48,5
75°	-72,7	-69,0	-62,7	-61,1	-60,3	-58,4	-58,4	-56,1	-56,1	-57,3	-55,1	-52,8	-54,0	-53,9	-49,7	-48,1	-48,6	-46,2	-45,4	-44,3	-43,3
80°	-75,5	-72,0	-65,2	-60,8	-57,5	-56,2	-57,2	-53,8	-51,9	-51,0	-50,9	-51,4	-50,2	-48,3	-45,3	-42,1	-41,9	-39,1	-37,5	-35,6	-34,0
85°	-74,8	-71,2	-64,4	-60,6	-57,8	-55,7	-56,5	-52,9	-49,2	-47,1	-45,7	-45,6	-46,8	-45,6	-40,4	-36,9	-36,9	-33,8	-32,7	-31,7	-31,5
90°	-76,3	-74,0	-66,1	-59,7	-57,9	-55,5	-56,5	-52,4	-48,8	-45,5	-43,7	-42,9	-42,9	-42,2	-38,8	-37,7	-39,6	-36,3	-33,2	-32,8	-32,4
95°	-76,3	-73,0	-65,4	-59,6	-57,9	-55,3	-56,6	-52,4	-49,1	-46,5	-45,3	-45,2	-46,5	-45,5	-39,9	-36,6	-36,5	-34,0	-32,9	-32,2	-32,0
100°	-74,6	-71,3	-64,7	-60,6	-58,5	-56,1	-56,9	-53,9	-51,7	-50,4	-50,5	-51,3	-49,8	-47,4	-44,2	-41,6	-41,2	-38,1	-37,0	-35,2	-33,7
105°	-74,0	-77,8	-71,7	-59,1	-56,8	-55,6	-59,5	-55,5	-55,7	-56,1	-54,9	-51,9	-53,1	-53,5	-48,9	-47,3	-47,6	-45,5	-44,7	-43,6	-43,6
110°	-76,2	-72,9	-65,8	-60,8	-58,8	-57,8	-60,5	-58,9	-62,0	-59,0	-54,6	-54,7	-57,1	-56,5	-53,3	-52,4	-52,8	-50,4	-50,1	-50,2	-49,0
115°	-75,1	-71,2	-64,5	-61,5	-59,6	-59,6	-62,4	-63,4	-63,6	-57,7	-56,6	-60,3	-59,8	-58,4	-55,5	-56,4	-56,4	-54,9	-52,0	-52,4	-52,8
120°	-73,7	-75,5	-71,8	-61,6	-59,2	-59,1	-70,6	-66,6	-61,8	-59,2	-61,7	-58,9	-59,5	-59,2	-58,6	-58,2	-58,5	-56,9	-54,8	-55,1	-54,7
125°	-76,3	-72,7	-66,9	-64,6	-64,8	-63,2	-68,9	-67,2	-60,7	-62,2	-60,3	-60,6	-62,9	-61,6	-59,6	-59,0	-59,1	-58,3	-55,8	-55,1	-55,4
130°	-75,5	-71,9	-66,3	-65,7	-68,5	-69,6	-70,3	-63,9	-64,3	-65,7	-62,4	-64,3	-65,5	-63,9	-63,0	-59,3	-60,7	-58,8	-55,4	-56,2	-55,9
135°	-78,5	-77,3	-72,3	-67,0	-67,2	-68,6	-68,5	-65,0	-64,1	-66,0	-64,1	-61,6	-64,1	-61,3	-61,4	-60,6	-61,3	-59,3	-57,7	-57,1	-55,3
140°	-74,8	-71,0	-65,7	-67,4	-69,8	-80,5	-71,0	-63,1	-67,1	-65,0	-62,9	-62,6	-65,2	-65,3	-61,1	-60,5	-60,7	-58,0	-56,5	-55,0	-53,8
145°	-78,8	-75,8	-71,4	-69,7	-71,0	-73,1	-68,8	-63,5	-67,0	-64,7	-64,4	-62,2	-61,8	-61,1	-62,6	-62,7	-63,0	-60,6	-57,8	-58,7	-58,1
150°	-77,2	-72,9	-67,9	-71,5	-79,2	-68,6	-69,4	-66,4	-68,4	-66,6	-66,1	-64,4	-66,2	-64,2	-62,4	-63,0	-62,5	-62,3	-58,7	-57,5	-56,7
155°	-81,2	-78,5	-74,3	-73,9	-78,6	-66,9	-68,1	-67,9	-67,5	-66,1	-68,2	-62,0	-62,3	-60,3	-64,1	-61,5	-63,0	-60,6	-58,0	-58,2	-57,9
160°	-83,3	-79,6	-74,7	-75,4	-78,9	-66,3	-68,2	-71,4	-67,8	-66,2	-67,3	-63,3	-65,1	-64,6	-63,0	-62,6	-63,7	-62,4	-58,8	-58,0	-55,9
165°	-59,8	-57,7	-52,2	-55,2	-56,4	-59,7	-56,8	-59,3	-60,1	-57,7	-58,3	-58,2	-56,9	-56,9	-57,6	-57,3	-57,6	-56,2	-52,2	-51,5	-50,5
170°	-82,6	-80,8	-89,3	-77,5	-77,9	-67,5	-67,8	-70,2	-65,0	-68,2	-66,9	-65,6	-63,9	-61,7	-59,8	-60,0	-58,5	-57,4	-55,7	-54,5	-50,9
175°	-75,0	-71,9	-66,4	-70,4	-73,3	-63,3	-74,2	-71,4	-65,9	-67,1	-58,2	-50,6	-62,7	-59,3	-57,8	-61,4	-60,2	-57,5	-53,8	-49,4	-45,9
180°	-90,7	-85,1	-80,0	-86,7	-80,5	-68,3	-71,8	-70,0	-67,1	-70,2	-66,4	-67,9	-67,4	-62,9	-61,7	-61,9	-60,5	-57,2	-52,5	-51,1	-50,1

