

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojů průmyslové dopravy



Hluk v průmyslovém interiéru

doktorská disertační práce

Ph.D.

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134537

Studijní program:

P2302 Stroje a zařízení

Studijní obor

2302V010 Konstrukce strojů a zařízení

Doktorand:

Ing. Jan Novák

Školitel:

doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Liberec 2005

1x TEZE KOD (KVM)

102 s [57p. příl. obv.]

U 444 S

ANOTACE

Hluk v průmyslovém interiéru

Tato doktorská disertační práce shrnuje poznatky a výsledky studia zaměřeného na šíření hluku v průmyslových interiérech a na možnostech jeho snižování. Přispívá tak k dosavadním znalostem o možnostech výpočtů předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech.

Práce se zabývá využitím metod geometrické akustiky a shrnuje základní možnosti těchto metod. V práci je popisován navržený výpočtový algoritmus, s jehož pomocí lze kompletně popsat šíření hluku od zdrojů řešeným průmyslovým interiérem. Práce obsahuje i popis všech významných prvků v řešených interiérech jako jsou: zdroje hluku, vnitřní tělesa, akustické bariéry a stěny výpočtového prostoru. Tyto významné prvky v interiéru jsou popisovány ve vztahu k použité výpočtové metodě geometrické akustiky. Z navrženého výpočtového algoritmu jsou shromážděny výsledky a nové poznatky možnostech geometrické akustiky a jsou zformulovány závěry pro rozvoj oboru.

V experimentální části práce je ukázáno řešení v typického průmyslového prostoru včetně popisu koncepce možných návrhů protihlukových opatření.

ANNOTATION

Noise in industrial interiors

This doctorate dissertation summarises the findings and results of a study focused on the spread of noise in industrial interiors and the means of reducing these levels. It therefore contributes to our current knowledge of the means of calculating expected noise levels in industrial interiors.

The work deals with the application of geometric acoustic methods and summarises the basic options offered by these methods. The work describes a proposed computation algorithm which can be used to give a description of the spread of noise from sources within an industrial interior. The work also contains a description of all the elements which are significant in such areas, such as: sources of noise, internal bodies, acoustic barriers and the walls of the computed space. These significant interior elements are described in relation to the geometric acoustic calculation method. The results from the proposed computational algorithm are collated together with the new findings concerning the possibilities of geometric acoustics and are used to formulate conclusions to benefit the development of the field.

The experimental part of the work demonstrates a solution in a typical industrial interior and includes a description of the concept of possible anti-noise measures that can be taken.

SOUHRN

Předkládaná doktorská disertační práce shrnuje poznatky a výsledky studia zaměřeného na šíření hluku v průmyslových interiérech a na možnostech jeho snižování, které autor získal v letech doktorandského studia 1999 - 2005 na katedře technické diagnostiky, sloučené později s katedrou strojů průmyslové dopravy Fakulty strojní na Technické univerzitě v Liberci. Studium bylo podpořeno možností využít zařízení laboratoře technické diagnostiky a Školícího a pilotního pracoviště TU v Liberci - SPECTRIS na Technické Univerzitě v Liberci. Experimentální část této práce je pak výsledkem dobré spolupráce Technické univerzity s praxí.

Práce je rozvržena do deseti kapitol. Kapitola 1 je úvodem doktorské disertační práce a obsahuje důvody, volby tématu disertační práce. Kapitola 2 *Prostorové vlnění* popisuje šíření vlnění pomocí vlnové rovnice, energii přenášenou vlněním a intenzitu vlnění. V kapitole 3 *Prostorová akustika* jsou uvedeny teorie a principy současných metod výpočtu šíření hluku v interiérech, s využitím metod statistické, vlnové a geometrické akustiky. Kapitola 4 *Výpočet dle ČSN 01 1613* ukazuje stávající možnosti výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslových prostorech dle ČSN. V kapitole je uveden popis modelu řešení a obsahuje i výčet nevýhod, které využití tohoto matematického modelu má.

Vlastní popis mnou navržené metody zvolené pro výpočty předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech je uveden v kapitole 5 *Popis navrhované metody*. Tato kapitola dostatečně ozřejmuje základní princip navržené výpočtové metody. V následujících kapitolách 6, 7 a 8 jsou podrobně popsány jednotlivé významné části, které výpočtový algoritmus používá. Kapitola 6 *Zdroje hluku* popisuje problematiku nejvýznamnějšího objektu v řešeném průmyslovém interiéru a to přímo samotného zdroje hluku. V kapitole je popsán nejen zdroj hluku z pohledu geometrické akustiky, ale i akustické parametry zdroje hluku a způsoby jak tyto parametry experimentálně zjistit. V kapitole 7 *První chod* je ukázán význam první části výpočtu předpokládaných hladin hluku a výpočet bariérového efektu. Kapitola 8 *Prvky interiéru* popisuje ostatní prvky, které se nacházejí v průmyslových interiérech. Tato kapitola obsahuje jak ukázky řešení pomocí geometrické akustiky vztažené na tyto prvky tak i akustické vlastnosti těchto prvků.

Kapitola 9 je ukázkou využití navržené metody výpočtu na konkrétním příkladu.

V závěrečné kapitole 10 *Závěry doktorské disertační práce* jsou shromážděny výsledky a nové poznatky vyplývající z doktorské disertační práce a jsou zformulovány závěry pro rozvoj oboru.

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této práce je přispět k poznatkům o šíření hluku v průmyslových interiérech. Kroky k naplnění tohoto cíle byly formulovány následovně:

1. Seznámit se se způsoby výpočtů hluku v průmyslových interiérech. Provést principiální volbu způsobu výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech.
2. Provést návrh vhodného algoritmu, na základě zvoleného principu, který umožní provádění výpočtů předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech.
3. Provést detailní rozbor jednotlivých významných prvků v průmyslových interiérech, které se svými akustickými vlastnostmi podílejí na zdroji, šíření a útlumu šířeného hluku.
4. Získané poznatky použít k experimentálnímu ověření metody v reálných podmínkách, ve zvoleném typickém průmyslovém interiéru.
5. Zhodnotit výsledky doktorské disertační práce.

OBSAH

1	Úvod	1
2	Prostorové vlnění	2
2.1	Vlnoplochy	2
2.2	Vlnová rovnice	4
2.3	Energie přenášená vlněním	5
2.4	Intenzita vlnění	6
2.5	Ohyb vlnění	8
3	Prostorová akustika	10
3.1	Zvukové pole v interiérech z hlediska vlnové teorie	10
3.2	Zvukové pole v interiérech z hlediska statistické teorie	13
3.2.1	<i>Předpoklady statistické teorie</i>	13
3.2.2	<i>Hustota zvukové energie</i>	14
3.2.3	<i>Dozvuk, doba dozvuku a střední volná dráha zvukového paprsku</i>	17
3.2.4	<i>Stanovení doby dozvuku</i>	17
3.3	Geometrická akustika	19
3.3.1	<i>Náplň geometrické akustiky</i>	19
3.3.2	<i>Odraz zvuku od rovinných ploch</i>	20
3.3.3	<i>Kritický kmitočet</i>	21
3.3.4	<i>Využití geometrické akustiky v matematických simulacích</i>	22
4	Výpočet dle ČSN 01 1613	25
4.1	Volba metody	25
4.2	Činitele rozptylu	25
4.3	Útlum hluku ve vzduchu	26
4.4	Frekvenční omezení řešení	26
4.5	Výpočtový model	27
4.6	Zdroje hluku	28
4.7	Nevýhody řešení podle ČSN 01 1613	29
5	Popis navrhované metody	30
6	Zdroje hluku	34
6.1	Bodový zdroj hluku	34
6.2	Liniový zdroj hluku	36
6.3	Akustické vlastnosti zdroje	38
6.4	Pohled geometrické akustiky na zdroj hluku	40
6.4.1	<i>Přesné metody - první způsob</i>	40
6.4.2	<i>Přesné metody - druhý způsob</i>	41
6.4.3	<i>Řešení pomocí náhodných čísel</i>	44
6.4.4	<i>Náhodné metody - první způsob</i>	44
6.4.5	<i>Náhodné metody - druhý způsob</i>	50

6.5	Mapování pole kolem zdroje hluku	52
6.6	Akustická energie nesená paprskem.....	55
7	První chod	56
7.1	Výpočtová rovina	56
7.2	Výpočet prvního chodu.....	57
8	Prvky v interiéru	59
8.1	Odraz paprsku	60
8.1.1	<i>Optimalizace odrazu paprsku</i>	<i>62</i>
8.2	Aplikace činitele nehomogenit	65
8.3	Akustická pohltivost stěn	66
8.3.1	<i>Akustické prvky</i>	<i>67</i>
8.4	Neprůzvučnost a výpočet do exteriéru	70
9	Praktická aplikace v průmyslovém prostředí	73
9.1	Naměřené hladiny hluku	75
9.1.1	<i>Použitá měřicí technika</i>	<i>75</i>
9.1.2	<i>Místa měření</i>	<i>75</i>
9.1.3	<i>Postup měření</i>	<i>76</i>
9.2	Zadání prostoru	77
9.3	Frekvenční omezení	78
9.4	Akustické parametry prostoru	80
9.4.1	<i>Výpočet stávající akustické pohltivosti</i>	<i>80</i>
9.4.2	<i>Výpočet dozvukové vzdálenosti:.....</i>	<i>80</i>
9.5	Předepsané hlukové limity	82
9.6	Hluková situace	83
9.7	Matematická simulace	83
9.8	Protihluková opatření.....	85
9.9	Řešení hlukové situace	86
9.9.1	<i>Zvýšení akustické pohltivosti stropu a stěn</i>	<i>86</i>
9.9.2	<i>Vytvoření akustické bariéry</i>	<i>88</i>
9.9.3	<i>Matematické simulace</i>	<i>89</i>
9.9.4	<i>Rozbor vypočtených hodnot.....</i>	<i>93</i>
9.10	Realizované protihlukové úpravy	94
9.11	Ověření vypočtených hladin hluku	95
10	Závěry doktorské disertační práce.....	97
10.1	Význam výsledků doktorské disertační práce.....	97
10.2	Osobní přínos doktoranda	97
10.3	Nové poznatky a závěry pro rozvoj oboru.....	98
10.4	Přesnost metody a možnosti zlepšení	99
10.5	Co do budoucna	100



1 Úvod

V roce 1992, když jsem se začínal seznamovat s programováním výpočetních algoritmů, usnadňujících mi výpočty v oboru mechanika jsem se začal zabývat s řešením, jak programově zvládat algoritmy nejen matematické. Byl to pro mne tehdy úplně jiný pohled na řešení běžných věcí, způsobený prvními kroky s PC a omezenými možnostmi algoritmů tehdejších programovacích jazyků. Díky výkonu tehdejších PC 286 bylo nutné navrhovat všechny algoritmy velmi uvážene především s ohledem na rychlost výpočtů. V průběhu studia na vysoké škole jsem se začal zabývat i problematikou akustiky v uzavřených prostorech. Zprvu jednoduché výpočty se postupem času, vzhledem k jejich využitelnosti v reálných případech, začaly stávat komplexnějšími ale mnohdy i částečně nerealizovatelnými. Částečně i proto jsem si po ukončení inženýrského studia zvolil téma „*Hluk v průmyslovém interiéru*“ jako téma mé doktorské disertační práce. Během doktorského studia jsem se seznámil s využitím, do té doby pro mne málo známých, metod výpočtu hluku v interiérech.

Hlučnost v našem prostředí roste a stále více jsou překračovány hranice zdravotní únosnosti. Zvláště v některých lidských činnostech začíná mít působení hluku i trvalé následky na sluch a organismus vůbec. Problém zvýšené hlučnosti, je i problémem většiny stávajících průmyslových provozů a je nutné účinně navrhovat vhodná řešení pro snižování hlučnosti v těchto prostorech. V nově projektovaných výrobních provozech je nutné myslet na problematiku hlučnosti již v samém počátku návrhu projektu. V této fázi je poměrně snadné proti vysokému hluku budoucí výrobní linky lépe bojovat. Tím může být volba nákupu tišších strojů, optimalizace jejich rozložení ve výrobním prostoru nebo využití akusticky více optimalizovaných materiálů v posuzovaném interiéru.

Abychom mohli posuzovat vliv hluku na celý řešený prostor a případně posuzovat různé varianty návrhu výstavby nových výrobních linek i z pohledu minimalizace vlivu hluku na pracovníky ve výrobě, je nutné tuto problematiku hluku v průmyslových interiérech efektivně řešit.

Efektivním řešením výše uvedeného problému, může být využití vhodných matematických simulací ve výpočtech předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru.



2 Prostorové vlnění

Pokud se budeme chtít zabývat šířením hluku v uzavřených prostorách, budeme hovořit o prostorovém vlnění. Tímto vlněním se bude přenášet akustická energie od zdroje hluku k místu řešení resp. k posluchači.

Prostorové vlnění se šíří rychlostí, která závisí pouze na fyzikálních vlastnostech prostředí. Vlnění přenáší energii rychlostí shodnou s rychlostí šíření vlnění c .

Prostorově vlnění můžeme rozdělit na vlnění podélné a příčné. Podélné vlnění může být jak v prostředí pevném, tak i kapalném a plynném. Příčné vlnění je podmíněno existencí smykových sil v prostředí a může se šířit pouze v pevných látkách.

2.1 Vlnoplochy

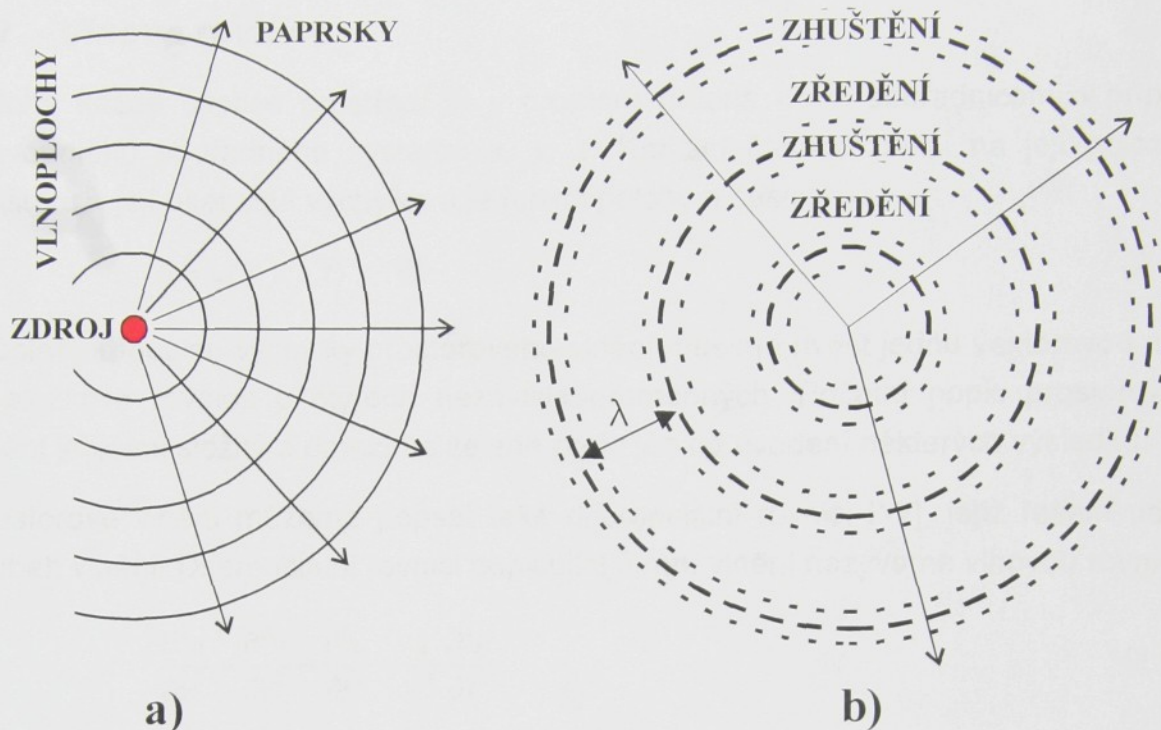
Vznikne-li v některém bodě prostředí rozruch, např. rozkmitáním částice prostředí, šíří se díky působení vzájemných sil mezi částicemi prostředí tento rozruch na všechny strany od místa vzniku. Vlnoplocha je pak plocha reprezentovaná body, do nichž dospělo vlnění ze zdroje rozruchu za stejnou dobu.

Z uvedené definice vlnoplochy vyplývá, že dvě velmi blízké vlnoplochy vyslané ze stejného zdroje zvuku jsou podobné. Z místa vzniku vlnoplochy se šíří vlnění do všech bodů vlnoplochy stejně dlouho a proto mají všechny body vlnoplochy shodnou fázi.

Při popisu vlnění užíváme také paprsky. Paprskem pak rozumíme bodovou řadu ležící ve směru šíření vlnění. Paprsek je přímka, která určuje směr šíření vlnění. V reálných případech mají vlnoplochy komplikované tvary, ale pro názornost si můžeme ukázat šíření vlnění reprezentovaného kulovou a rovinnou vlnoplochou.

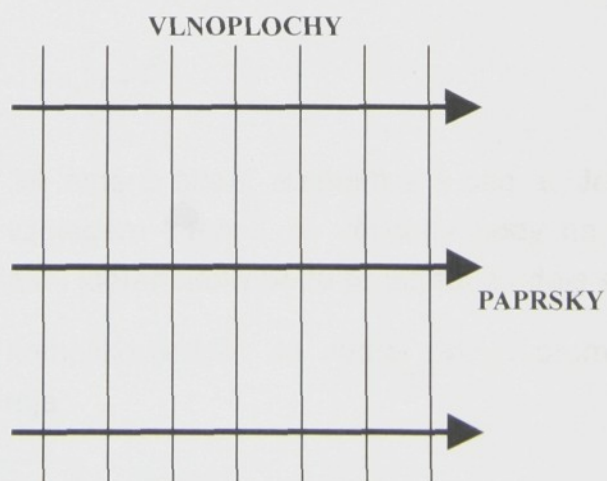
Z bodového zdroje zvuku, se šíří vlnění na všechny strany a vznikají kulové vlnoplochy [4]. Paprsky vlnění pak tvoří svazek přímek, procházejících z bodu rozruchu (zdroje hluku) viz obr. 2.1.a).

Kulové vlny se ve volném prostředí vyskytují nejčastěji, ovšem dopadem paprsků na nejbližší překážku se kulové vlnoplochy deformují. Na obrázku 2.1.b) jsou zobrazeny periodické podélné kulové vlny, které vycházejí z bodového zdroje rozruchu. Takovýto idealizovaný zdroj může být koule, jejíž povrch se periodicky zvětšuje a zmenšuje [10]. Při zvětšení vznikne u povrchu koule zhuštění, při zmenšení vznikne zředění a toto zhuštění a zředění se šíří rychlostí c . Z obrázků vyplývá, že např. místa zhuštění vytvářejí vlnoplochy, které jsou od sebe vzdáleny o vlnovou délku λ .



Obr. 2.1. – Kulové vlny

U rovinných vln jsou vlnoplochy rovnoběžné roviny a jednotlivé paprsky tvoří svazek rovnoběžných přímek. Rovinné vlny se často nevyskytují, ale přibližně jako rovinné vlny se chovají kulové vlnoplochy ve velké vzdálenosti od zdroje zvuku. Je-li zdroj hluku výrazně větší než vlnová délka vzniklého vlnění, jsou vlnoplochy podobné spíše vlnám rovinným než kulovým.



Obr. 2.2. – Rovinné vlny

2.2 Vlnová rovnice

Poloha každé částice prostředí je v prostoru určena třemi souřadnicemi v případě pravouhlého souřadného systému x , y , z . Kmitání částice závisí na její poloze v prostoru a její okamžitá výchylka u je funkcí polohy a času

$$u = u(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

K úplnému popisu výchylky prostorového vlnění musíme uvést jednu vektorovou nebo tři složkové rovnice o čtyřech nezávisle proměnných. Početní popis prostorového vlnění je velmi složitý a omezíme se zde proto jen na uvedení některých výsledků.

Prostorové vlnění můžeme popsat také diferenciální rovnicí [12], jejíž řešení udává průběh vlnění. Diferenciální rovnici popisující šíření vlnění nazýváme vlnovou rovnicí.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Vlnová rovnice pro prostorové vlnění je používána tak, že odvodíme-li pro nějaké prostředí vlnovou rovnici, zjistíme jejím porovnáním s rovnicí 2.2 rychlost, jakou se vlnění v řešeném prostředí šíří. Samotné řešení rovnice 2.2 není jednoduché z důvodu, že v prostoru se šíří současně mnoho vln různých tvarů. Úplně analytické řešení vlnové rovnice je možné pouze v prostorech s jednoduše geometricky definovanými tvary.

Nejjednodušší je řešení vlnové rovnice pro rovinné vlny, které se šíří jediným směrem. V případě šíření vlnění ve směru osy x dostaneme pro průběh velikostí výchylky

$$u = u_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) + u_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad (2.3)$$

Vlnoplochy jsou kolmé ke směru šíření respektive k ose x . Jejich poloha je úplně určena souřadnicí x a vzhledem k tomu, že všechny body na vlnoploše kmitají se stejnou fází, lze určit kmitání kteréhokoliv bodu prostředí z údaje souřadnice x .

Popis kulových vln je komplikovanější. Je nutné zavést proměnnou r , vzdálenost kulové vlnoplochy od zdroje

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.4)$$

Vzhledem k tomu, že se vlnění šíří všemi směry stejně, nezávisí řešení na směru, nýbrž pouze na vzdálenosti r od středu.



$$u = \frac{1}{r} \left[a_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) + a_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.5)$$

Uvedený výraz však neplatí v těsném okolí středu vlnoploch. Řešení se skládá ze dvou vln, z nichž a_1 postupuje směrem rostoucího r , a_2 postupuje směrem klesajícího r . Činitel $1/r$ před závorkou znamená, že amplituda výchylek kmitání každého bodu klesá úměrně se vzdáleností od zdroje rozruchu. U rovinných vln zůstávala amplituda výchylky stejná. To odpovídá zákonu zachování energie, protože u rovinných vln se energie přenáší jediným směrem a její hustota v řezu kolmo na směr šíření zůstává stejná, kdežto u kulových vln se energie šíří všemi směry a její hustota se musí v řezech kolmo na směr šíření (řezy jsou kulové plochy) zmenšovat s rostoucí vzdáleností od zdroje rozruchu.