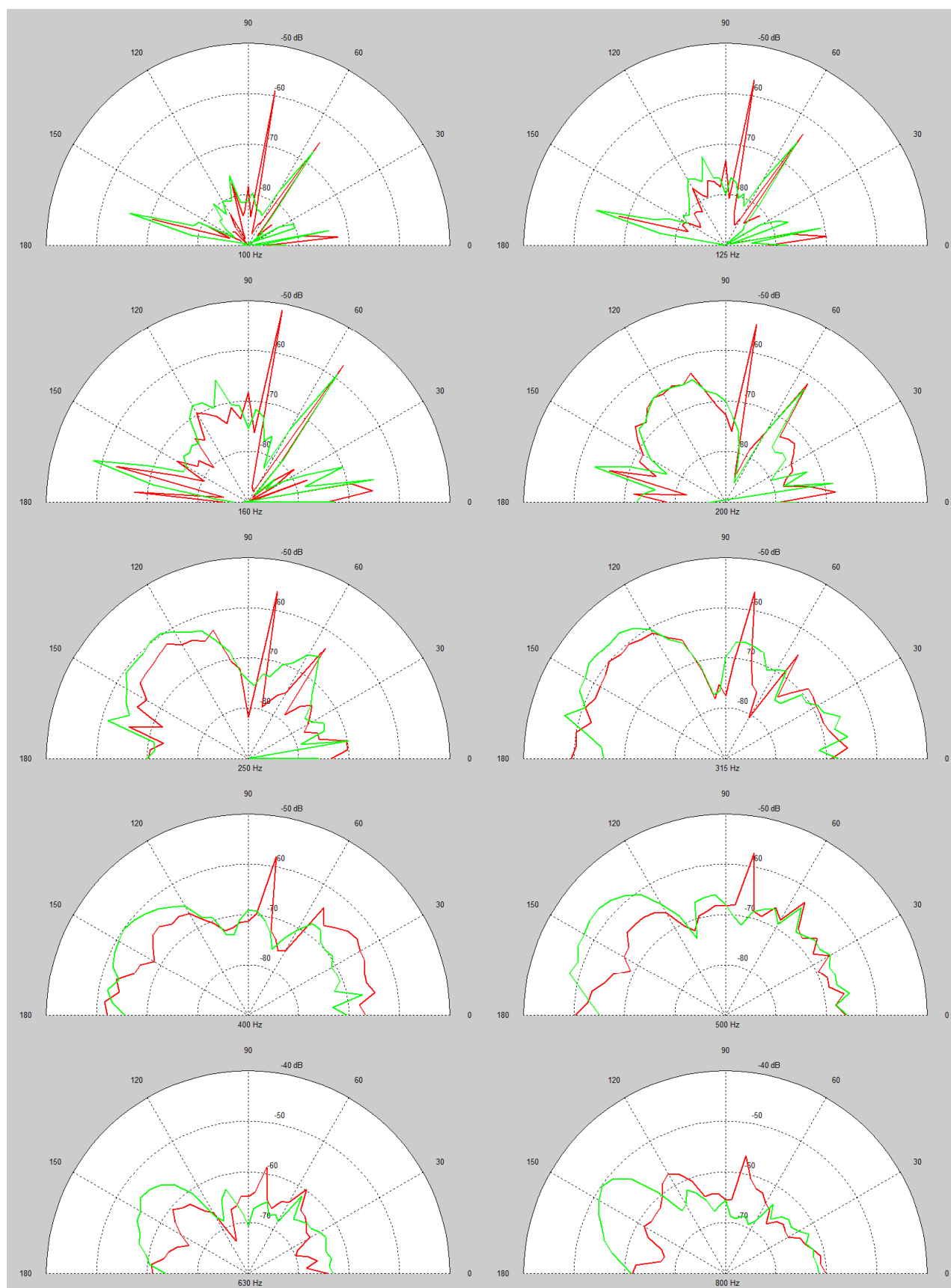
9. Polární charakteristiky pro dopad z 30° od normály - měření

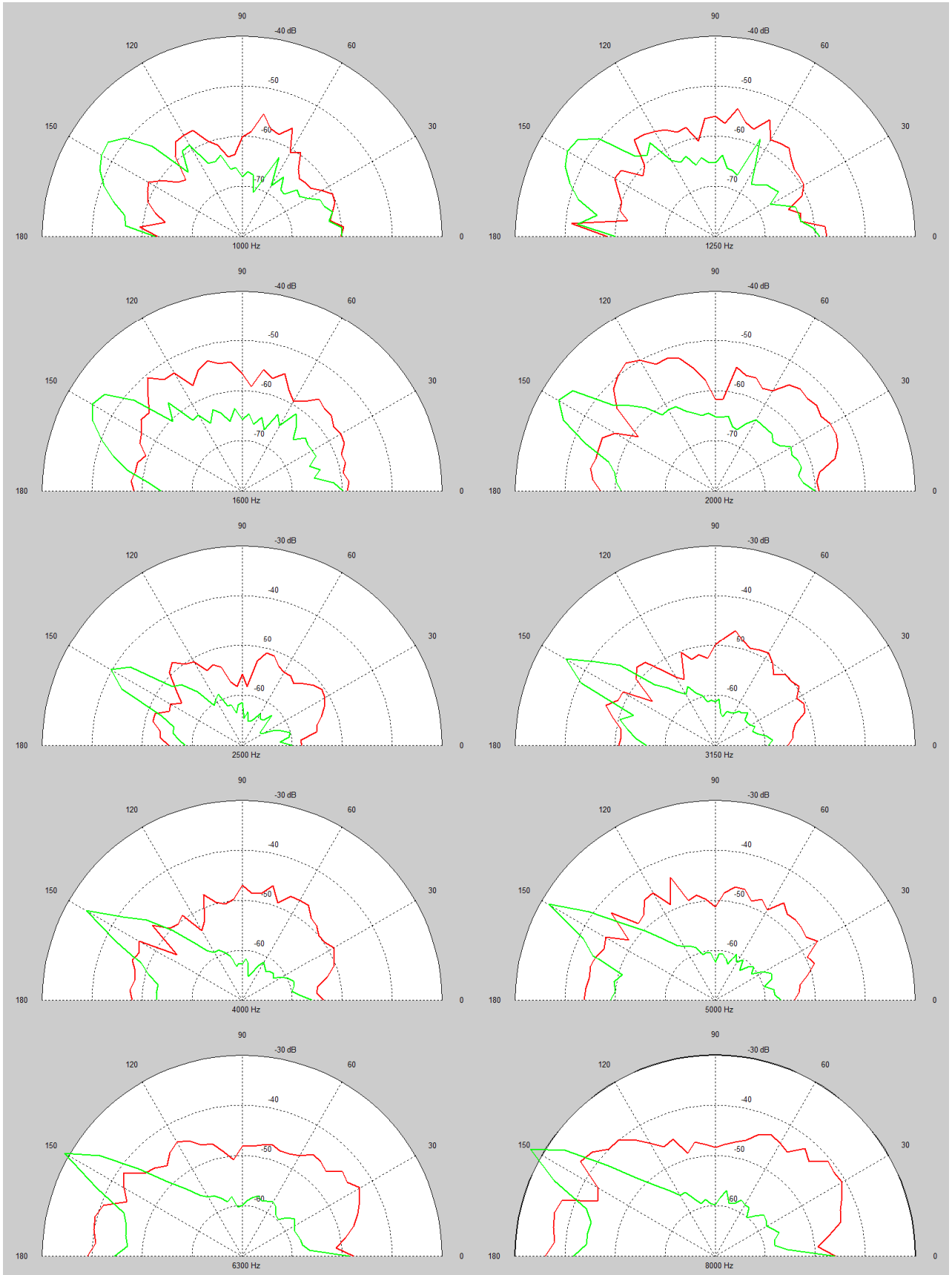


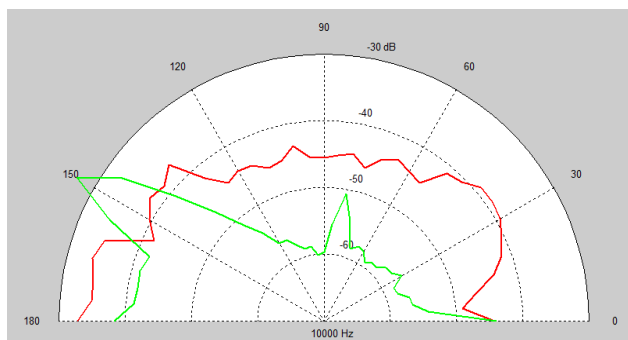




10. Polární charakteristiky pro dopad z 60° od normály - měření







11. Tabulka činitelů difuze pro 1/3 okt. pásma

1/3 okt. pásmo [Hz]	činitel difuze [-]																				
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
difuzor 0°	0,12	0,13	0,15	0,42	0,36	0,42	0,43	0,53	0,69	0,69	0,50	0,64	0,66	0,42	0,36	0,58	0,49	0,21	0,22	0,23	0,40
difuzor 30°	0,03	0,04	0,04	0,20	0,24	0,34	0,33	0,32	0,58	0,55	0,48	0,65	0,63	0,54	0,56	0,60	0,63	0,36	0,56	0,48	0,47
difuzor 60°	0,03	0,03	0,03	0,09	0,23	0,44	0,51	0,44	0,67	0,65	0,73	0,67	0,71	0,65	0,78	0,81	0,83	0,75	0,61	0,54	0,43
reflektor 0°	0,07	0,08	0,09	0,39	0,38	0,39	0,35	0,27	0,18	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13
reflektor 30°	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,12	0,07	0,16	0,20	0,18	0,17	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09
reflektor 60°	0,11	0,13	0,13	0,42	0,42	0,39	0,47	0,44	0,41	0,27	0,20	0,19	0,15	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05