2.3 Energie přenášená vlněním

Šíření vlnění je spojeno i s přenosem energie, která se šíří stejnou rychlostí jako vlnění a jeho měřítkem je přenášený výkon. Vzhledem k tomu, že u prostorového vlnění je přenášený výkon závislý na velikosti plochy, kterou vlnění prochází, musíme při jeho určování vycházet z výpočtu plošné hustoty přenášeného výkonu (tj. podíl výkonu a plochy kolmé na směr šíření, jíž výkon prochází).

Plošnou hustotu přenášeného výkonu je měrný výkon N [Wm^{-2}] definovaný podílem výkonu P a plochy S

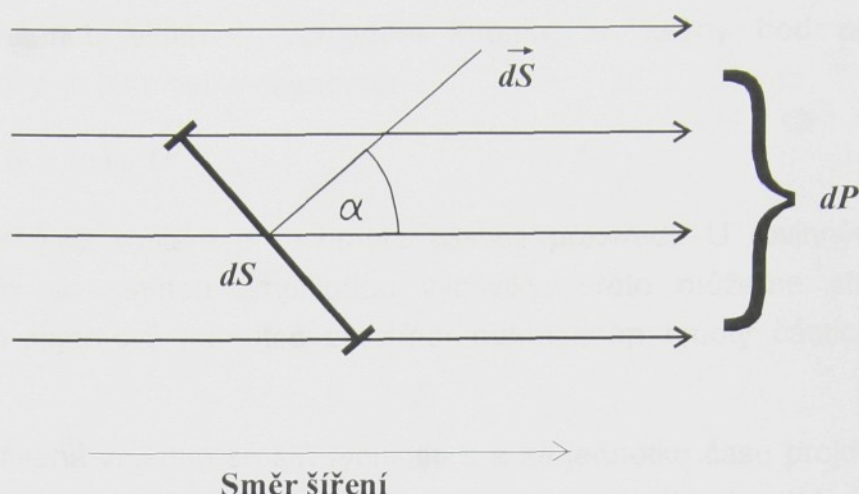
$$N = \frac{dP}{dS \cos \alpha} \quad (2.6)$$

kde dP je výkon procházející obecně položenou ploškou

$dS \cos \alpha$ je průmět plošky do roviny kolmé ke směru šíření vlnění, viz obr. 2.3.

Samotný výkon, který je přenášený podélným vlněním, lze stanovit součinem síly a rychlosti $P = Fv$. Síla je součin akustického tlaku a plochy $F = pS$, rychlost je shodná s rychlostí kmitavého pohybu částic. Měrný výkon N vlnění je podíl výkonu a plochy viz následující vztah.

$$N = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$



Obr. 2.3. – Výpočet měrného výkonu

Po dosazení hodnot akustického tlaku a rychlosti kmitání pro rovinnou sinusovou vlnu lze měrný výkon vlnění vyjádřit i takto:

$$N = pv = p_0 v_0 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = \rho c \omega^2 U^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (2.8)$$

Z uvedeného vztahu je patrné, že se měrný výkon mění s dvojnásobnou frekvencí než je frekvence vlnění. Ze vztahu 2.8 také vyplývá, že přenášený výkon je stále kladný. To znamená, že energie je přenášena jedním směrem a nevrací se.

2.4 Intenzita vlnění

Zavedením veličiny intenzity, docílíme toho, že budeme moci určit měrný výkon přenášený prostorovým vlněním jediným číslem. Intenzita vlnění je střední hodnota měrného výkonu vlnění za čas T . Platí

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N dt \quad (2.9)$$

Intenzita vlnění je určena střední hodnotou energie, která projde při prostorovém vlnění za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr šíření vlnění. Provedeme-li integraci vztahu 2.9 s dosazením za N z rovnice 2.8, dostaneme pro intenzitu vlnění výraz

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 U^2 \quad (2.10)$$

Tento výraz platí pro libovolný tvar vlnoplochy. Pro přímé vlny lze odvodit i výraz pro

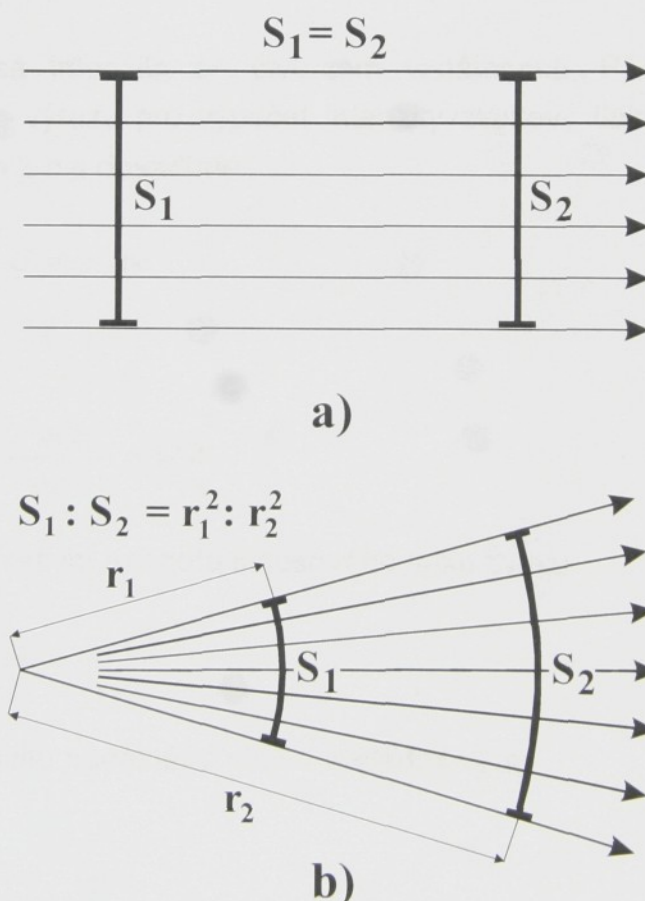
energii přenášenou vlněním. Vzhledem k tomu, že každý bod prostředí koná netlumené kmity, je jeho celková energie

$$W = \frac{1}{2} m \omega^2 U^2 \quad (2.11)$$

kde U je výchylka kmitání a m hmota částice prostředí. U rovinných vln kmitají všechny body se stejnou amplitudou výchylky, proto můžeme stanovit energii obsaženou v objemové jednotce prostředí nahrazením hmoty částice m hustotou prostředí ρ .

Energie přenášená vlněním se šíří rychlostí c a za jednotku času projde jednotkovou plochou (energie obsažená v objemu kvádrů o jednotkové základně totožné s uvažovanou plochou a o délce číselně určené rychlostí šíření vlnění c).

$$I = cw = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 U^2 \quad (2.12)$$



Obr. 2.4. – Šíření rovinných a kulových vln

Podle zákona zachování energie, prochází každým průřezem svazku rovinných vln



stejný výkon a intenzita. U kulových vln je ale svazek paprsků rozbíhavý obr. 2.4 b) a vlnoplocha tvořená kulovou plochou roste se čtvercem vzdálenosti od místa zdroje

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (2.13)$$

Protože i v tomto případě musí být výkon procházející vlnoplochami konstantní, je intenzita na ploše S_1 resp. S_2

$$I_1 = \frac{P}{S_1} \quad I_2 = \frac{P}{S_2} \quad (2.14)$$

a poměr intenzit I_1 a I_2 je

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (2.15)$$

U kulové vlny klesá intenzita se čtvercem vzdálenosti. Při podélném vlnění je vhodnější zavést do výrazu pro výpočet intenzity zvukový tlak. Násobíme a dělíme rovnici 2.12 výrazem ρc a dosadíme

$$p_0 = \frac{K}{c} U = \omega U \rho c \quad (2.16)$$

pak je intenzita

$$I = \frac{1}{2} \frac{\rho^2 c^2 \omega^2 U^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{\rho c} \quad (2.17)$$

Zavedeme-li ještě efektivní hodnotu sinusového tlaku zvuku

$$p_{\text{ef}} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

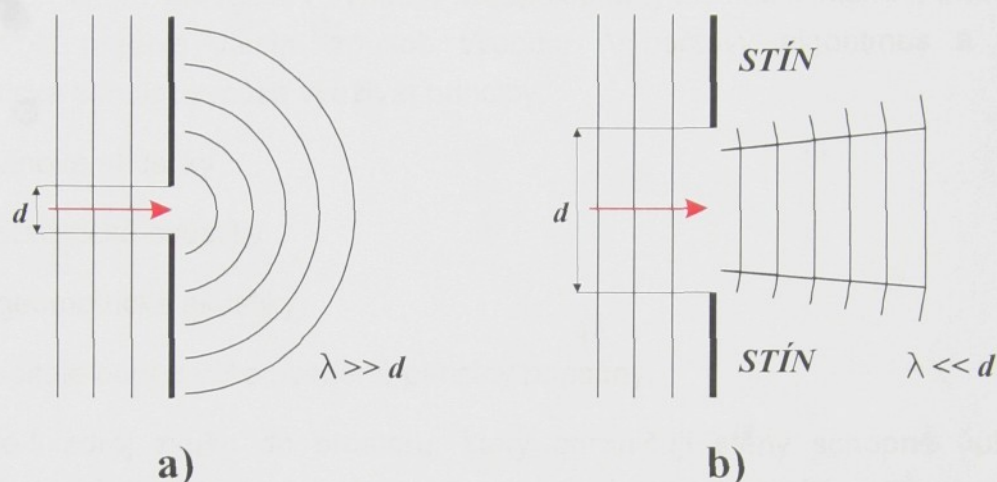
dostaneme pro intenzitu podélného vlnění výsledný výraz

$$I = \frac{p_{\text{ef}}^2}{\rho c} \quad (2.19)$$

2.5 Ohyb vlnění

Významným jevem souvisejícím s interferencí vlnění je ohyb vlnění. Akustické vlnění se šíří ve volném prostoru přímočaře a za překážkami vzniká stín. Analogii bychom

našli u světelného vlnění kde je prostor stínu viditelně vymezen. Akustický stín však takto výrazně vymezen není a přechod z míst, kde se vlnění šíří do míst, kde je stín, je pozvolný. Vznik a rozsah ohybu lze popsat pomocí Huygensova principu.



Obr. 2.5. – Ohyb vlnění za otvorem

S tímto jevem se běžně setkáváme při šíření hluku z interiéru do exteriéru. Je-li např. otvor v plášti budovy malý proti vlnové délce vlnění, šíří se za otvorem vlnění na všechny strany v kulových vlnách. Otvorem, který je výrazně větší než vlnová délka, prochází vlnění prakticky jen ve směru šíření a za okraji otvoru se objeví stín. Ohyb vlnění se v tomto případě projeví pozvolným přechodem mezi místy, kde se šíří vlnění, a stínem.



3 Prostorová akustika

Pro vytvoření vhodného výpočtového algoritmu, umožňujícího výpočty šíření hluku v interiérech a tím provádět i výpočet předpokládaných hladin hluku v interiérech je nutné zvolit nejprve vlastní způsob výpočtu. Výpočtový algoritmus a následná matematická simulace může využívat principy:

- vlnové akustiky
- statistické akustiky
- geometrické akustiky

V této kapitole budou výše uvedené principy popsány.

Umístíme-li zdroj zvuku do prostoru, který ohraničují stěny schopné úplně nebo částečně odrážet zvuk, bude mít tento prostor vliv na akustické veličiny zvukového pole v libovolném bodě řešeného prostoru.

Obdobně jako pružné těleso může být rozkmitáno nějakou budící silou o dané frekvenci, vytváří zdroj zvuku v uzavřeném prostoru zvukové vlnění. Výpočet akustických vlastností uzavřeného prostoru záleží z části i na výpočtu volných kmitů. V případě uzavřeného prostoru bude výpočet volných kmitů vyplývat z řešení vlnové rovnice za daných okrajových podmínek. Řešení vlnové rovnice je však komplikované a řešení lze nalézt pouze v některých případech, a to u malých prostorů s geometricky jednoduše popsitelnými tvary a s ideálně tuhými stěnami. V případě nalezení řešení vlnové rovnice, budeme moci konstatovat, že okamžité hodnoty hledaných akustických veličin jsou funkcí polohy a času.

Ve skutečnosti jsou však řešené uzavřené prostory nepravidelného tvaru, u kterých nelze odrazivé vlastnosti jednotlivých stěn jednoduše vyjádřit. Ve skutečných prostorech bývají vnitřní tělesa, které způsobují rozptyl zvuku. Řešení vlnové rovnice za těchto okolností nelze nalézt. Proto u akustických veličin, nebudeme využívat okamžitých hodnot, nýbrž v čase zprůměrovaných hodnot.

3.1 Zvukové pole v interiérech z hlediska vlnové teorie

Nejjednodušší řešení si můžeme ukázat na pravidelném, lehce geometricky popsitelném prostoru ohraničeném pevnými a ideálně tuhými stěnami. Takovým prostorem bude např. kvádr, s dokonale odrazivými stěnami o délkách hran l_x , l_y a l_z .



K rezonanci tohoto prostoru může dojít vždy, kdykoli se délka příslušné hrany rovná celistvému násobku poloviny vlnové délky.

K úplnému výsledku dojdeme řešením vlnové rovnice. Okrajová podmínka je pro akustickou rychlost částic vzduchu, které jsou v bezprostřední blízkosti stěn ohraničující prostor. Složka akustické rychlosti kolmá ke stěně musí být rovna nule. Vlnová rovnice je popsána takto:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Řešení hledáme jako závislosti akustické rychlosti na čase, takže rychlost v můžeme vyjádřit

$$v = v(x, y, z) \cdot \cos \omega t \quad (3.2)$$

Uvedené $v(x, y, z)$ značí pouze funkci souřadnic. Dosadíme-li tento výraz do rovnice 3.1 a na pravé straně provedeme parciální derivaci podle času. Když poté rovnici zkrátíme výrazem $\cos \omega t$, dostaneme

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} v = -k^2 v \quad (3.3)$$

kde $k = \omega/c$ je vlnové číslo.

Akustická rychlost v je v této rovnici pouze funkcí souřadnic a budeme předpokládat, že je dána součinem tří funkcí, z nichž každá závisí pouze na jedné proměnné. Toto lze zapsat jako

$$v(x, y, z) = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{d^2 X}{dx^2} = -k_x^2, \quad \frac{1}{Y} \cdot \frac{d^2 Y}{dy^2} = -k_y^2, \quad \frac{1}{Z} \cdot \frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2 \quad (3.5)$$

Dalšími úpravami nalezneme i hledané řešení [10], kde pro zvolené vlnové číslo k vypočteme jednu z vlastních frekvencí f_n

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots \quad (3.6)$$

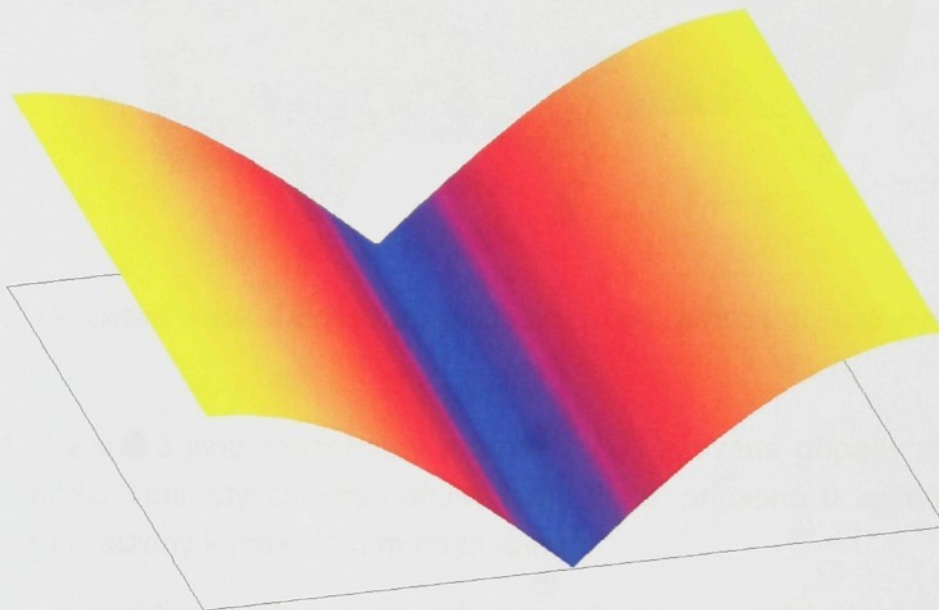
Rovnice 3.6 udává výraz pro vlastní kmitočet všech případů vlastních kmitů, řád kmitů udávají veličiny n_x , n_y a n_z , které nabývají nezávisle na sobě hodnot 0 až ∞ . Z rovnice

3.6 je patrné, že počet vlastních kmitů je pro uzavřený prostor nekonečný.

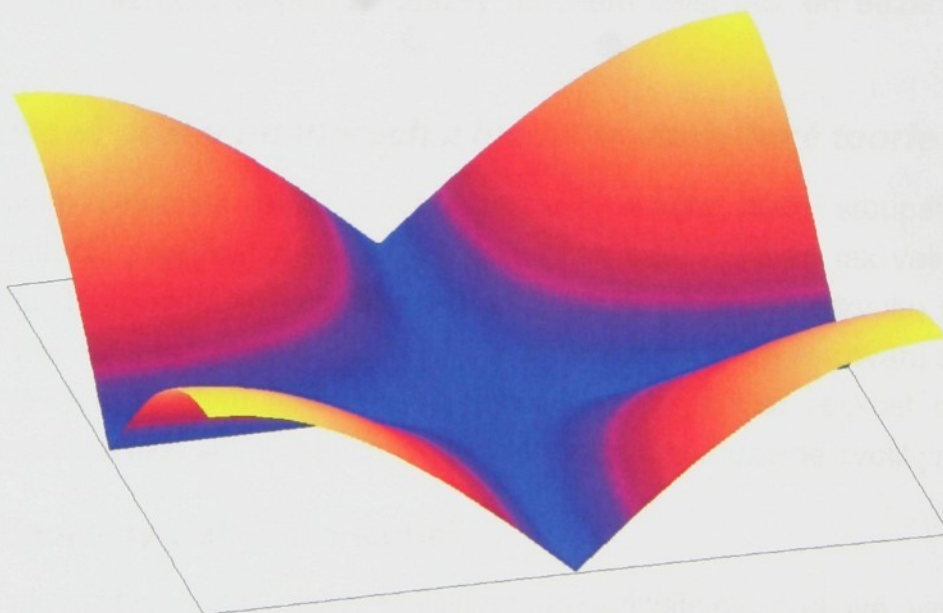
Pro akustický tlak dostaneme obdobný vztah

$$p(x, y, z) = konst. \cdot \cos k_x x \cdot \cos k_y y \cdot \cos k_z z \quad (3.7)$$

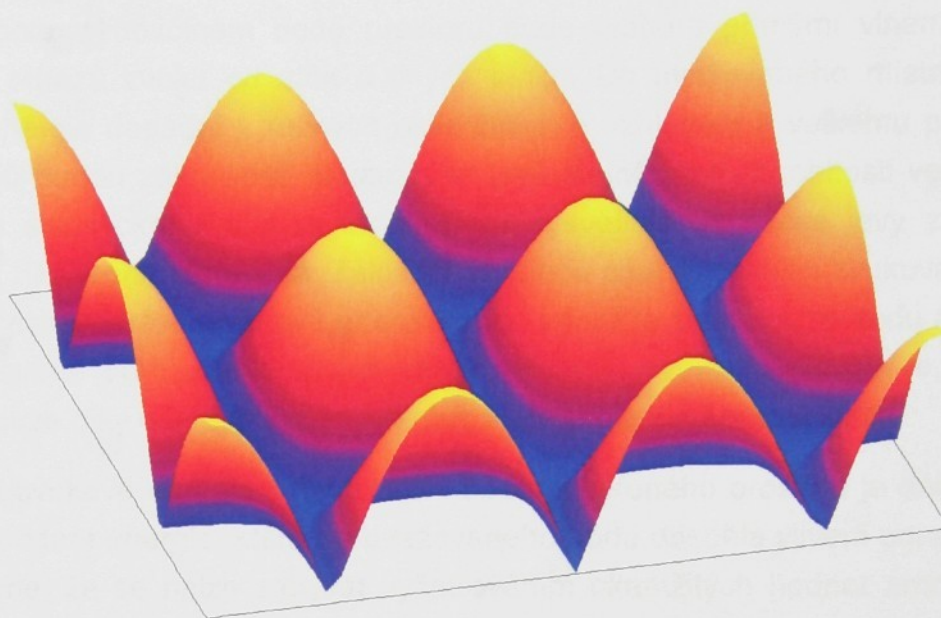
Známe-li závislost amplitudy akustického tlaku na souřadnicích, můžeme přistoupit k znázornění jejího rozložení pro např. pravoúhlý prostor ve tvaru kvádru:



Obr. 3.1. – Rozložení amplitud akustického tlaku v pravoúhlém prostoru při $n_x=1$, $n_y=0$, $n_z=0$



Obr. 3.2. – Rozložení amplitud akustického tlaku v pravoúhlém prostoru při $n_x=1$, $n_y=1$, $n_z=0$



Obr. 3.3. – Rozložení amplitud akustického tlaku v pravoúhlém prostoru při $n_x=3$, $n_y=2$, $n_z=0$

Na obr. 3.1, 3.2 a 3.3 jsou znázorněny pro naše tři uvažované případy vlnoplochy v určitém okamžiku. Hodnoty amplitud akustického tlaku, připsané u každé čáry, jsou relativní a jsou vztaženy k maximálním hodnotám.

Vlastní kmity, respektive jejich hustota má velký vliv na akustické vlastnosti prostoru [2]. V případě buzení zvukovým zdrojem dochází při shodě budící a vlastní frekvence k resonanci, při níž jsou amplitudy odezvy mnohem větší než při buzení na jiných frekvencích.

3.2 Zvukové pole v interiérech z hlediska statistické teorie

Se zvětšujícím objemem uvažovaného prostoru, v něm bude stoupat i hustota vlastních kmitočtů prostředí a při větších objemech bude hustota tak veliká, že i při nízkých kmitočtech budeme moci předpokládat, že se při přenosu zvuku od zdroje k posluchači vliv vlastních kmitů projeví velmi málo. Proto se při vyšetřování akustických vlastností velkých prostorů nebudeme zabývat tím, jak závisí velikost akustického tlaku na kmitočtu z hlediska vlastních kmitů, ale pro řešení můžeme zvolit jinou cestu.

3.2.1 Předpoklady statistické teorie

Stanovení okamžitých akustických veličin charakterizujících zvukové vlnění je pro velké a členité prostory početní cestou nemožné. Řešení vlnová rovnice je totiž velmi obtížné a je umožněno jen numerickým výpočtem metodami konečných prvků.



Zvukové pole v libovolném bodě prostoru bude tvořeno přímými vlnami, ale také příspěvky odrazů zvuku od stěn a jiných ploch. Do uvažovaného místa bude tato zvuková energie dopadat v různých okamžicích a vzhledem k velkému počtu těchto dílčích dějů budou zákonitosti akustických jevů stejné jako zákonitosti velkých čísel, zákonitosti statistické. Proto se teorii, která vysvětluje akustické jevy za takových podmínek, říká teorie statistická. Základní veličinou charakterizující zvukové pole bude v tomto případě hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku. Amplitudu akustického tlaku stanovíme pomocí uvedených veličin. Hustotu zvukové energie je ale možné stanovit pouze díky některým požadavkům, které můžeme shrnout takto:

1. Velikost zvukové energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn. Z toho plyne, že se nelze zabývat vyšetřováním okamžitých hodnot amplitud a fází veličin charakterizujících zvukové pole.
2. Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně velká.
3. Všechny úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou stejně pravděpodobně zastoupeny.

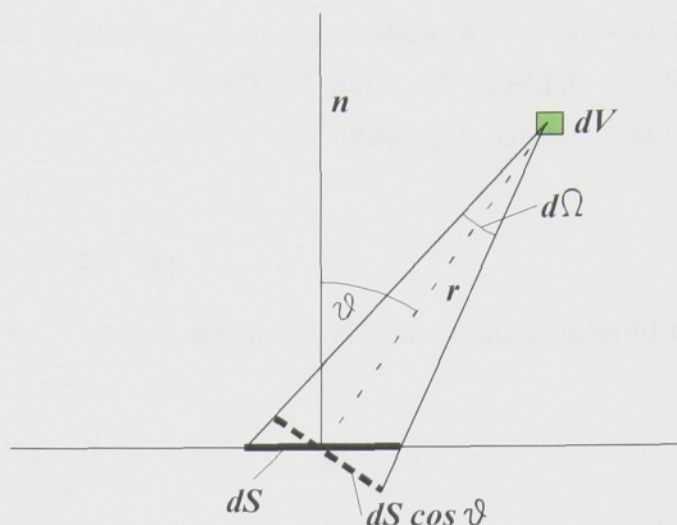
Ve skutečnosti ale nejsou vždy všechny uvedené předpoklady splnitelné. Přesto však má statistická teorie důležitou úlohu jak při výkladu akustických jevů ve velkých uzavřených prostorech, tak i při posuzování jejich kvality z akustického hlediska.

3.2.2 Hustota zvukové energie

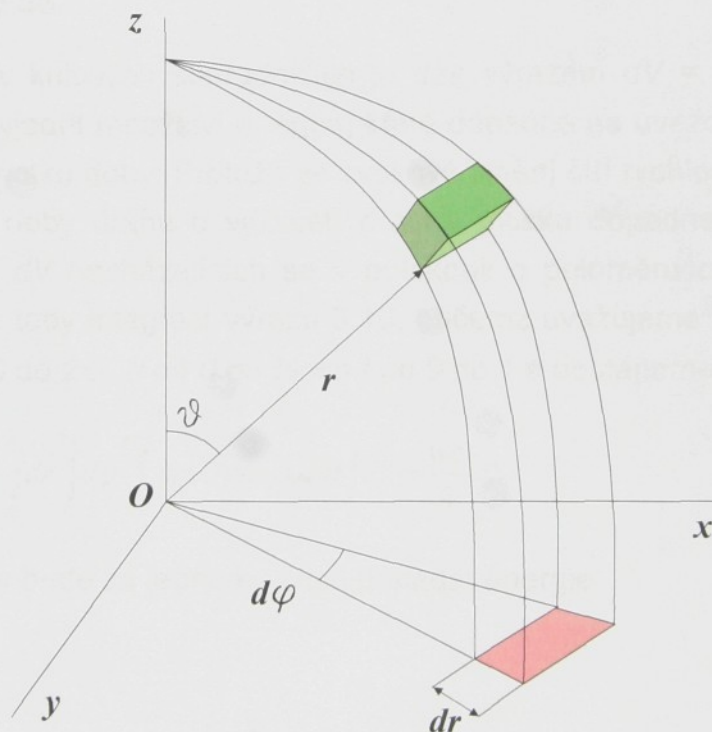
Hustota zvukové energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je závislá na energii, kterou vysílá zdroj zvuku, a na množství energie pohlcované stěnami ohraničujícími uzavřený prostor. Součet energie, která se nachází v prostoru a energie pohlcované stěnami se musí rovnat energii vysílané zdrojem zvuku. Označíme-li P výkon vysílaný zdrojem, P_s energii pohlcovanou stěnami za jednotku času, w hustotu zvukové energie v prostoru o objemu V , můžeme výkon P vyjádřit rovnicí

$$P = V \frac{dw}{dt} + P_s \quad (3.8)$$

Nyní je nutné vyjádření velikosti akustické energie pohlcované stěnami. Zvolme si na některé ze stěn, ohraničujících uzavřený prostor, plochu o velikosti dS viz obr. 3.4. Zkusme zjistit energii, která na plochu dS dopadá z libovolného elementu objemu dV .



Obr. 3.4. – Vyzařování zvukové energie z elementu objemu dV na plošku dS



Obr. 3.5. – Stanovení elementu objemu ve sférických souřadnicích

Je-li hustota zvukové energie v prostoru w , bude v objemu dV obsažena energie $w dV$. Vzhledem k třetímu předpokladu, musíme uvažovat o tom, že se tato energie šíří do všech směrů rovnoměrně. Kromě toho, že uvažovaný element objemu energii vyzařuje, do tohoto elementu z okolí také neustále energie dopadá, takže v ustáleném stavu bude dopadající i vyzařovaná energie stejně veliká.



Vzhledem k tomu, že prostorový úhel má velikost 4π , bude dopadat z objemu dV na plošku dS v prostorovém úhlu $d\Omega$ za dobu dt energie $w dV(d\Omega / 4\pi) dt$. Mezi prostorovým úhlem $d\Omega$ a ploškou dS platí, jak plyne z obr. 3.4. a z definice prostorového úhlu, vztah

$$r^2 d\Omega = dS \cos \vartheta \quad (3.9)$$

Dosadíme-li za $d\Omega$ do výrazu pro energii vyzařovanou z objemu dV dostaneme pro ni výraz

$$w dV \frac{dS \cos \vartheta}{4\pi r^2} dt \quad (3.10)$$

Obdobné řešení nalezneme i v kulových souřadnicích. Položíme počátek souřadného systému do plošky dS .

Element objemu v kulových souřadnicích je dán výrazem $dV = r^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dr$. Můžeme si nyní vyjádřit množství energie, které dopadne na uvažovanou plošku dS z jejího okolí za jednotku doby. Protože se zvukové vlnění šíří rychlostí c , urazí zvuková vlna za jednotku doby dráhu o velikosti c a na plošku dopadne energie ze všech elementů objemu dV nacházejících se v polokouli o poloměru c se středem v dS . Energii stanovíme tedy integrací výrazu 3.10, přičemž uvažujeme r v mezích od 0 do c , φ v mezích od 0 do 2π , ϑ od 0 do $\frac{1}{2}\pi$ a t od 0 do 1 a dostaneme

$$\frac{w dS}{4\pi} \int_0^c dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \vartheta \cos \vartheta d\vartheta \int_0^1 dt = \frac{wc}{4} dS \quad (3.11)$$

na jednotku plochy bude za jednotku času dopadat energie

$$\frac{wc}{4} \quad (3.12)$$

Vlastnosti stěny z hlediska pohlcování zvuku jsou definovány součinitelem akustické pohltivosti α , který je poměrem zvukové energie W_P pohlcené k energii W_d dopadající.

$$\alpha = \frac{W_P}{W_d} \quad (3.13)$$

Akustickou energii pohlcovanou stěnami můžeme s využitím součinitele akustické pohltivosti vyjádřit jako



$$P_s = \alpha \cdot S \cdot \frac{wc}{4} \quad (3.14)$$

Základní rovnice hustoty akustické energie v prostoru pak bude

$$P = V \frac{dw}{dt} + \alpha \frac{Sc}{4} w \quad (3.15)$$

Hustota zvukové energie v prostoru bude

$$w = \frac{4P}{c\alpha S} \left(1 - e^{-(c\alpha S)/(4V)t}\right) \quad (3.16)$$

3.2.3 Dozvuk, doba dozvuku a střední volná dráha zvukového paprsku

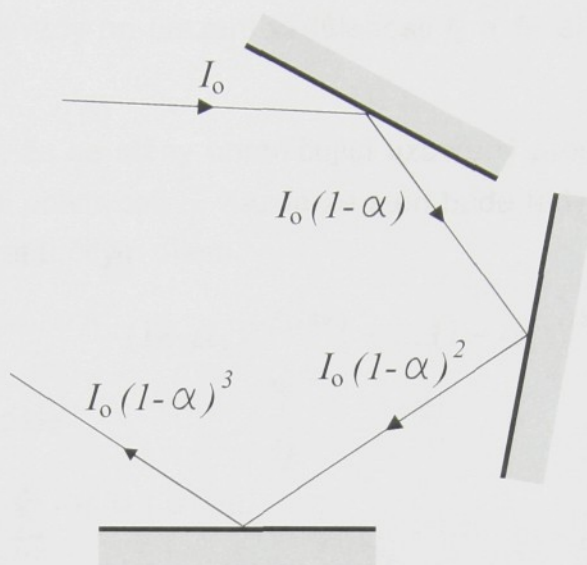
Jak již bylo popsáno výše, vyzařuje-li zvukový zdroj v uzavřeném prostoru akustický výkon P , bude mít v ustáleném stavu hustota zvukové energie hodnotu $w_0 = 4P/c \alpha S$, přestože je na jedné straně akustická energie neustále pohlcovaná stěnami je na straně druhé doplňována zdrojem zvuku. Jestliže v daném okamžiku vypneme zdroj zvuku, bude vlivem pohltivosti stěn energie zvukových vln v prostoru postupně ubývat, až bude úplně pohlcena. V uzavřeném prostoru se tedy ještě po vypnutí zvukového zdroje bude šířit zvuk a ten nazýváme dozvuk.

Dozvuk je velmi důležitým akustickým parametrem popisující samotný interiér. Abychom mohli dozvuk charakterizovat i kvantitativně, zavedeme si pojem doba dozvuku, která je definována jako doba, za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku v prostoru po vypnutí zvukového zdroje na 10^{-6} původní hodnoty.

3.2.4 Stanovení doby dozvuku

Akustická energie, šířící se uzavřeným prostorem, ubývá při každém odrazu o určitou hodnotu. Vzhledem k okamžitému úbytku energie spojené s odrazem, ubývá akustická energie tudíž po určitých kvantech. Na základě této skutečnosti lze odvodit vzorec doby dozvuku.

Budeme t' uvažovat za dobu, kterou zvuková vlna potřebuje, aby v uzavřeném prostoru urazila střední volnou dráhu l_s . Nechť je I_0 intenzita zvuku v okamžiku, kdy byl zdroj hluku vypnut. Počet odrazů, které vykoná zvuková vlna za dobu $t = kt'$, bude k . Na obrázku 3.6., je zobrazeno snížení přenášené energie při každém odrazu. Při každém odrazu od stěny s akustickou pohltivostí α poklesne intenzita přenášená paprskem $(1 - \alpha)$ krát.



Obr. 3.6. – Úbytek intenzity zvuku při odrazech od pohltivých stěn

Pro přenášenou intenzitu v době t' , $2t'$.. platí

$$\begin{aligned} I(t') &= I_0(1 - \alpha) \\ I(2t') &= I_0(1 - \alpha)^2 \\ &\dots \\ &\dots \end{aligned} \quad (3.17)$$

V libovolném okamžiku $t = kt'$ bude tedy platit

$$I(t) = I_0(1 - \alpha)^k = I_0(1 - \alpha)^{t/t'} = I_0(1 - \alpha)^{(cS/4V)t} \quad (3.18)$$

kde za $1/t'$ jsme dosadili výraz $1/t' = n = cS / 4V$. Tuto rovnici lze upravit, takže pro pokles intenzity zvuku dostaneme vztah

$$I = I_0 e^{-(bS/4V)[- \ln(1-\alpha)]t} \quad (3.19)$$

Dobu dozvuku dostaneme úpravou tohoto výrazu s podmínkou, že $I = 10^{-6} I_0$

$$T = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (3.20)$$

Tento vzorec je poměrně přesný a vyhovuje pro výpočet doby dozvuku v uzavřeném prostoru. O účinnosti tohoto výrazu se můžeme přesvědčit dosazením za $\alpha = 1$. V tomto případě skutečně vyjde doba dozvuku $T = 0$, což odpovídá skutečnosti.

Při odvození doby dozvuku jsme zavedli základní předpoklad, že k úbytku akustické



energie paprsku dojde vždy po urazení vzdálenosti l_s a že akustická energie je vždy snížena o α .

Předpokládejme proto, že se stěny ohraničující uzavřený prostor skládají celkem z n ploch s různými činiteli pohltivosti α . Každá ze stěn bude tedy ve výrazu pro intenzitu zvuku v době t přispívat určitým dílem.

$$I = I_0 (1 - \alpha_1)^{(cS_1/4V)t} \cdot (1 - \alpha_2)^{(cS_2/4V)t} \cdot \dots (1 - \alpha_n)^{(cS_n/4V)t} \quad (3.21)$$

Tuto rovnici upravíme dále

$$I = I_0 e^{\sum_{i=1}^n -(cS_i/4V)[- \ln(1-\alpha_i)]t} \quad (3.22)$$

a nakonec vyjádříme i samotnou dobu dozvuku

$$T = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (3.23)$$

3.3 Geometrická akustika

3.3.1 Náplň geometrické akustiky

Při odvozování vzorců pro dobu dozvuku v předcházející části jsem použil jisté předpoklady v šíření hluku. Ve skutečnosti s ohledem na tvar ohraničujících ploch nebývají tyto předpoklady vždy splněny. V prostoru mohou vznikat místa, kde dochází k zvýšené koncentraci odražených paprsků.

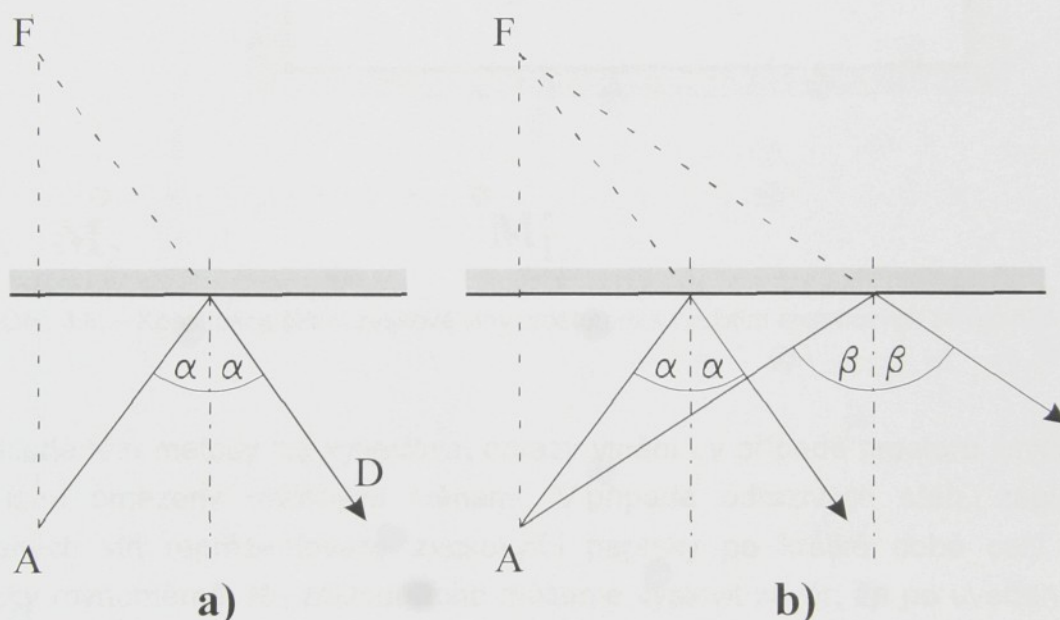
Akustické odvětví, které se obecně zabývá šířením zvukových paprsků vysílaných zdrojem, se nazývá geometrická akustika. Jejím oborem je řešení zvukových paprsků v prostoru, zjišťování dráhových a časových rozdílů mezi zvukem dopadajícím do uvažovaného místa přímo ze zdroje a zvukem odraženým. Závislost těchto poměrů má značný význam pro posuzování akustické kvality uzavřeného prostoru.

Při řešení odrazů zvukových vln můžeme sledovat šíření paprsku, tj. směr šíření zvukové energie a můžeme hledat tvar čela vlny v určitých okamžicích. Spojíme-li body prostoru, v nichž jsou částice prostředí, které zvukový impuls vyslaný zdrojem v určitém okamžiku právě začíná vychylovat z rovnovážné polohy, obdržíme plochu,

která se v našem případě běžně v praxi označuje za čelo vlny místo za vlnoplochu.

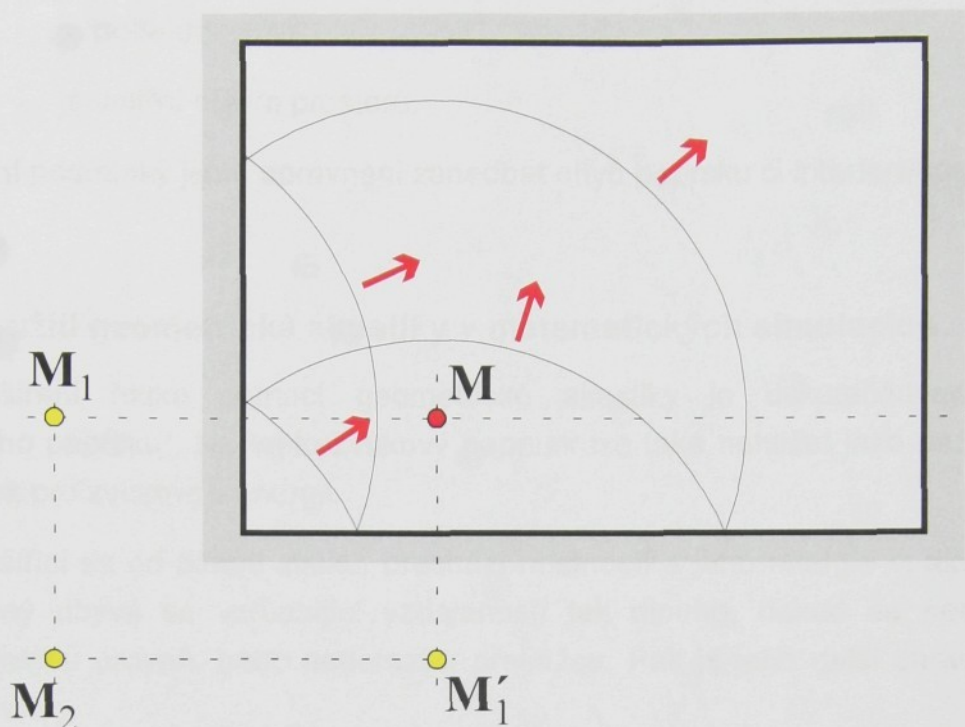
3.3.2 Odraz zvuku od rovinných ploch

V této části si ukážeme, jak se odráží jednotlivé zvukové paprsky od roviny. Pomocí těchto paprsků pak lze vytvořit čelo vlny. Odraz samotného paprsku lze řešit přesně podle zákonů optiky. Při řešení odrazu zvukového paprsku musíme předpokládat, že rozměry stěny budou mnohem větší než vlnová délka zvuku reprezentovaného paprskem. V případě, že by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by docházet k ohybu paprsku.



Obr. 3.7. – Konstrukce zvukového paprsku při odrazu od rovinné stěny

Na obr. 3.7.a je zobrazen jeden zvukový paprsek, který se šíří z bodu A a po odrazu od stěny se šíří z bodu D. Odražený paprsek můžeme sestavit pomocí zrcadlového obrazu F zdroje A. Posluchači v bodě D se tak může zdát, že zdroj hluku je umístěn za stěnou. Odražený paprsek se chová tak, jako by vycházel ze zdroje F, který nazýváme zrcadlový zdroj. Obdobným způsobem lze sestavit čelo vlny šířící se od zdroje hluku. Při řešení využijeme zrcadlové zdroje hluku.



Obr. 3.8. – Konstrukce šíření zvukové vlny prostorem s využitím zrcadlových zdrojů hluku

Na základě této metody lze vyšetřovat odrazy vlnění i v případě prostorů jiných tvarů, které jsou omezeny rovinnými stěnami. V případě odrazivých stěn, zaplní čela odražených vln reprezentované zvukovými paprsky po krátké době celý prostor prakticky rovnoměrně. Na základě toho můžeme vyslovit závěr, že po uvedení zdroje hluku do provozu se po chvíli zvuková energie rozdělí v prostoru celkem rovnoměrně.

3.3.3 Kritický kmitočet

Pro oddělení jevů řešených geometrickou akustikou je nutné vzít v úvahu zjednodušující předpoklad, podle kterého nás mohou zajímat jen řešené kmitočty splňující podmínku:

$$f > f_{\text{Schr}}$$

Schroeder odvodil kritický kmitočet f_{Schr} , nad kterým každý diskrétní budící signál vybudí řadu blízkých vlastních kmitů prostoru. Jejich vzdálenost od budícího kmitočtu má Gaussovske rozložení. Schroeder odvodil pro kritický kmitočet vztah :

$$f_{\text{Schr}} = 4000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3.24)$$



kde T je doba dozvuku
 V je vnitřní objem prostoru.

Při splnění podmínky jsme oprávněni zanedbat ohyb paprsku či interference vln.

3.3.4 Využití geometrická akustiky v matematických simulacích

Řešení šíření hluku pomocí geometrické akustiky je uskutečňováno pomocí „zvukového paprsku“. Na tento zvukový paprsek lze také nahlížet jako na transportní prostředek pro zvukovou energii.

Paprsek šířící se od zdroje zvuku, prochází místností a jeho energie či akustický tlak jím nesený ubývá se vzrůstající vzdáleností tak dlouho, dokud se neutlumí pod zanedbatelnou úroveň, nebo nedorazí k překážce. Pak je jeho další chování určeno její velikostí.