norma 0°	0,06	0,05	0,06	0,05	-0,02	0,04	0,13	0,35	0,62	0,64	0,42	0,58	0,62	0,34	0,27	0,53	0,43	0,12	0,12	0,12	0,31
norma 30°	0,03	0,03	0,03	0,19	0,19	0,25	0,28	0,20	0,48	0,45	0,37	0,58	0,57	0,47	0,51	0,56	0,58	0,28	0,52	0,42	0,41
norma 60°	-0,09	-0,12	-0,12	-0,57	-0,33	0,08	0,06	-0,01	0,45	0,53	0,66	0,59	0,66	0,61	0,76	0,79	0,82	0,74	0,60	0,52	0,40
norma + váha	-0,02	-0,04	-0,03	-0,17	-0,07	0,15	0,17	0,12	0,47	0,50	0,51	0,59	0,62	0,53	0,60	0,66	0,68	0,48	0,52	0,45	0,40

12. Seznam měřicího vybavení

10 m pásmo

500 mm pravítko

37 kanálový přepínač

37 ks mikrofonů s back-elektretovou kapslí Panasonic WM61A

511 m koaxiálního kabelu RG-174/U v 37 ks

Mikrofonní předzesilovač s přípravkem na dvoukanálové měření

Výkonový zesilovač CustomWorks HYPA 10 (2x100W 4 Ohm)

Budící reprosoustava VMA-III (třípásmové konstrukce s pasivním zářičem)

20 m rerokabelu SCY 2x2,5 mm²

NTB se zvukovou kartou a měřicím programem LSPLab 3

Úhelník

Multimetr

Skelná vata Rotaflex 500x500x1000 mm