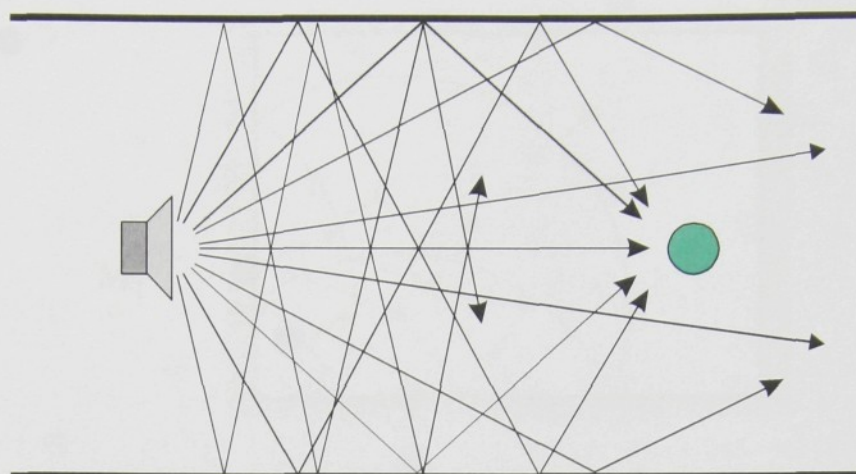
Vnitřní prezentace historie zvukového paprsku, se zaznamenává (metaechogram) od okamžiku jeho vygenerování do jeho zániku. Například: přehled stěn na kterých došlo k odrazu, energie paprsku a úhel dopadu, atd.

Dojde-li k odrazu, pak paprsek dále prochází prostorem dokud nedorazí k nové bariéře, k přijímači, nebo se neutlumí vlivem impedance prostředí.

Velikost energie odražené od konečné plochy závisí na vztahu mezi její velikostí a uvažovanou vlnovou délkou. Dokonalý odraz nastává na vysokých frekvencích (a pro tuhé, málo pohltivé překážky).

Ray-Tracing

Princip metody je velmi jednoduchý. Ze zdroje, například s kulovou vyzařovací charakteristikou, jsou vysílány paprsky. Paprsky se šíří řešeným prostorem dle pravidel uvedených v předchozích odstavcích a sleduje se, zda dorazí do určeného cíle – k posluchači.



Obr. 3.9. – Metoda Ray-Tracingu

Metody Ray-Tracingu využívají dva typy odrazu:

Spekulární odraz: v podstatě jde o zrcadlový odraz paprsku přesně dle zákonů optiky. Neuvažuje nerovnosti povrchu, avšak výpočet je velmi rychlý.

Difúzní odraz: respektují se drobné nerovnosti či členitosti povrchu překážek.

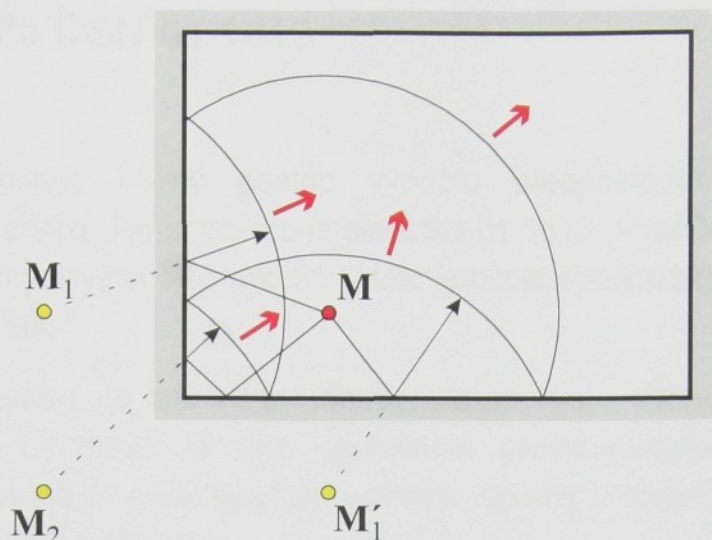
Výhodou Ray-Tracingu je především jednoduchost. Pro nekonečný počet vyslaných paprsků (tj. pro 100% pravděpodobnost zásahu) získáme stejné výsledky jako při metodě zrcadlových zdrojů, neboť žádný důležitý paprsek není opomenut.

Nevýhodou je neschopnost řešit vlnové jevy. Například se jedná o difrakci (ohyb) paprsků okolo překážek konečných rozměrů, či o interference. Další nevýhodou je skutečnost, že ne všechny trasy paprsků musí být nutně nalezeny.

Metoda zrcadlových zdrojů

Princip metody vychází z myšlenky, že při příjmu zvuku odraženého od překážky máme pocit, jakoby se zdroj zvuku nalézal za ní. Zrcadlením skutečného zdroje na ohraničujících plochách vznikají zrcadlové zdroje prvního řádu, jejich dalším zrcadlením vznikají řady vyšší. Jejich celkový počet narůstá exponenciálně s řádem odrazu. Pro lidské ucho nehraje roli, zda poslouchá zvuk zdroje, nebo jeho obrazu. Výpočet v některých programech probíhá v těchto krocích:

Vytvoří se množina všech možných obrazů zdrojů nalézajících se v místnosti (až do požadovaného řádu).



Obr. 3.10. – Metoda zrcadlových odrazů

Kontroluje se „viditelnost“ každého prvku této množiny z místa poslechu, protíná paprsek nějakou plochu uvnitř místnosti? První možností je vyslání malého množství paprsků (cca 1000), a kontroly jejich trasy. Druhou možností je analýza směru normálového vektoru každé plochy. Zdroj může být vidět jen pro ty plochy, jejichž normálový vektor míří ke zdroji (ten se musí nacházet na vnitřní, tedy odrazivé straně stěny). Někdy se tento proces nazývá „test validity obrazu“.

Následují testy pro vzdálenosti zdrojů. Tyto testy zabírají podstatnou část výpočetního času, ale jen díky nim se dá docílit lineární závislosti počtu zrcadlových zdrojů na řádu odrazu a nezávislosti na počtu omezujících ploch.

Výhodou metody je vysoká preciznost výpočtu. Další velikou výhodou je fakt, že polohy obrazů zdrojů nezáleží na poloze přijímače.

Nevýhodou je vykoupení této přesnosti vysokými nároky na výpočetní prostředky a čas. Vždy musíme volit řád odrazů s ohledem na členitost místnosti a výpočetní kapacitu, neboť nárůst počtu možných obrazů je pro klasickou metodu zrcadlových zdrojů exponenciální. Ani tato metoda neumožňuje řešit vlnové jevy (difrakce, difúze, interference).

Uvedený výčet nevýhod výše uvedených principů Ray-Tracingu a metody zrcadlových zdrojů však není úplný a nezahrnuje jednu v praxi požadovanou vlastnost vhodného algoritmu k řešení předpokládaného rozložení hladin hluku v interiérech. Touto nevýhodou je nemožnost aplikovat tyto metody na interiéry s předměty uvnitř interiéru.



4 Výpočet dle ČSN 01 1613

V současnosti existuje i jiný postup výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru. Tento postup je dle ČSN 01 1613 „Výpočet předpokládaných hladin hluku v průmyslových prostorech“. V této kapitole stručně popíši jak je prováděn výpočet dle této ČSN.

Na úvod poznamenám, že tato norma nedoznala od svého vydání žádných změn a nabyla účinnosti 1.1.1989. Již tato skutečnost předznamenává (a u norem a doporučených postupů to musí být) že veškeré výpočty v normě uvedené musí být spočitatelné i na běžné kalkulačce.

Výpočet předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru je prováděn ve zvoleném bodě. V samotné normě je i částečné doporučení, v kterých místech by měl být výpočet prováděn a v kterých místech je díky použité metodice výpočtu dosaženo minimální možné chyby.

4.1 Volba metody

ČSN 01 1613 zahrnuje dvě odlišné metody výpočtu, metodu technickou a metodu provozní.

Technická metoda je přesnější než metoda provozní a umožňuje provádět výpočet předpokládaných hladin akustického tlaku i v oktávových pásmech se středními kmitočty od 63 Hz do 8 kHz, ze kterých se pak stanovuje celková hladina hluku A.

Provozní metoda umožňuje výpočet pouze v celkové hladině A.

Rozdílná však není jen možnost výpočtu v oktávách u technické metody, ale i celková přesnost metody. Udávaná chyba technické metody je cca. 1,9 dB a chyba metody provozní je 3 dB. Z tohoto důvodu bude nadále popsán pouze princip technické metody.

4.2 Činitele rozptylu

Výpočtovým prostorem se rozumí prostor ve tvaru kvádru, s možnou korekcí na jiný půdorys či nerovinnou konstrukci střechy. Dopadá-li zvuková vlna na nějaký předmět (stroj, technologické nebo pomocné zařízení), část vlny se odchýlí od svého původního směru. Tímto je definován rozdíl mezi skutečnou vlnou a vlnou, která by byla v daném místě bez přítomnosti předmětu, jako rozptýlená vlna. Tento rozptyl je



frekvenčně závislý a se stoupající frekvencí je rozptylováno větší množství energie. Normovaný činitel rozptylu těles charakterizuje střední rozptyl zvuku na zaplnění celého prostoru a vypočte se

$$\sigma_{nt} = \frac{\sum_{j=1}^{n_t} S_{tj}}{4 \cdot l \cdot b} \quad (4.1)$$

kde S_{tj} je plošný obsah j-tého rozptylového tělesa ve tvaru opsaného kvádrů

n_t je celkový počet rozptylových těles

l a b jsou rozměry obrysového kvádrů vnitřního prostoru

Normovaný činitel rozptylu stěn charakterizuje střední hodnotu rozptylu zvuku na obvodových stěnách, podlaze a stropu, který je způsobený jejich impedančními nehomogenitami a nerovnoměrnostmi. Určuje se podle rovnice

$$\sigma_{ns} = \xi \frac{S_V}{4 \cdot l \cdot b} \quad (4.2)$$

kde ξ je činitel nehomogenit a nerovností obvodových stěn, podlahy a stropu

S_V je celkový plošný obsah obrysového kvádrů.

4.3 Útlum hluku ve vzduchu

Při šíření hluku od zdroje k posuzovanému místu, dochází v důsledku různých fyzikálních procesů k poklesu energie zvukových vln. Mezi základní ztrátové procesy patří i pohlcování zvuku ve vzduchu. Míra pohltivých vlastností prostředí se vyjadřuje takzvaným součinitelem útlumu ve vzduchu.

Tento útlum je přisuzován přeměně části zvukové energie na teplo při šíření zvuku ve vzduchu a je způsobován dvěma základními principy, klasickou pohltivostí a molekulovou pohltivostí. Celkový součinitel útlumu zvuku ve vzduchu je pak dán součtem jednotlivých součinitelů, odpovídajícím těmito dvěma principům pohltivosti. Ztráty způsobené klasickou pohltivostí jsou převážně spojeny se změnami zvukové energie v teplo základními přenosovými vlastnostmi plynu.

4.4 Frekvenční omezení řešení

Jedním ze základních předpokladů výpočtu je monotónní rozložení zvukového pole. Monotónní v tom smyslu, že při malé změně polohy místa výpočtu nebo změně frekvence nebude měřený akustický tlak vykazovat velké změny. To znamená, že



předpokládáme dostatečnou hustotu vlastních kmitů. Tato hustota vlastních kmitů byla popsána v kapitole 3.1.

Na základě výše uvedeného je v normě uvedena rovnice, která určuje nejnižší možný uvažovaný střední kmitočet oktavového pásma,

$$f_{sd} = 125 \cdot \left(\frac{V}{40} \right)^{1/3} \quad (4.3)$$

kde V je objem místnosti.

Tento vzorec vychází z poznatků získaných praxí.

4.5 Výpočtový model

Výpočet je založen na kombinaci přímého a difúzního zvukového pole a vychází z předpokladu, že ve velké části řešeného interiéru existuje difúzní zvukové pole, které je homogenní. Tento předpoklad však není v reálných průmyslových prostorách splňován, protože hladina akustického tlaku klesá se vzdalováním od zdroje hluku.

Výpočtový model použitý v normě ČSN 01 1613 je založen na modelech geometrické a statistické akustiky.

Model založený na geometrické teorii předpokládá šíření zvukových paprsků a jejich odrazu známého z principů optiky. Tento postup řešení však nezahrnuje vliv zaplnění řešeného prostoru a proto je velmi zjednodušující. Tento model zanedbává i případné nehomogenity na stěnách. Vzhledem k velkým zjednodušením tohoto geometrického modelu, je samotný model nevhodný. Ve výsledném vztahu je celý tento model reprezentován i vloženým útlumem D .

Tento vložený útlum představuje minimální útlum vzniklý bariérovým efektem mezi zvoleným zdrojem hluku a posuzovaným bodem v průmyslovém interiéru. Samotný výpočet vloženého útlumu není v ČSN 01 1613

Statistický model vychází z řešení tvarově idealizovaného prostoru a tomu podřizuje rozměry prostoru, tvary zdrojů a těles uvnitř řešeného prostoru. Tento model principiálně pracuje na rozdíl od geometrického modelu s vnitřními tělesy, ale uvažuje jen pohltivosti a rozptyly způsobené těmito tělesy. Použití samotného statistického modelu je proto pro běžné průmyslové interiéry se zastavěným interiérem také nevhodné.

Vzhledem k tomu, že ani jeden z uvedených modelů není pro výpočet samostatně



vhodný je použit model kombinující oba dva výše zmíněné modely. Model založený na teorii geometrické akustiky byl s výhodou použit při zahrnutí vlivu stěn prostoru a zahrnutím vloženého útlumu. Model založený na teorii statistické byl využit při popisu vlivu zaplnění prostoru a nehomogenit na stěnách prostoru. Tento kombinovaný model je relativně výhodný, protože je jednoduchý a velmi obecný.

Kombinovaný model je vyjádřen tímto vztahem

$$L = L_w + 10 \log \left[\frac{Q S_o}{4\pi r^2} \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_n}{h} + k_r\right)r} + S_o \cdot C \right] - D \quad (4.4)$$

kde	Q	je činitel směrovosti
	S_o	je 1m^2
	r	je vzdálenost těžiště obrysového kvádru zdroje hluku od místa výpočtu
	σ_n	je součin normovaného činitele rozptylu těles a normovaného činitele rozptylu stěn
	h	je výška řešeného prostoru
	k_r	je korekce na rozptyl
	C	je člen vyjadřující přírůstek akustické energie vlivem odrazů a rozptylů
	D	je vložený útlum způsobený stínícím účinkem vnitřních těles

První člen v závorce představuje příspěvek energie zvukových vln, které se ještě neodrazily na obvodových stěnách, podlaze a stropu. Druhý člen představuje příspěvek akustické energie tvořené zvukovými vlnami, které se alespoň jednou odrazily a příspěvek zvukové energie vln rozptýlených na předmětech umístěných v prostoru, popř. na stěnách.

4.6 Zdroje hluku

Všechny zdroje hluku používané pro řešení dle ČSN jsou, vzhledem k jistým zjednodušujícím parametrům, vždy uvažovány jako bodové. Vzhledem k možným velkým rozměrům zdroje je pak samotný bod, místo ze kterého se šíří akustická energie do řešeného interiéru, umístěn do tzv. ekvivalentního akustického středu „EAC“. Akustickým parametrem pro popis bodového zdroje je pouze akustický výkon L_w , činitel směrovosti Q a provozní parametry zdroje, jako jsou vytíženost a doba provozu zdroje hluku.



4.7 Nevýhody řešení podle ČSN 01 1613

Některé nevýhody metody výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru dle ČSN 01 1613 již byly zmíněny v předcházející části této kapitoly. Tyto nevýhody nejsou chybou metody používané v normě a pramení hlavně z velké řady nutných zjednodušení. Tato zjednodušení musela být zavedena v době návrhu normy, vzhledem k nutné snadnosti výpočtu.

Níže uvedené nevýhody metodiky jsou závislé na koncepci konkrétního řešeného průmyslového interiéru a na akustických vlastnostech posuzovaného zdroje hluku. Mezi hlavní nevýhody řešení dle ČSN patří zejména:

- řešení je omezeno na obdélníkový půdorys interiéru
- použití pouze bodových zdrojů hluku
- nedostatečný popis směrového vyzařování zdroje
- nedostatečný popis zdroje hluku pouze akustickým výkonem
- výpočet předpokládá, že je v celém interiéru jakási průměrná pohltivost stěn a vnitřních těles

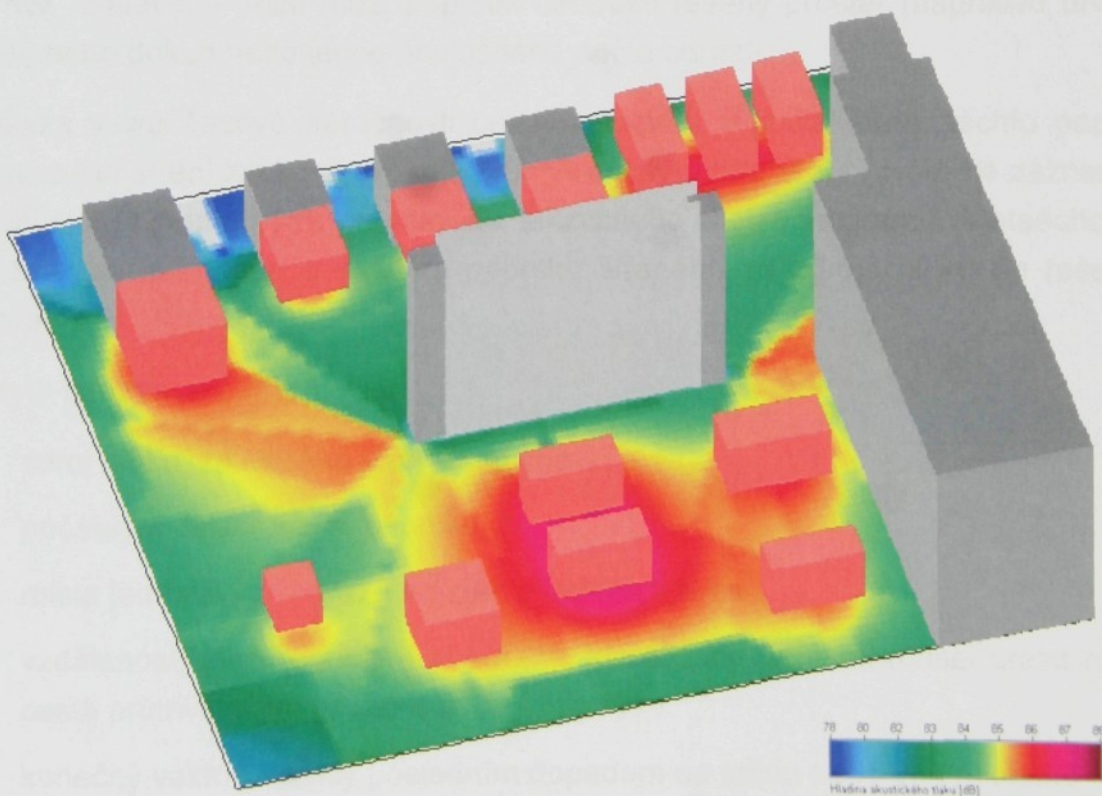
Samotný výpočet dle ČSN je ale v podstatě také velmi komplikovaný. Tato komplikovanost je právě díky výpočtu vloženého útlumu D mezi zdrojem a posuzovaným místem, kde je nutné nalézt minimální vložený útlum.

5 Popis navrhované metody

Mnou navržený postup výpočtu šíření akustické energie v průmyslovém interiéru je založen jen na principech geometrické akustiky. Šíření akustické energie řeší pomocí „zvukového paprsku“, jako jejího nositele. Ze zdroje hluku se šíří velké množství těchto paprsků a na základě jejich sledování, respektive na jejich šíření v řešeném prostoru, jsou následně vypočteny předpokládané hladiny akustického tlaku.

Pro oddělení jevů, které lze touto metodou řešit, je nutné vzít v úvahu zjednodušující předpoklad, podle kterého nás mohou zajímat jen řešené kmitočty splňující tzv. Schroederovu podmínku viz. 3.3.3.

Mnou navržená metoda řešení šíření hluku je vhodná pro obecné interiéry. Budu však vše popisovat pouze na průmyslovém interiéru a to z důvodu, že v interiérech využívaných k jiným účelům by bylo nutné hodnotit např. i dobu dozvuku, možnou ozvěnu, srozumitelnost řeči a další akustické vlastnosti zajišťující příjemné akustické prostředí.



Obr. 5.1. – Ukázka výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru



Mnou navržená metoda, je výhodná v tom, že částečně eliminuje vliv ohybu paprsku způsobený tvarem interiéru a vnitřními tělesy v něm. Mnou navržená metoda také, jako ostatní metody geometrické akustiky, zanedbává možnou interferenci vln v řešeném průmyslovém interiéru.

Velmi stručně lze celou navrženou metodu popsat níže uvedeným popisem, který se bude zabývat jedním paprskem.

Z uvažovaného zdroje hluku se šíří paprsek. Paprsek, prochází interiérem a vhodnými algoritmy se hledá první místo jeho odrazu. Tímto místem odrazu může být dělící prvek interiéru (stěna nebo i otvor), vnitřní těleso v interiéru reprezentované např. vnitřní zástavbou nebo i akustickou bariérou, ale i dalším zdrojem hluku u nějž uvažujeme s jeho rozměry. Po nalezení tohoto místa zjistíme příslušnost bodu odrazu k vnitřnímu tělesu nebo ke stěně, provedeme rozbor akustických vlastností v daném bodě odrazu a vyřešíme samostatný odraz paprsku. Dle akustických vlastností tělesa v bodě odrazu vypočteme i snížení akustické energie nesené dále paprskem a ubývající s jednotlivými odrazy a se vzrůstající vzdáleností.

Výše uvedený postup provádíme do té doby, dokud energie přenášená paprskem není nižší než nastavená dolní mez, paprsek neopustí řešený prostor (například otvorem v plášti) nebo dokud nedosáhne příslušného počtu odrazů.

Z hlediska velké časové náročnosti celého procesu výpočtu šíření těchto paprsků, reprezentující šíření zvukové energie průmyslovým prostorem, provádíme záznam dat souvisejících s jednotlivými paprsky do takzvaného metaechogramu. Metaechogram pak obsahuje informace o každém paprsku šířeného ze zdroje hluku do řešeného prostoru.

Mezi tyto informace patří:

- zdroj hluku, ze kterého paprsek vychází
- počáteční vektor šíření paprsku
- místa jednotlivých odrazů od stěn a vnitřních těles
- vzdálenosti mezi jednotlivými odrazy, které daný paprsek musel urazit na své cestě průmyslovým interiérem
- konečný vektor, vzniklý posledním dopadem na stěnu nebo vnitřní těleso



Údaje uložené v metaechogramu každého paprsku jsou ukládány pro možnost jejich dalšího využití v následných rozborech a výpočtech.

Pomocí výše uvedeného postupu je prováděno řešení šíření jednotlivých paprsků průmyslovým interiérem.

Jak jsou však vyhodnocovány předpokládané hladiny hluku v celém průmyslovém interiéru?

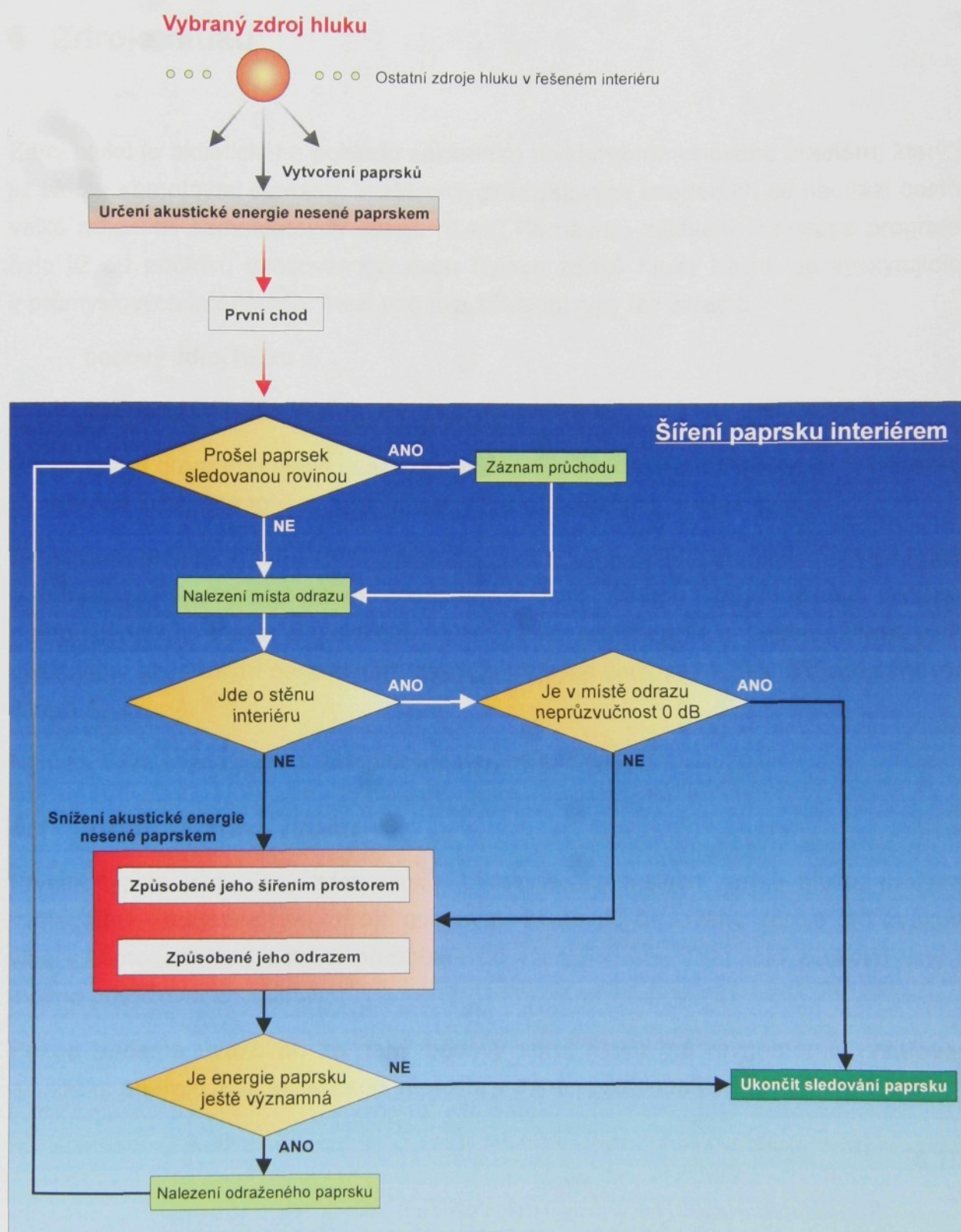
Tyto předpokládané hladiny akustického tlaku se vyhodnocují v předem definované rovině (rovinách) např. v určité výšce nad podlahou. Během sledování míst, kde dojde k odrazu paprsku se totiž sleduje i průnik paprsku řešenou (posuzovanou) rovinou. Místo jednoho posluchače v řešeném interiéru je při použití mnou navržené metody sledována celá rovina rozdělená do sítě s předem definovanou hustotou buněk.

Posluchačem, se kterým pracují i výše zmíněné metody geometrické akustiky jsou pak jednotlivé buňky této sítě v řešené rovině.

Výhodou mnou navržené metody je, že nehledáme pouze paprsky, které dospějí po n odrazech od stěn do místa posluchače, ale využíváme všechny vzniklé paprsky u daného zdroje hluku. Oproti klasickým metodám geometrické akustiky tak můžeme snadno řešit i velmi členité interiéry s velkým množstvím vnitřních těles.

Nevýhodou je neschopnost řešit vlnové jevy. Například se jedná o difrakci (ohyb) paprsků okolo překážek konečných rozměrů, či o interference. Ohyb paprsků je částečně eliminován takzvaným „prvním chodem“ viz. kapitola 7.

Celý postup je zobrazen i na následujícím vývojovém diagramu. Vývojový diagram zobrazuje šíření paprsku z jednoho vybraného zdroje hluku po řešeném průmyslovém interiéru.



Obr. 5.2. – Vývojový diagram zobrazující navrženou metodu výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru



6 Zdroje hluku

Zdroj hluku je akustického pohledu základním prvkem průmyslového interiéru, který je již tvořen samotnými stěnami. V běžných průmyslových interiérech se nachází často i velké množství samostatných zdrojů hluku. Při návrhu základní koncepce programu bylo již od počátku uvažováno o dvou typech zdrojů hluku běžně se vyskytujících v průmyslových interiérech. Mezi tyto dva základní typy lze zařadit:

- bodový zdroj hluku
- liniový zdroj hluku

Při vytváření programu nebyl uvažován plošný zdroj hluku, jehož výskyt není tak častý. Dodatečná integrace tohoto typu zdroje hluku do algoritmu je však možná.

Akustickou energii vyzařovanou z posuzovaného zdroje hluku popisujeme frekvenčně a to třetino-oktávovým spektrem. Vzhledem k formě výstupu, který požaduje vyčíslení předpokládaných hladin akustického tlaku v celkových hladinách, budou i zdroje hluku uvažovány akustickým parametrem zastupující jejich celkové hladiny vážené váhovým filtrem A.

Nyní se blíže seznámíme s jednotlivými typy zdrojů hluku.

6.1 Bodový zdroj hluku

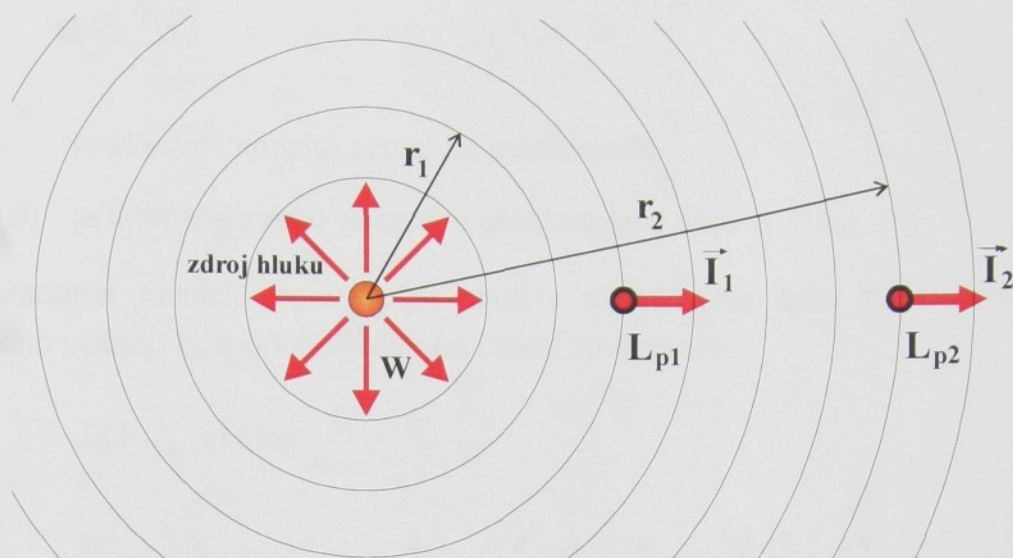
Prvním typem je bodový zdroj hluku. U rozměrově malých zdrojů hluku, můžeme vzhledem k vzdálenosti od zdroje uvažovat, že se od bodového zdroje šíří zvuková vlna v homogenním prostředí přímočaře do všech směrů. Tvar této zvukové vlny je možno považovat za kulový.

Pokud budeme uvažovat, že daný bodový zdroj hluku má rovnoměrné vyzařování akustické energie, pak akustickou intenzitu v dané vzdálenosti od zdroje vypočteme:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (6.1)$$

kde W je akustický výkon daného zdroje

r poloměr kulové plochy (vzdálenost od zdroje)



Obr. 6.1. – Šíření akustické energie od bodového zdroje hluku

Akustická intenzita se mění nepřímo úměrně v závislosti na velikosti kuloplochy, resp. v závislosti na poměru kvadrátu vzdáleností

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (6.2)$$

Pro větší vzdálenost od zdroje můžeme za poměr akustických intenzit dosadit poměr kvadrátů akustických tlaků. Pak dostaneme rovnici, pro výpočet hladiny akustického tlaku ze známé hladiny akustického výkonu L_w

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} \quad (6.3)$$

kde L_p je hladina akustického tlaku ve vzdálenosti r od bodového zdroje.

Hladinu akustického tlaku v bodě 2 lze ze znalosti hladiny akustického tlaku v bodě 1 vypočíst dle:

$$L_{p2} = L_{p1} + 20 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (6.4)$$

Vztah 6.3 lze upravit s přihlédnutím na činitel směrovosti Q definován

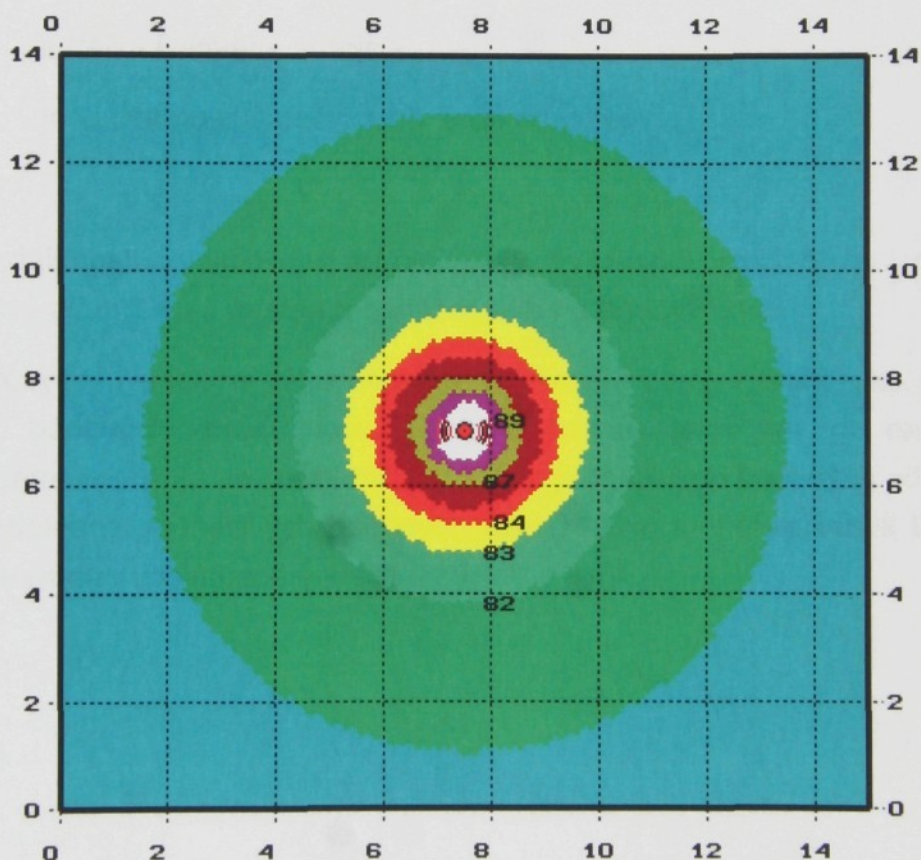
$$Q = \frac{I(\vartheta)}{I_m} \quad (6.5)$$

kde I_m je střední intenzita zvuku na měřicí ploše

$I(\vartheta)$ je intenzita zvuku ve směru prostorového úhlu ϑ

Pak dostaneme rovnici, pro výpočet hladiny akustického tlaku ze známé hladiny akustického výkonu L_w s přihlédnutím na činitel směrovosti

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (6.6)$$



Obr. 6.2. – Rozložení předpokládaných hladin hluku v interiéru od bodového zdroje zvuku

6.2 Liniový zdroj hluku

Druhým typem zdroje hluku, který jsem do výpočtového algoritmu zapracoval je liniový zdroj hluku, reprezentující například: válečkové dopravníky, hlučná potrubí, různé šnekové podavače velkých délek atd.



Při návrhu tohoto typu zdroje hluku jsem vycházel z požadavku [1], dle kterého pro liniový zdroj hluku platí, že hladinu akustického tlaku v bodě 2 lze ze znalosti hladiny akustického tlaku v bodě 1 vypočíst

$$L_{p2} = L_{p1} + 10 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (6.7)$$

Pro blízkou vzdálenost od liniového zdroje hluku můžeme hladinu akustického tlaku v bodě ze známé hladiny akustického výkonu L_w vypočíst jako

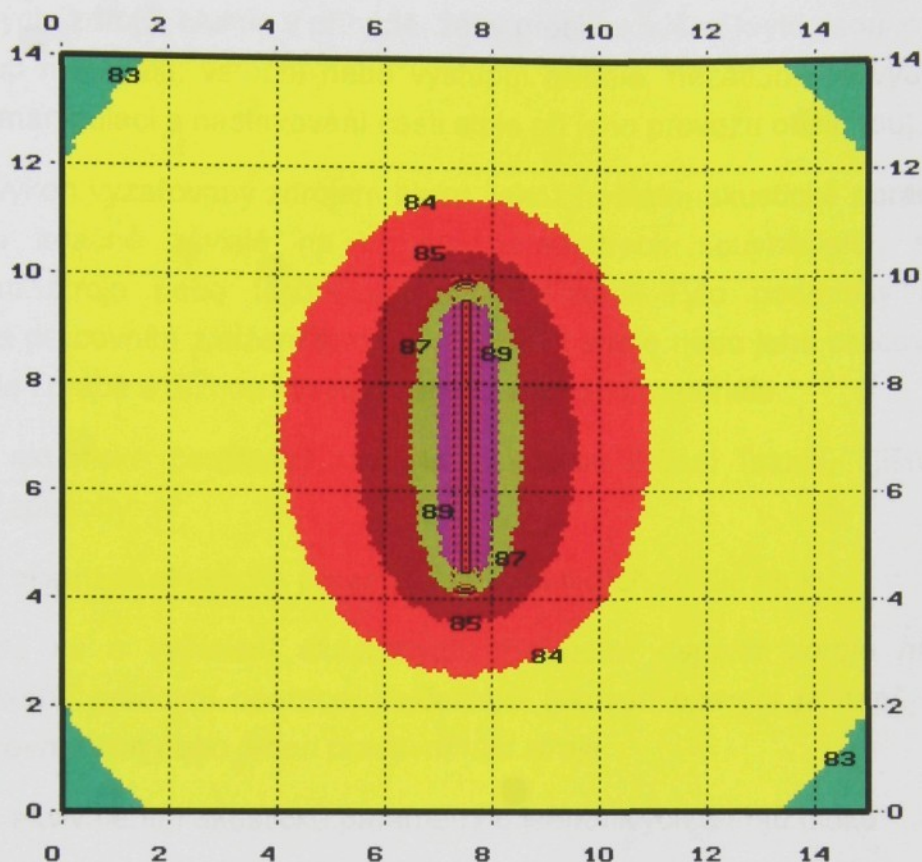
$$L_p = L_w + 10 \log \left(\arctg \frac{a}{d} \right) - 10 \log 4\pi a d \quad (6.8)$$

kde a je délka liniového zdroje

d je vzdálenost výpočtového bodu od zdroje

Ve větší vzdálenosti od liniového zdroje hluku z výsledků vyplývá, že i na tento typ zdroje (liniový zdroj) hluku můžeme nahlížet jako na bodový zdroj.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem lze liniový zdroj vytvořit jako posloupnost jednotlivých bodových zdrojů hluku. Tento princip je velmi snadno realizovatelný. Důležitým parametrem je pouze akustický výkon jednotlivých bodových zdrojů hluku a zejména vzdálenost jednotlivých bodových zdrojů hluku tvořící navenek liniový zdroj. Tyto dva parametry spolu úzce souvisí.



Obr. 6.3. – Rozložení předpokládaných hladin hluku v interiéru od liniového zdroje zvuku

6.3 Akustické vlastnosti zdroje

Z hlediska zjišťování hlukové situace, v řešeném průmyslovém interiéru, je nejobjektivnějším parametrem popisujícím množství akustické energie, šířící se od daného zdroje, akustický výkon. Akustický výkon je vhodnou veličinou nejen vzhledem k „jednočíselnému (pokud není celá situace řešena např. po zlomcích oktáv)“ vyjádření, ale i k jeho snadnému zjištění příslušným měřením. Akustický výkon je také často jedinou veličinou udávanou v prospektech a manuálech ke strojům. Této skutečnosti lze například využít například k zadání akustických parametrů stroje do hlukové studie ve fázi zvažování jeho nákupu.

V případě, že jsme při vytváření akustické studie schopni provádět měření akustické intenzity, bude pro nás vhodnější, popsat zdroj hluku např. pomocí obalového kvádru nebo polokoule s naměřenými hodnotami akustické intenzity na těchto obalových plochách. Tento postup je vhodný zejména u zdrojů hluku, u kterých dochází při jejich provozu k výraznému směrovému vyzařování hluku. Tento postup je také vhodný u již



zakrytovaných zdrojů hluku, v případě že v protihlukovém krytu jsou otvory (vstup nebo výstup materiálu, vstupní nebo výstupní hřídele, nezatlumená výdech větrání, otvory pro manipulaci a nastavování části stroje při jeho provozu obsluhou).

Akustický výkon vyzařovaný zdrojem hluku, jakož i ostatní akustické parametry zdroje hluku jsou značně závislé na mnoha parametrech souvisejících s pracovními podmínkami stroje nebo technologického zařízení. Tyto podmínky lze vymezit zejména na pracovním zatížení stroje, opotřebení stroje nebo jeho pracovních částí a nástrojů, ale i práce s různou kvalitou zpracovávaného materiálu.

Jednotlivé akustické parametry lze pro samotnou řešení (studii) zjišťovat dvěma základními způsoby:

- a) jako okamžité akustické parametry u jednotlivých zdrojů hluku

Jedná se o vyčíslení akustických parametrů daného zdroje hluku během konkrétní pracovní operace, nejčastější takovou operací je např. nejhluchnější pracovní úkon nebo jeden pracovní takt stroje.

- b) jako ekvivalentní akustické parametry u jednotlivých zdrojů hluku

Jedná se o vyčíslení ekvivalentních akustických parametrů daného zdroje hluku během určité doby. Typickou dobou pak může být například pracovní směna. Výsledné ekvivalentní hladiny lze pak snadno vypočítat např. podle:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{1}{t_{\text{celk}}} \cdot \left(t_{\text{zatez}} \cdot 10^{0,1 \cdot L_w \text{ zatez}} + t_{\text{odlehcen}} \cdot 10^{0,1 \cdot L_w \text{ odlehcen}} \right) \quad (6.9)$$

kde L_w je zjišťovaná hladina akustického výkonu

t_{celk} je doba provozu daného zdroje

t_{zatez} je doba po kterou z doby provozu daný stroj pracuje v zatížení

t_{odlehcen} je doba po kterou z doby provozu daný stroj pracuje v odlehčeném

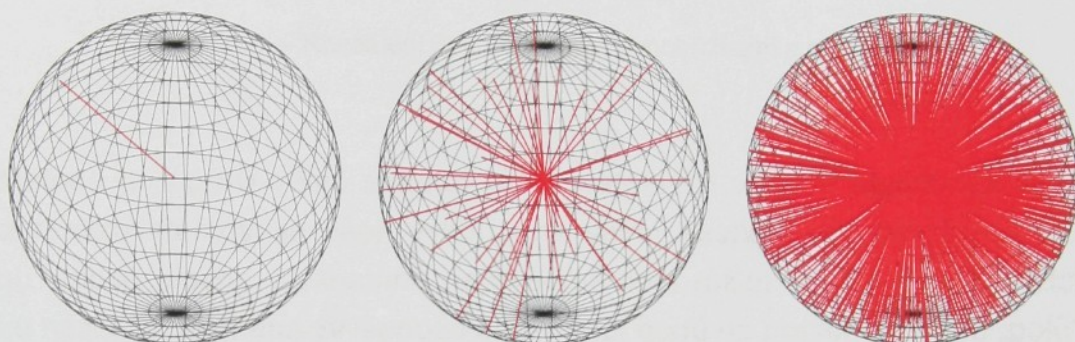
režimu. Musí přitom platit že $t_{\text{zatez}} + t_{\text{odlehcen}} = t_{\text{celk}}$

$L_w \text{ zatez}$ je akustický výkon daného zdroje v zatíženém stavu

$L_w \text{ odlehcen}$ je akustický výkon daného zdroje v odlehčeném stavu

6.4 Pohled geometrické akustiky na zdroj hluku

Zdroj hluku si lze v geometrické akustice představit např. jako bod s kulovou vyzařovací charakteristikou (liniové zdroje hluku jsou pak složením bodových zdrojů hluku s částečně omezenou vyzařovací plochou). Ze středu této koule jsou vyzařovány paprsky reprezentující šíření akustické energie. Počáteční bod každého paprsku je ve středu koule a druhý bod tvoří body na povrchu koule.



Obr. 6.4. – Vyzařované paprsky z bodového zdroje hluku

Pro vytvoření dostatečně přesného matematického modelu popisujícího zdroj hluku je nutné, aby byl bodový zdroj hluku popsán pomocí 10.000 až cca. 750.000 tisíc paprsků. Počet těchto paprsků pak není určován samotným zdrojem hluku nýbrž členitostí interiéru, ve kterém se daný zdroj hluku nachází.

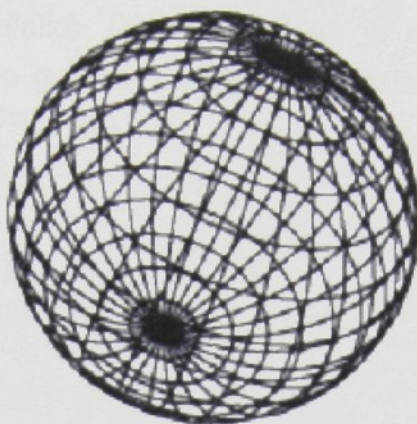
Jak však co nejrychleji určit body na samotném povrchu kulové plochy? Vhodný postup si ukážeme v následující části.

Na tomto místě je nutné si uvědomit, že potřebný počet paprsků k popsání zdroje hluku je značný, ale přesná poloha paprsku na povrchu není důležitá. Nejdůležitější je však co možná nejrovnoměrnější rozložení těchto paprsků na povrchu kulové plochy.

Existují dva přesné způsoby jak rozdělit povrch kulové plochy.

6.4.1 Přesné metody - první způsob

První způsob rozděluje povrch koule stejným způsobem jako zemi dělí poledníky a rovnoběžky, viz následující obrázek.

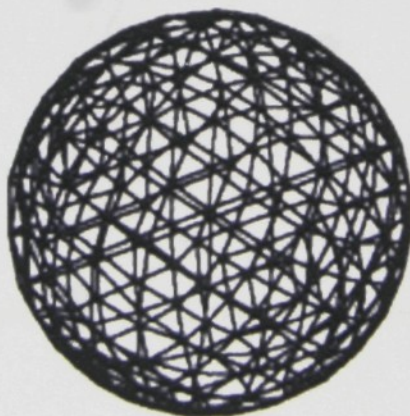


Obr. 6.5. – Rozdělení povrchu koule rovnoběžkami a poledníky

Tato metoda je v praxi velmi snadno realizovatelná a vhodný algoritmus je snadný. Rychlá realizovatelnost je však vykoupena velmi nevhodným rozložením bodů na povrchu kulové plochy. Významná nerovnoměrnost rozložení bodů je z předchozího obrázku názorná, zejména zvýšenou koncentrací bodů na povrchu u obou „pólů“.

Z hlediska velmi výrazné nerovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky nevhodná.

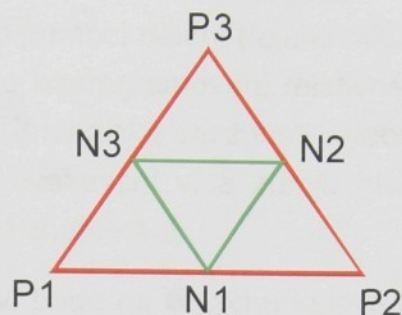
6.4.2 Přesné metody - druhý způsob



Obr. 6.6. – Rozdělení povrchu koule pomocí trojúhelníků

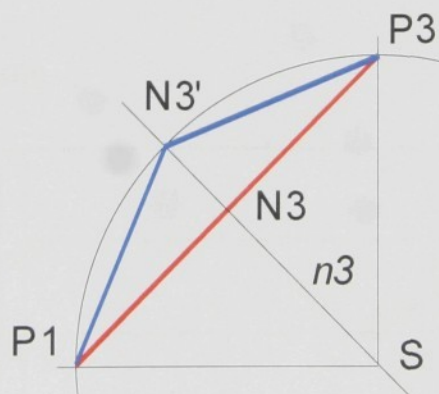
Druhý způsob, jak rovnoměrně rozdělit povrch kulové plochy, je založen na postupném dělení trojúhelníků. První trojúhelníky jsou dány např. body ve kterých protínají osy x , y a z povrch koule. Tím nám vzniká prvních šest bodů a takto lze

vytvořit prvních osm trojúhelníků. Druhým krokem je rozdělení těchto trojúhelníků. Každý trojúhelník lze snadno rozdělit na čtyři. Na následujícím obrázku je rozdělení „původního“ trojúhelníku P_1, P_2, P_3 .



Obr. 6.7. – Rozdělení trojúhelníka

Body „nového“ trojúhelníku N_1, N_2, N_3 jsou středy stěn předchozího trojúhelníku. Nyní vytvoříme tři vektory n_1, n_2 a n_3 . Tyto vektory mají počátek ve středu koule a procházejí body N_1, N_2 a N_3 . Pomocí těchto vektorů vypočteme polohu bodů N_1', N_2' a N_3' jako průsečíky vektorů SN s povrchem koule. Nové trojúhelníky jsou pak tvořeny pouze body na povrchu koule, viz následující obrázek.



Obr. 6.8. – Vytvoření bodu na povrchu koule z rozděleného trojúhelníka

Po prvním dělení tak dostaneme z původních šesti bodů na povrchu bodů 18, respektive z prvních osmi trojúhelníků jich dostaneme 32.

Tento postup je v cyklu opakován a po určitých kvantech narůstá i počet rovnoměrně rozložených bodů na povrchu kulové plochy. Postup dělení je prováděn vždy pro všechny trojúhelníky až do požadované hustoty bodů na povrchu koule.



Tato metoda rovnoměrného dělení kulové plochy je velmi dobrá a body na povrchu kulové plochy reprezentující paprsky šíření akustické energie z bodového zdroje hluku jsou rozmístěny opravdu rovnoměrně.

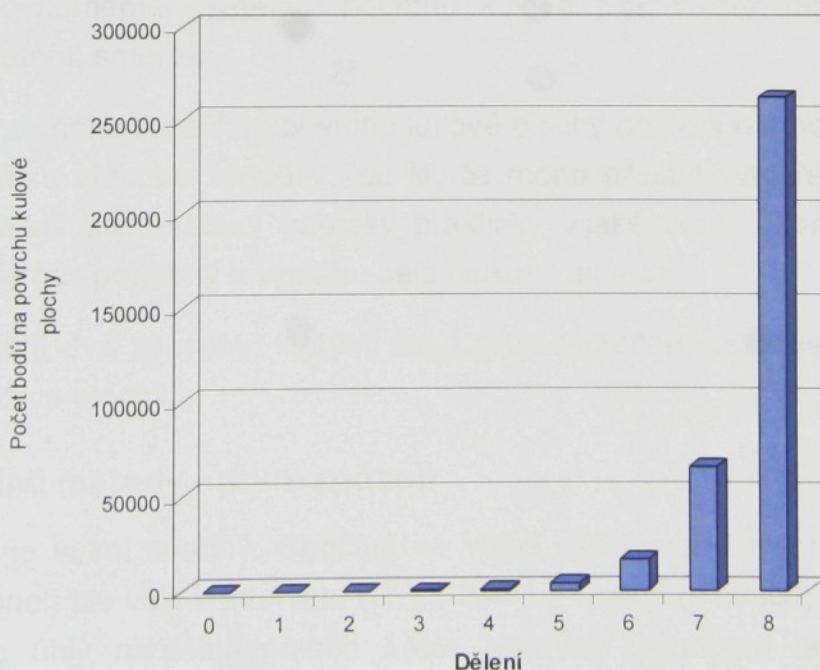
Metoda rovnoměrného dělení pomocí dělení trojúhelníků má ale i své nevýhody. Mezi největší nevýhodu patří mimo naprogramování relativně složitějšího algoritmu i doba potřebná k tomuto výpočtu. Z hlediska možností výpočetní techniky se nejedná o zásadní nedostatek, ale při uvažování více zdrojů hluku v jednom interiéru je toto zpomalení počátku výpočtu již znatelné.

S výpočtem velkého množství bodů na povrchu kulové plochy souvisí tento problém. Kulovou plochu je nutno rozdělit předem (v jakési před-výpočtové fázi). S tímto výpočtem souvisí i problém vytvoření rozsáhlé datové struktury popisující jednotlivé body na povrchu.

Druhou nevýhodou je to, že je nutné vždy rozdělit všechny trojúhelníky najednou. S tím souvisí i to, že počet bodů n_B na povrchu kulové plochy přibývá v určitých kvantech

$$n_B = \frac{8 \cdot 4^n}{2} + 2 = 4^{(n+1)} + 2 \quad (6.10)$$

kde n je počet dělení.



Obr. 6.9. – Množství bodů na povrchu koule v závislosti na počtu dělení



Dělení	Počátek	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
počet bodů	6	18	66	258	1044	4098	16386	65538	262146

Tabulka 6.1. – Množství bodů na povrchu koule v závislosti na počtu dělení

Z předchozí tabulky a grafu je patrné rychlé dělení kulové plochy. Právě v tomto rychlém dělení je skryt i problém, který opravdu výrazně prodlouží čas výpočtu. Pokud totiž během výpočtu zjistíme, že ve skutečnosti postačí pouze 70.000 paprsků ze zdroje budeme muset kvůli rovnoměrnému šíření akustické energie ze zdroje dopočítat i další paprsky to jest pro osmé dělení dalších 192146 paprsků (což je skoro třikrát více než by bylo potřeba).

Z hlediska rovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky vhodná. Pro praktické použití je však, vzhledem k nutnosti přípravných výpočtů a vzhledem k nutnosti počítat i s již „nepotřebnými či zbytečnými“ paprsky, nevhodná.

6.4.3 Řešení pomocí náhodných čísel

Vzhledem k velmi velkému počtu požadovaných bodů na povrchu kulové plochy lze k tomuto problému přistupovat i pomocí statistiky, pomocí náhodných čísel. Úkolem je totiž pouze rovnoměrné rozdělení povrchu kulové plochy bez nutnosti směřovat paprsky konkrétním směrem.

Řešení rovnoměrného rozdělení povrchu kulové plochy pomocí náhodných čísel, má i jednu na počátku zřejmou výhodu. Tou je, že mohou přestat vytvářet další body na povrchu, představující budoucí paprsky prakticky v jakémkoliv okamžiku. To velmi výrazně snižuje čas potřebný k výpočtu celé hlukové situace.

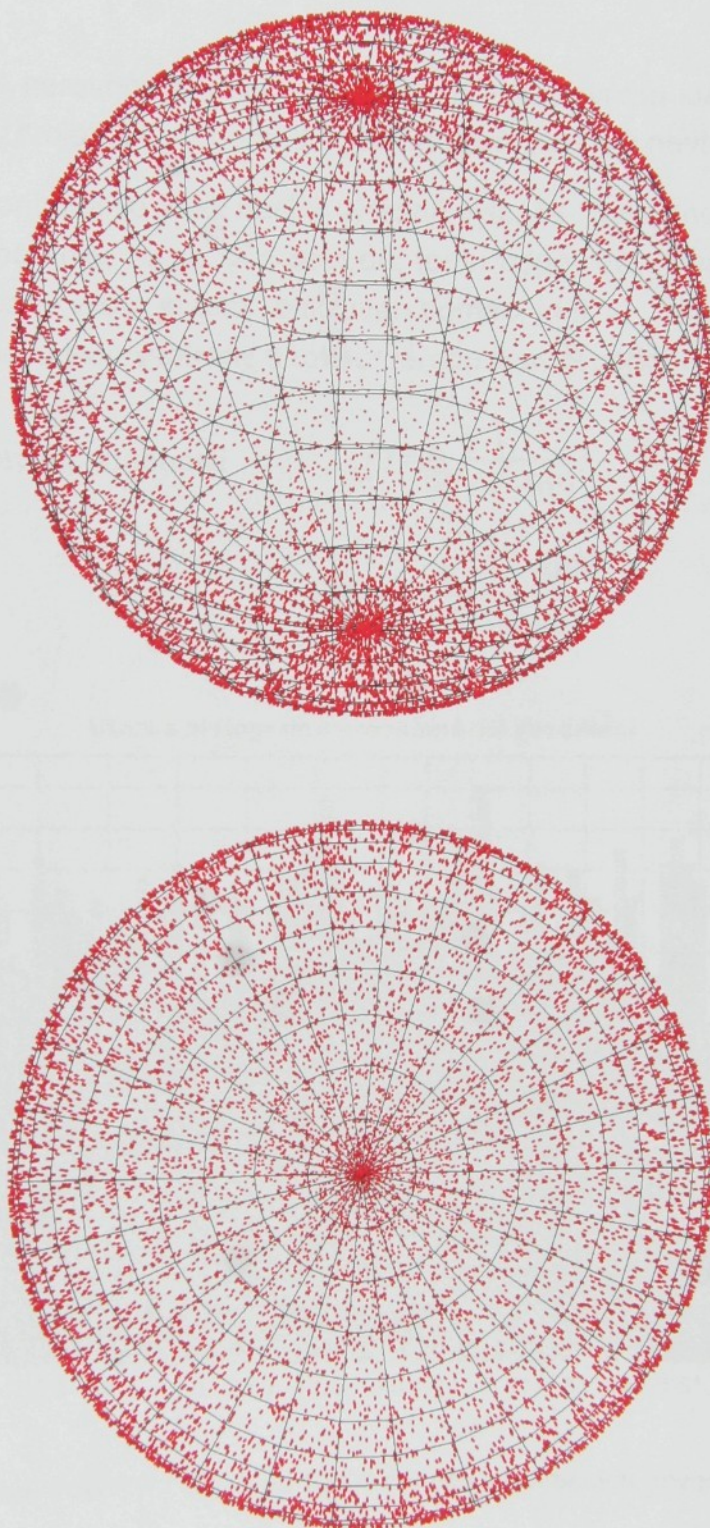
V zásadě existují dva způsoby, kterými lze zajistit skutečně náhodné rozložení bodů na povrchu kulové plochy.

6.4.4 Náhodné metody - první způsob

První způsob je velmi snadný. Spočívá ve volbě dvou proměnných α a β . Úhel α (horizontální úhel) lze volit v intervalu (0° až 360°) a úhel β (elevace) v intervalu (-90° až 90°). Tyto úhly rozdělují povrch koule stejným způsobem jako poledníky a rovnoběžky rozdělují zemi. Výhody a nevýhody tohoto algoritmu jsou stejné jako výhody a nevýhody prvního způsobu přesné metody. Na následujícím obrázku je tento



problém názorně zobrazen.



Obr. 6.10. – Náhodné rozložení bodů na povrchu koule – první způsob



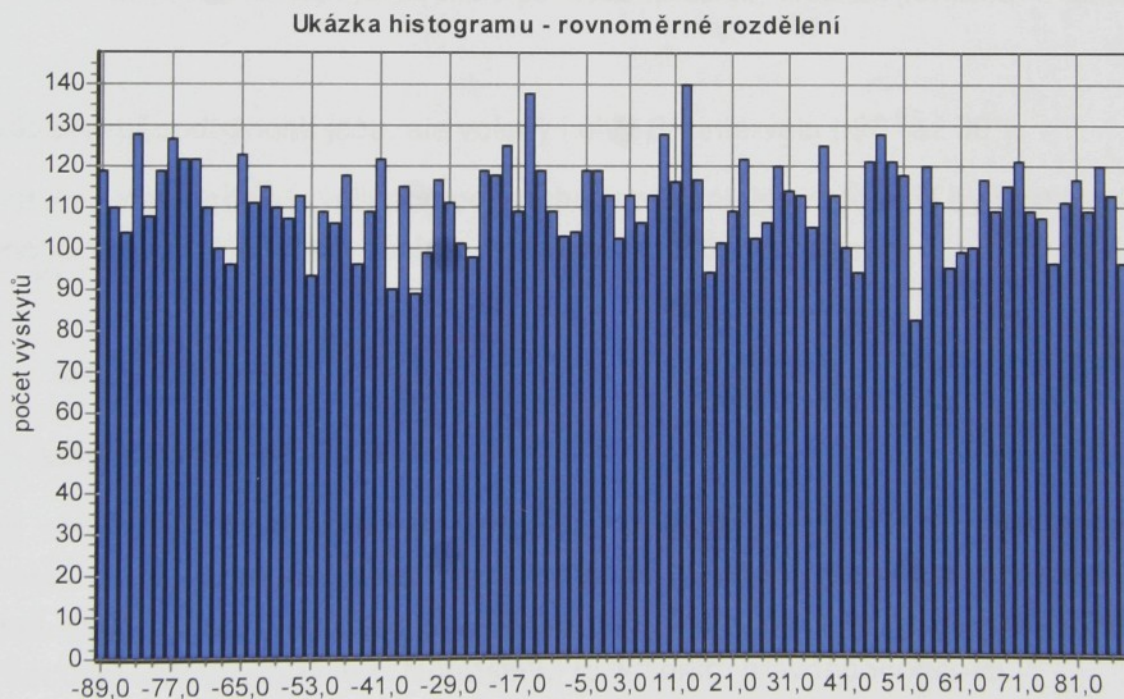
Mezi nesporné výhody tohoto algoritmu patří rychlost, se kterou lze nalézt souřadnice bodu na kulové ploše a možnost nalezení pouze nezbytně nutného počtu bodů na kulové ploše.

Z hlediska výrazné nerovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky nevhodná.

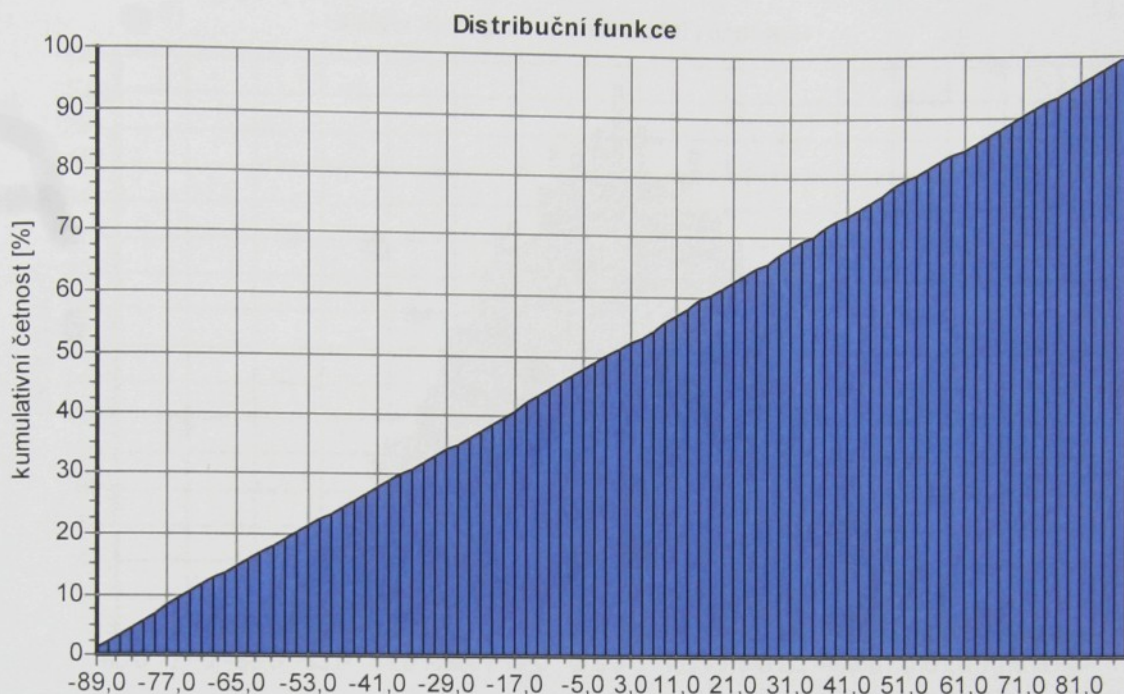
Výše uvedený algoritmus se však nechá výrazně vylepšit. Náhodné rozložení bodů na kulové ploše je v pořádku co se týče obvodu, tomu odpovídá volba úhlu α v intervalu (0° až 360°). Náhodný výběr je totiž realizován pomocí funkce „Random“ a ta zajišťuje, že hodnoty z intervalu jsou vybírány s rovnoměrnou pravděpodobností

Funkce hustoty pravděpodobnosti
$$f(x) = \frac{1}{90 - (-90)} \quad (6.11)$$

Distribuční funkce
$$D(x) = \frac{x - (-90)}{90 - (-90)} \quad (6.12)$$



Obr. 6.11. – Histogram výskytu úhlu β po 10000 náhodných výběrech (rovnoměrné rozdělení)



Obr. 6.12. – Distribuční funkce výskytu úhlu β po 10000 náhodných výběrech (rovnoměrné rozdělení)

S touto pravděpodobností jsou, ale voleny i úhly β v intervalu $(-90^\circ \text{ až } 90^\circ)$.

Úhel β by bylo vhodnější volit pomocí jiného rozdělení. Nejvhodnější by bylo rozdělení Kosinové definované funkcí hustoty rozdělení pravděpodobnosti

$$f(x) = \frac{1}{2A} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi x}{A}\right) \right] \quad (6.13)$$

kde A nabývá hodnot od -90 do 90 .

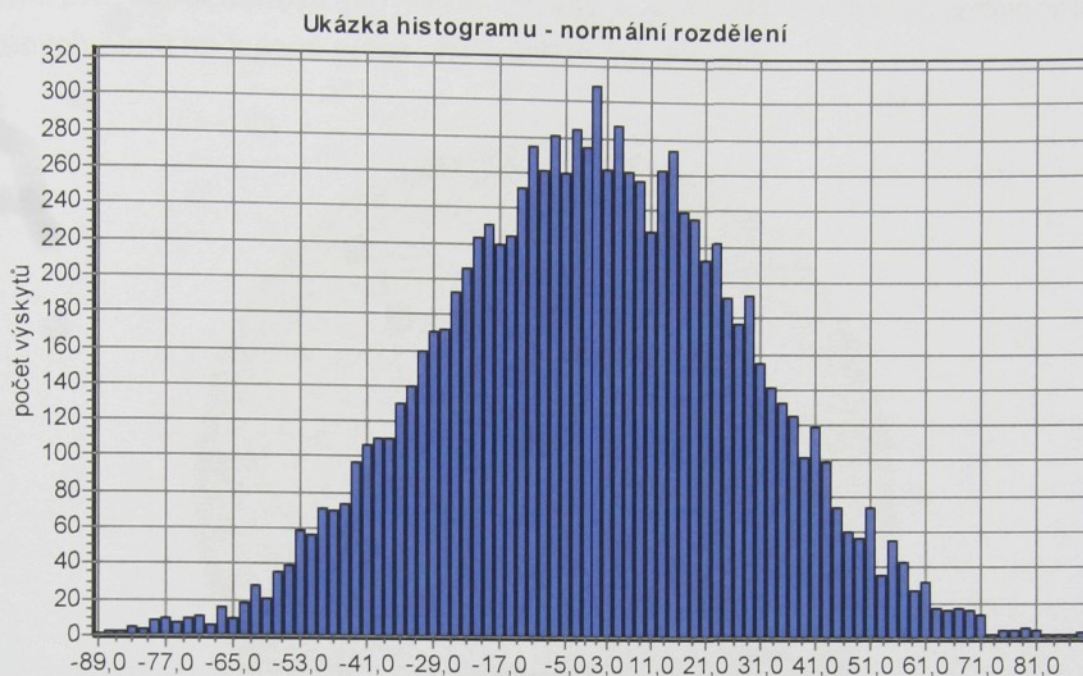
Volba náhodných čísel podle Kosinového rozdělení je ale obtížně realizovatelná. Z tohoto důvodu jsem se zaměřil i na Normální rozdělení, které lze realizovat velmi snadno. Drobnou úpravou algoritmu výběru náhodného čísla se nechá docílit toho, že jsou hodnoty úhlu β vybírány s Normálním rozložením pravděpodobnosti.

Funkce hustoty pravděpodobnosti

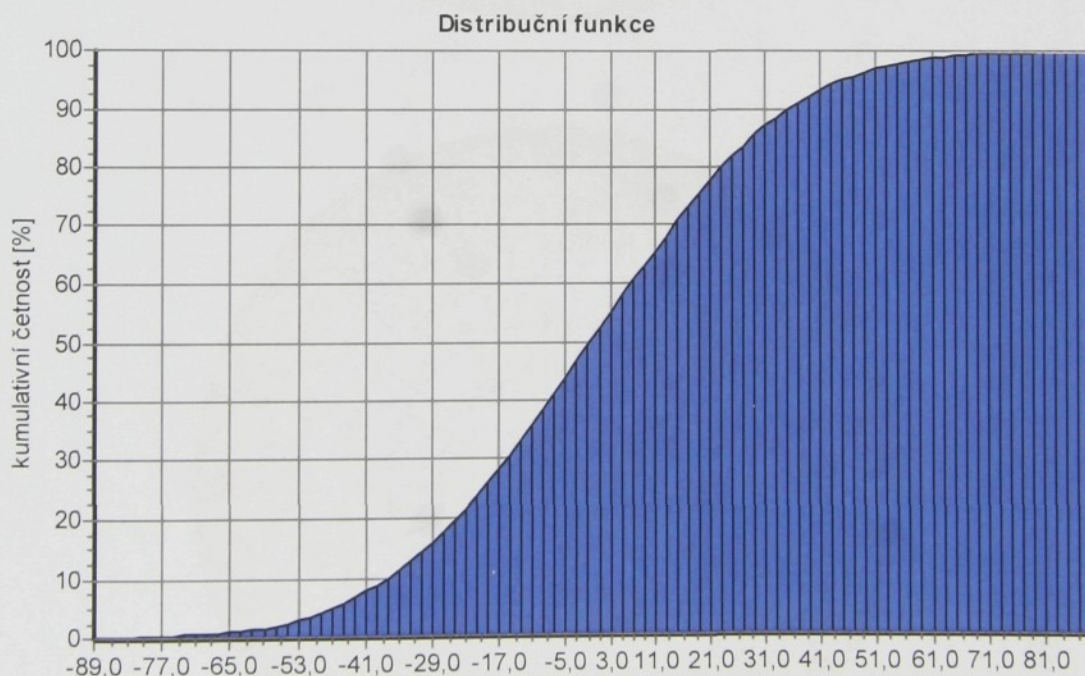
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{(2\sigma^2)}} \quad (6.14)$$

Distribuční funkce

$$D(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x)^2}{(2\sigma^2)}} dx \quad (6.15)$$



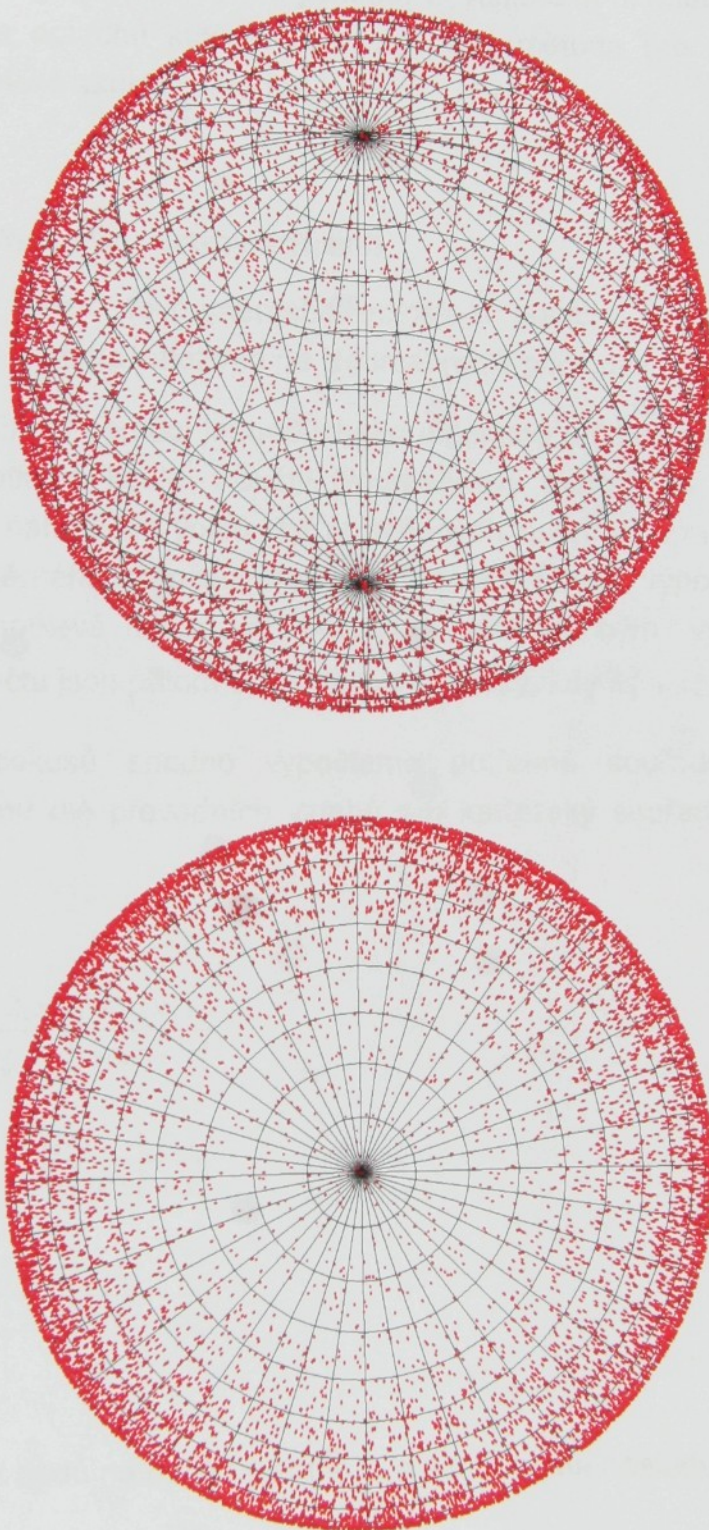
Obr. 6.13. – Histogram výskytu úhlu β po 10000 náhodných výběrech (Normální rozdělení)



Obr. 6.14. – Distribuční funkce výskytu úhlu β po 10000 náhodných výběrech (Normální rozdělení)

Pro Normální rozdělení pak zvolíme střední hodnotu 0 a směrodatnou odchylku 30,5 (hodnota směrodatné odchylky byla zjištěna experimentálně). Díky použití Normálního

rozložení pravděpodobnosti pro výběr úhlu β je docíleno výrazného zrovnoměrnění rozložených bodů na kulové ploše, viz. následující obrázek.



Obr. 6.15. – Náhodné rozložení bodů na povrchu koule s Normálním rozdělením pro výběr úhlu β



Rovnoměrný výběr úhlu β je pak velmi závislý na volbě střední směrodatné odchylky použitého normálního rozdělení.

Z hlediska výrazně jednoduchého algoritmu a vzhledem k relativní rovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky vhodná.

6.4.5 Náhodné metody - druhý způsob

Druhou metodou řešení rovnoměrného rozdělení povrchu kulové plochy pomocí náhodných čísel je metoda založená na Neumannově principu.

Tato metoda umožňuje pomocí jednoduchého algoritmu určit náhodné rozložení bodů na povrchu jednotkové koule. Použití Neumannovy metody je velmi jednoduché. Metoda spočívá v náhodném volbě čtyř proměnných x_0, x_1, x_2 a x_3 z intervalu $(-1,1)$ a s použitím rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti. Vlastní výpočet souřadnic bodů na povrchu jednotkové koule je proveden jednoduchým výpočtem. Z tohoto následujícího výpočtu jsou přitom vynechány ty pokusy, kdy $x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \geq 1$.

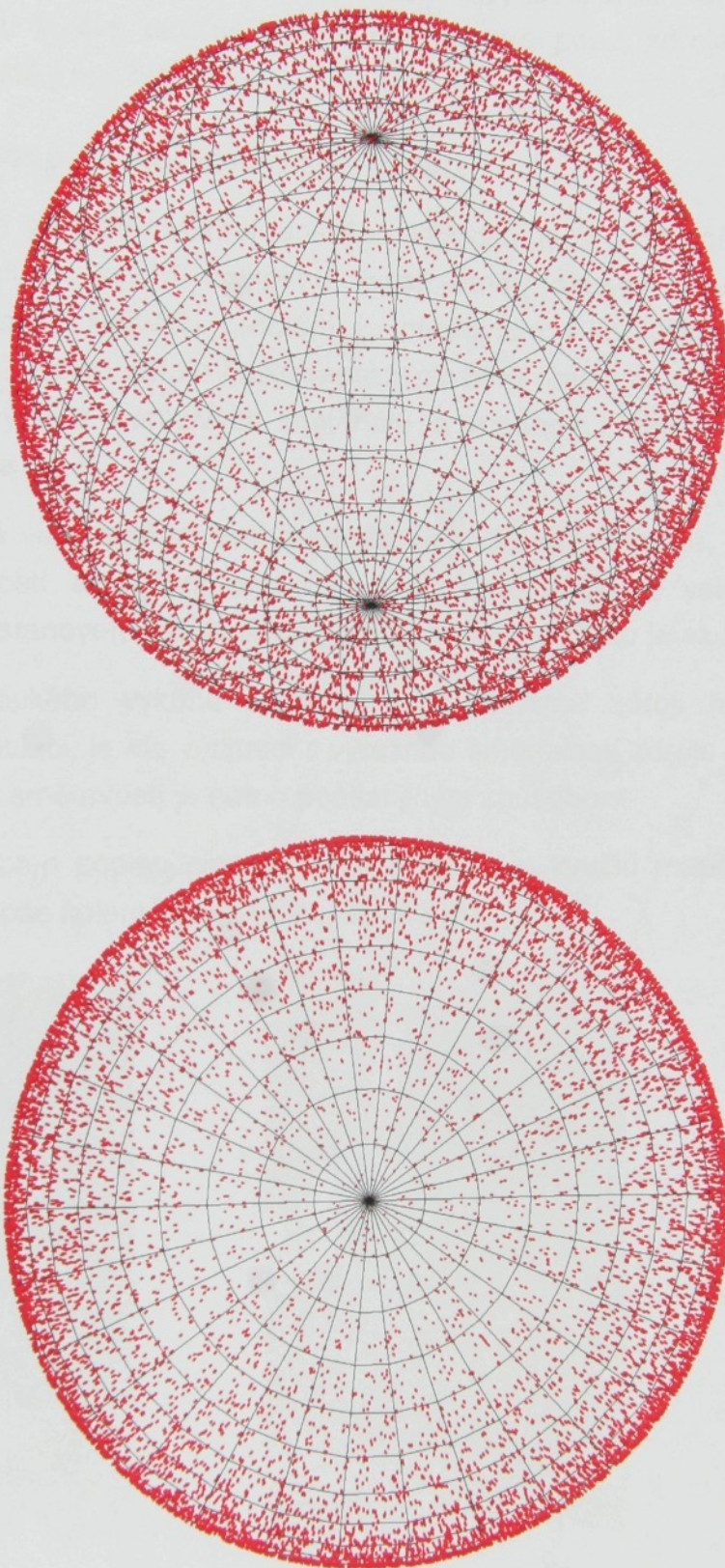
Ze zbývajících pokusů snadno vypočteme potřebné souřadnice v kartézském souřadném systému dle převodních vztahů pro kartézský souřadný systém a jejich souřadnice jsou :

$$x = \frac{2(x_1x_3 + x_0x_2)}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (6.16)$$

$$y = \frac{2(x_2x_3 - x_0x_1)}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (6.17)$$

$$z = \frac{x_0^2 + x_3^2 - x_1^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (6.18)$$

Výsledné rozložení bodů na povrchu koule je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 6.16. – Náhodné rozložení bodů na povrchu koule – druhý způsob

Z hlediska jednoduchého algoritmu a vzhledem k vyhovující rovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky nejvhodnější.

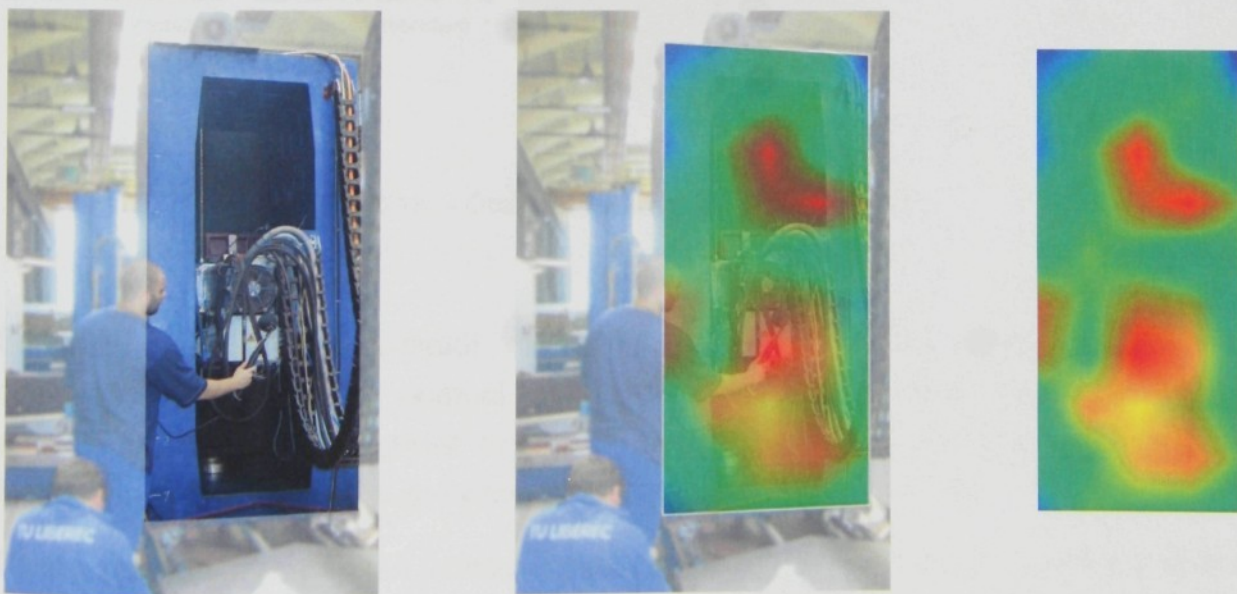
6.5 Mapování pole kolem zdroje hluku

Většina strojních zařízení a strojírenských výrobků jsou relativně složité systémy dílčích zdrojů hluku, jejichž celkovou vyzařovanou akustickou energii lze těžko matematicky popsat. Největší problém je především v komplikované cestě šíření hluku, v množství dílčích zdrojů hluku reprezentované navenek jedním zdrojem hluku, množství pohltivých a odrazivých materiálů a mnohdy i velké členitosti povrchu samotného zdroje [9].

Popsat akustické vlastnosti takového zdroje hluku je velmi složité, lze jej provést na základě zkušeností a experimentálního měření akustických veličin. Významným pomocníkem při stanovení akustických parametrů zdroje hluku je akustický výkon [6].

Stanovení akustického výkonu a přiřazení k danému zdroji hluku v modelu u matematické simulaci, je ale v situaci s výraznou směrovostí zdroje nevhodné. Zdroje hluku s výraznou směrovostí je nutno popsat jiným způsobem.

Vhodným způsobem popisujícím daný zdroj hluku je využití mapování akustického pole v obalové ploše kolem zdroje hluku, viz též [21].

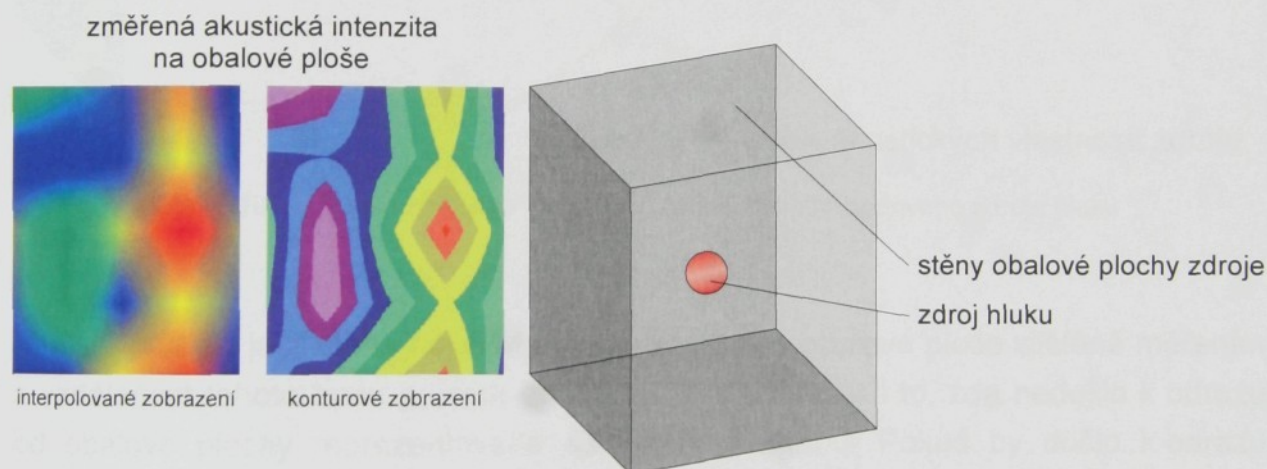


Obr. 6.17. – Mapování akustického pole (akustické intenzity) ve zvolené ploše

Obalová plocha může mít tvar kváдру nebo polokoule. Z čistě praktických důvodů je vhodnější mapování akustického pole v obalovém kváдру. Toto mapování provádíme s cílem:

- zjištění cest šíření akustické energie ze zdroje
- zjištění celkové akustické energie, která se z daného zdroje šíří
- určení hlavních zdrojů hluku

Mapování v obalové ploše můžeme provádět pomocí měření akustického tlaku nebo pomocí měření akustické intenzity [20]. Měření pomocí akustické intenzity je výhodnější, třeba i pro to, že ihned po ukončení samotného měření známe přímo i akustický výkon zdroje hluku.

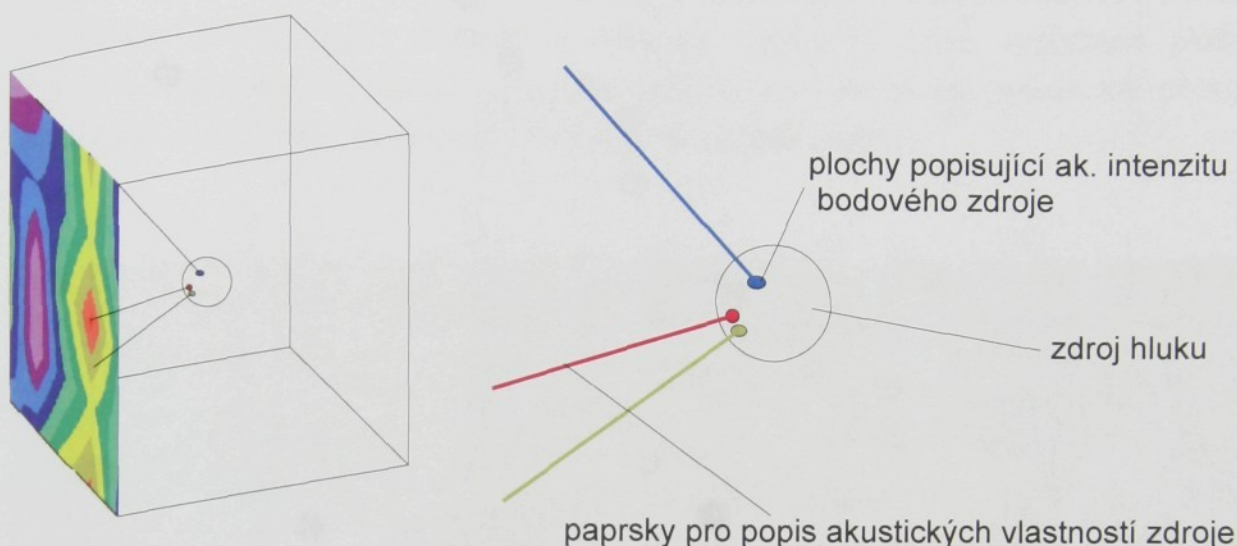


Obr. 6.18. – Obalová plocha bodového zdroje hluku

Samotné mapování se provádí v síti bodů, která nám více rozděluje samotnou obalovou plochu, nebo pomocí „přetírací metody“, pomocí které získáváme ekvivalentní hodnotu akustické energie procházející dílčí ploškou v obalové ploše. Mapování je samozřejmě nutné provést přes celou obalovou plochu.

Dalším postupem je pak jen volbou daného typu zdroje hluku, bodový nebo liniový a nalezení plošné akustické intenzity zvoleného zdroje hluku. Tuto plošnou akustickou intenzitu zdroje můžeme například stanovit jako střední hodnotu plošné intenzity zdroje s udáním činitele směrovosti pro danou část plochy, nebo jako plošnou akustickou intenzitu dané části plochy.

Samotný postup stanovení plošné akustické intenzity je jednoduchý viz. následující obrázek. Z bodového zdroje jsou vyzařovány paprsky (např. výše uvedenými vhodnými principy) a sledujeme, ve kterém místě tyto paprsky protnou obalovou plochu zdroje hluku.



Obr. 6.19. – Ukázka zjišťování plošné akustické intenzity bodového zdroje hluku

V místě průniku je zjištěna např. akustická intenzita v obalové ploše zjištěná měřením a vzdálenost tohoto bodu průniku od zdroje. Sledováno je i to, zda nedošlo k odrazu od obalové plochy reprezentované například podlahou. Pokud by došlo k odrazu paprsku od podlahy a teprve potom k průniku bude tento odraz započítán do následujícího výpočtu.

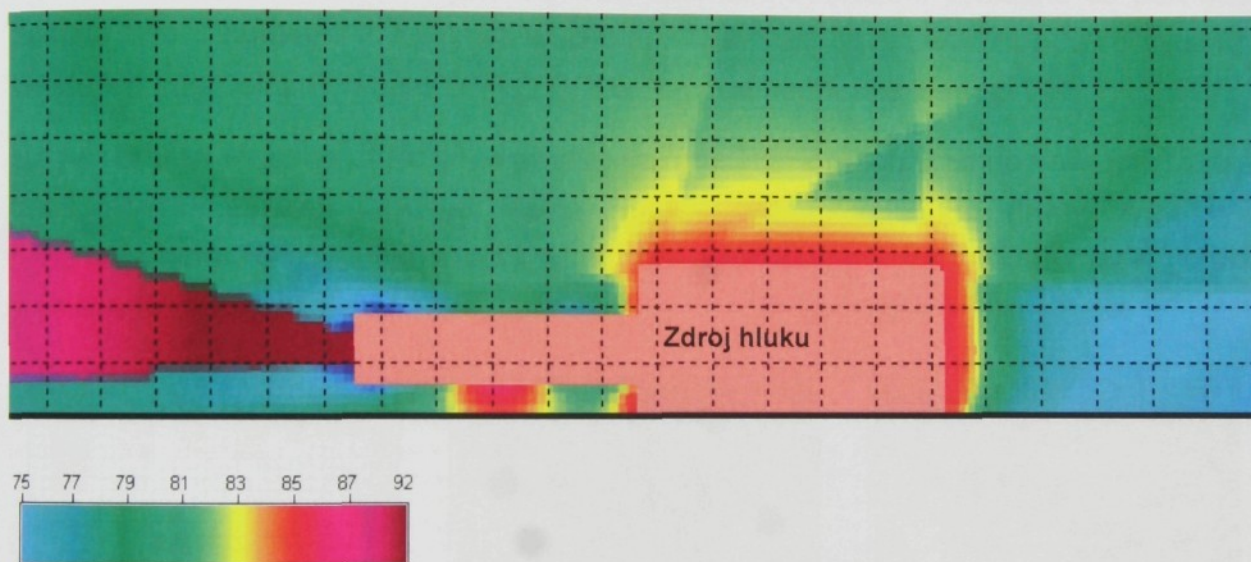
Po zjištění bodů průniků jednotlivých vektorů s obalovou plochou je proveden jednoduchý výpočet, zajišťující kompletní pokrytí zvoleného typu zdroje hluku vypočtenou plošnou akustickou intenzitou.

Označování „plošná intenzita“ jsem zavedl s ohledem na minimalizaci vektorů potřebných k popsání zdroje hluku. V praxi se tato úspora projevuje tak, že vypočtená intenzita není pouze v bodě průniku vektoru kulovou plochou bodového zdroje hluku, ale i v blízkém okolí. Pokud pak dochází k překrývání těchto oblastí jsou hodnoty plošné intenzity určovány jako průměrné hodnoty.

6.6 Akustická energie nesená paprskem

Při vlastním řešení a výpočtu předpokládaných hladin hluku v řešené rovině je pak postup pro stanovení akustické intenzity a tím i energie přenášené jednotlivými paprsky již snadný.

Paprsek vycházející ze zdroje hluku musí protnout nejprve „virtuální obalovou plochu“ samotného zdroje hluku. V místě průniku je známa již dříve vypočtená plošná akustická intenzita, která je určujícím prvkem pro stanovení akustické energie přenášené jednotlivými paprsky vyzařovanými z daného zdroje.



Obr. 6.20. – Zdroj hluku s výraznou směrovou charakteristikou

Energie nesená paprskem může představovat energii ve zvolené třetino-oktávě, nebo v případě řešení situace v celkových hladinách hladinu akustické intenzity váženou váhovým filtrem A. V případě řešení situace v celkových hladinách jsou akustické parametry uvažovány jako pro frekvenci 1000 Hz. Řešení pouze v celkových hladinách je do jisté míry zjednodušující, ale v případě výpočtu předpokládaných hladin hluku v interiérech které neexistují nebo při uvažování zdrojů hluku, u kterých je znám pouze jednočíselně vyjádřený akustický výkon, je toto zjednodušení akceptovatelné.

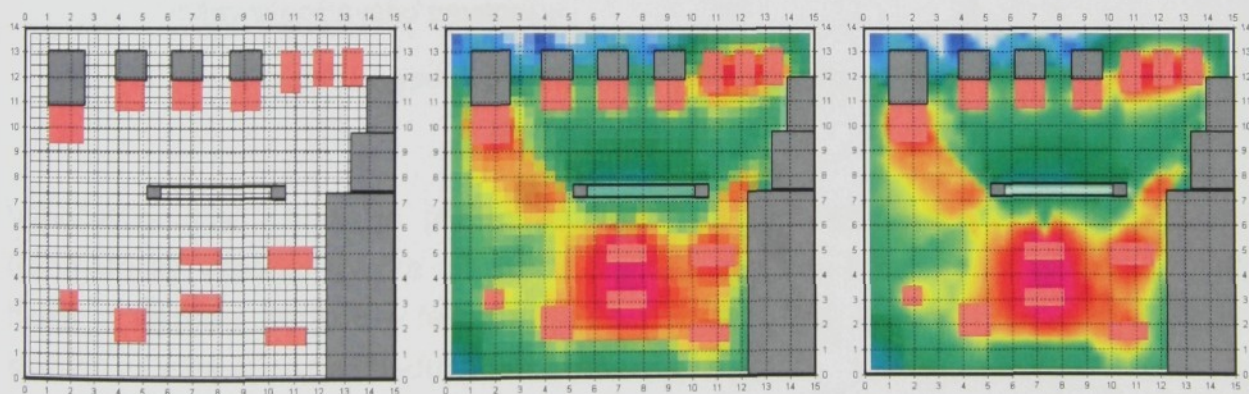
7 První chod

7.1 Výpočtová rovina

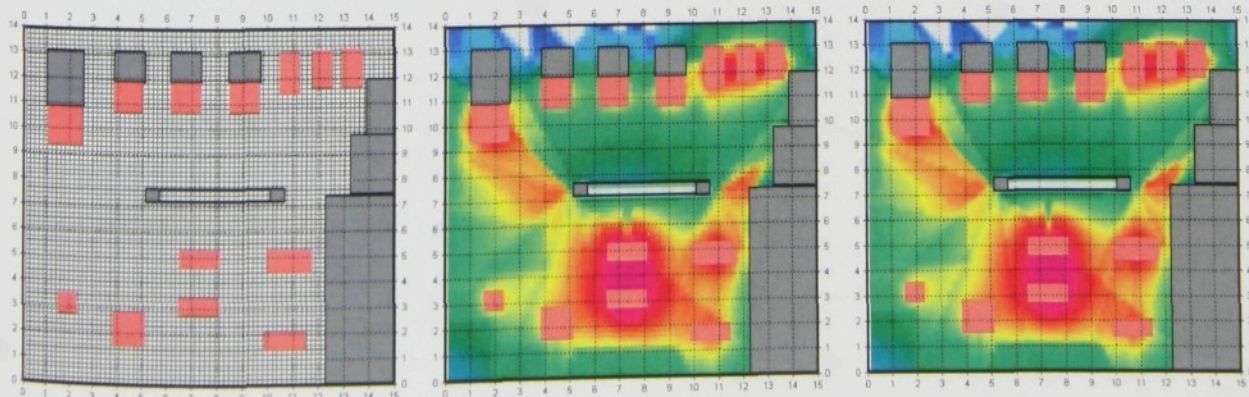
Výpočet předpokládaných hladin hluku je prováděn vždy jen ve zvolené rovině, nebo ve zvolených rovinách, tvořených buňkami.

Síť je tvořena pouze buňkami čtvercového tvaru. Hustota sítě je závislá na členitosti interiéru respektive na hustotě zaplnění interiéru vnitřními tělesy a rozměrnými zdroji hluku. Hustotu sítě lze zvolit i s ohledem na grafické zobrazení výsledků. Optimální hustota sítě pak nevychází ze skutečných rozměrů, ale z rozměrů které budou reprezentovány zobrazením výsledků. Pro optimální zobrazení výsledků se pak hodí hustota sítě s buňkami o velikosti maximálně patnácti obrazových bodů. S využitím vhodných interpolačních algoritmů [11], lze pak dodatečně rozlišení zvýšit.

Na následující skupině obrázků je ukázán řešený interiér s buňkami o velikosti 15 a 7 bodů. První obrázek ukazuje řešený interiér s buňkami sítě, druhý vypočtené předpokládané hladiny hluku a obrázek vpravo zobrazuje předpokládané hladiny hluku „vyhlazené“ interpolací.



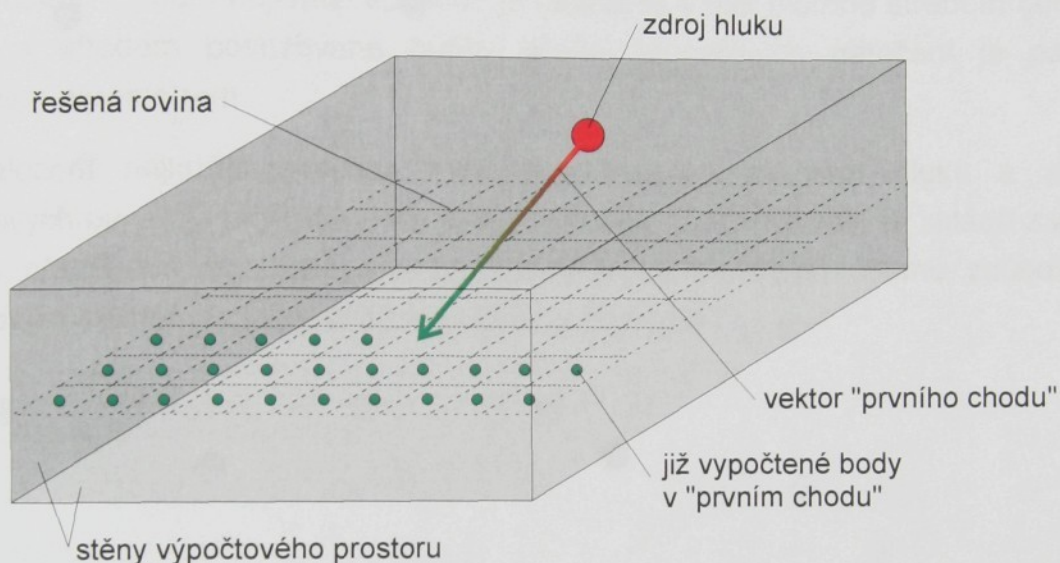
Obr. 7.1. – Řešený interiér se sítí z buněk o velikosti 15 bodů



Obr. 7.2. – Řešený interiér se sítí z buněk o velikosti 7 bodů

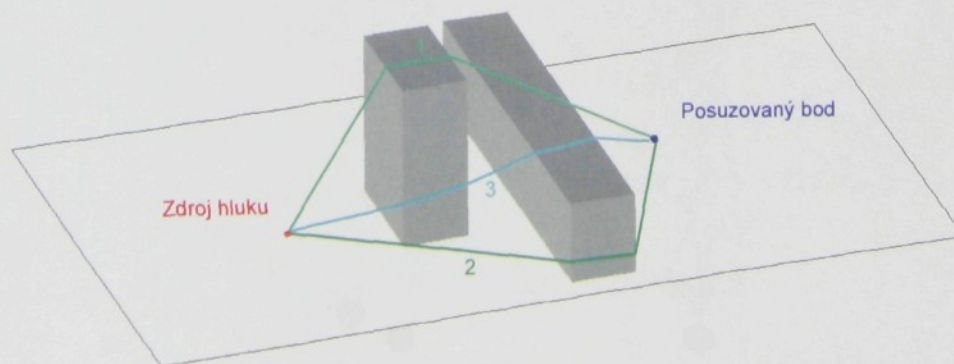
7.2 Výpočet prvního chodu

Aby bylo s jistotou zabezpečeno, že bude akustický tlak (hluk) vypočten v každé buňce, je před samotným šířením paprsků ze zdrojů nutné provést tzv. výpočet prvního chodu. Tento první chod zabezpečuje, že bude v každé buňce vypočten maximální přírůstek akustické energie z posuzovaného zdroje hluku, viz následující obrázek.



Obr. 7.3. – Výpočet prvního chodu, prováděný pro každou buňku

Výpočet prvního chodu je realizován výpočtem geometrickým a také akustickým. Geometrický výpočet má za cíl nalézt nejkratší spojnici mezi posuzovaným zdrojem hluku a každou buňkou v řešené rovině. Hledání této nejkratší spojnice je velmi složitou záležitostí viz následující obrázek.



Obr. 7.4. – Nejkratší spojnice mezi zdrojem a posuzovaným bodem



U více členitých interiérů s velkým množstvím vnitřních těles je hledání paprsků mezi posuzovaným zdrojem hluku a jednotlivými buňkami téměř neřešitelné. Proto tento problém v současné době řeším určitým zjednodušením.

Toto zjednodušení spočívá pouze v nalezení nejkratší spojnice v předem zvolené rovině. Vzhledem k tomu, že nalezení nejkratší spojnice pouze v jedné rovině by bylo opravdu velkým zjednodušením, je výpočet realizován v určitém cyklu. Rovina ve které je prováděno hledání nejkratší spojnice je natáčena v ose tvořené středem bodového zdroje a středem posuzované buňky. Počet jednotlivých natočení je pak dán volitelným parametrem.

Po nalezení nejkratší spojnice mezi posuzovaným zdrojem hluku a středem jednotlivých buněk je proveden i akustický výpočet. Tento výpočet se skládá z výpočtu útlumu přenášené akustické energie vzduchem a z výpočtu útlumu způsobeného bariérovým efektem (stínění vnitřními tělesy a stěnami).



8 Prvky v interiéru

Řešený interiér je v algoritmu tvořen ostatními důležitými prvky, které ze nachází uvnitř průmyslového interiéru. Samotný interiér je tvořen stěnami, které zároveň ohraničují výpočtový prostor. Tyto stěny mohou obsahovat plochy s rozdílnými akustickými vlastnostmi. Mezi tyto vlastnosti patří zejména akustická pohltivost a neprůzvučnost.

Mezi prvky umísťované v průmyslovém interiéru patří zejména vnitřní tělesa. Tato tělesa ve skutečnosti představují různé vestavby, sloupy, velíny a jiná objemná tělesa situovaná do řešeného průmyslového prostoru.

Dalším typem vnitřních těles jsou akustické bariéry. Akustické bariéry jsou v podstatě vnitřní tělesa o velmi malé tloušťce. U akustických bariér je nutno uvažovat i jejich neprůzvučnost a to právě z důvodu jejich malé tloušťky.

Mezi vnitřní tělesa lze zařadit i samotné zdroje hluku. Často jsou zdroje hluku v průmyslových prostorech značně rozměrné, a svými rozměry tak způsobují bariérové efekty pro hluk šířící se z ostatních zdrojů hluku. Zdroje hluku jsou velmi významná vnitřní tělesa v případě, že mají velké rozměry větší než λ nebo že průmyslový prostor obsahuje pouze výrobní linky. Bariérový efekt je významný např. i v textilních provozech, ve kterých je velký počet poměrně významných zdrojů hluku a tyto zdroje jsou i rozměrné.

Veškeré výše uvedené prvky v interiéru, jako jsou vnitřní tělesa, akustické bariéry, samotné zdroje hluku a plochy, které ohraničují samotný interiér tvoří odrazivé plochy pro paprsky šířené ze zdrojů hluku a pro paprsky již odražené. Pro každý paprsek šířící se v řešeném interiéru je nutno určit místo, kde dojde k odrazu paprsku. Při tomto odrazu dojde k útlumu přenášené akustické energie paprskem způsobeným akustickou pohltivostí daného prvku. Výsledkem odrazu je tedy jiný paprsek s nižší přenášenou akustickou energií, než tomu bylo před jeho odrazem.

Všechny výše uvedené prvky interiéru, mohou navíc obsahovat ještě jeden speciální typ prvku. Tímto prvkem je plocha, která může být umístěna na jakémkoliv tělese či obvodové stěně. Významem plochy je změna akustických vlastností objektu na kterém je plocha umístěna. Změněné akustické vlastnosti jsou pouze v místě samotné plochy. U plochy lze změnit akustickou pohltivost a neprůzvučnost.

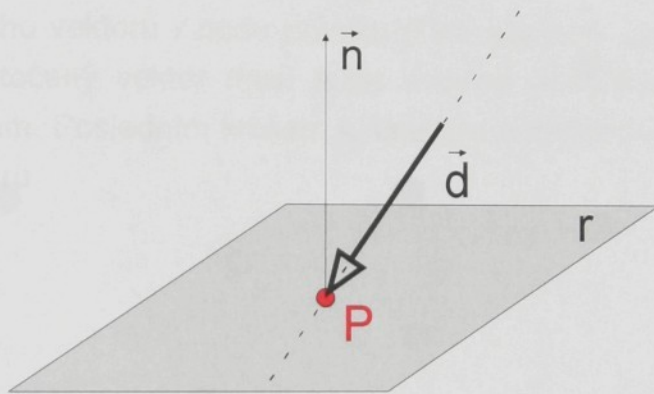
8.1 Odraz paprsku

Nalezení odraženého paprsku od vnitřních prvků (ploch) se zpočátku zdálo být bezproblémovou záležitostí. Po realizaci prvních algoritmů se však ukázalo, že je to poměrně komplikovaný problém vzhledem k strojovému času, který je nutno k realizaci tohoto algoritmu věnovat.

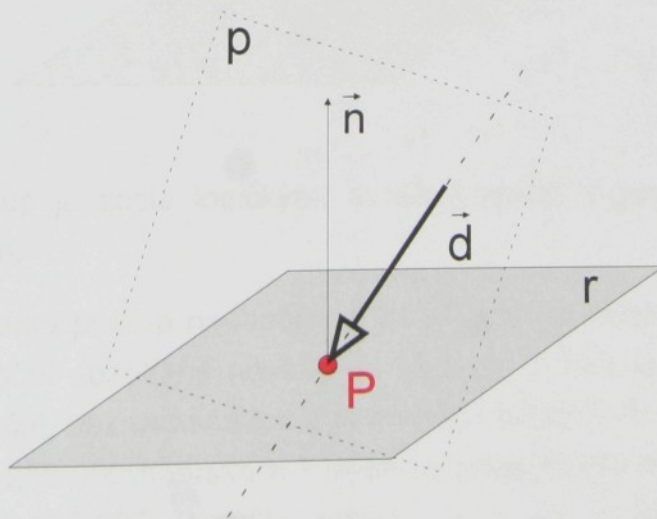
Na začátku řešení problematiky odrazu paprsku od tělesa v interiéru jsem postupoval dle běžných znalostí získaných v předmětech jako jsou matematika, fyzika a hlavně konstruktivní geometrie [13 a 14].

Postup pro výpočet vektoru odraženého od obecné roviny lze popsat následovně.

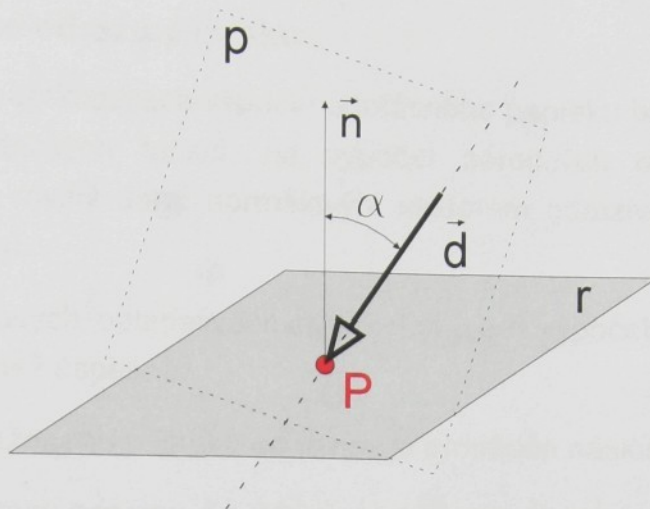
Nalezení bodu P odrazu paprsku d od roviny r a vytvoření normálového vektoru n .



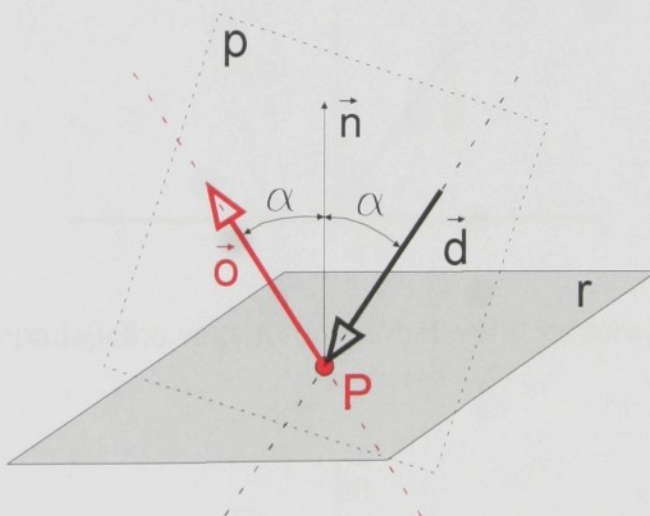
Vytvoření pomocné roviny p , ve které se nalézá normálový vektor n a vektor dopadajícího paprsku d .



Zjištění úhlu α , který svírají vektory d a n



Konstrukce otočeného vektoru z bodu průniku P na opačnou stranu od normálového vektoru n . Tento otočený vektor musí ležet v rovině p definované normálovým a dopadajícím vektorem. Posledním krokem k nalezení odraženého vektoru o je pak již pouhé otočení vektoru.



Výše uvedený postup je zcela logickým, avšak k využití v geometrické akustice je poměrně nevhodným.

Důvodem, proč je tento postup nevhodný je používání goniometrických funkcí, které jsou pro rychlý výpočet absolutně nevhodné. Musíme si totiž uvědomit, že pokud je algoritmus plně funkční, neznamená to že je navržen optimálně. Je-li z jednoho zdroje hluku vysláno např. 250.000 paprsků a k jejich utlumení dojde po dvanáctém odrazu, je nutné provést 3.000.000 výpočtů odrazů a to je příliš mnoho strojového „výpočtového“ času. Tato časová náročnost nabývá na významu se vzrůstajícím



množstvím průmyslových zdrojů hluku v řešeném prostoru.

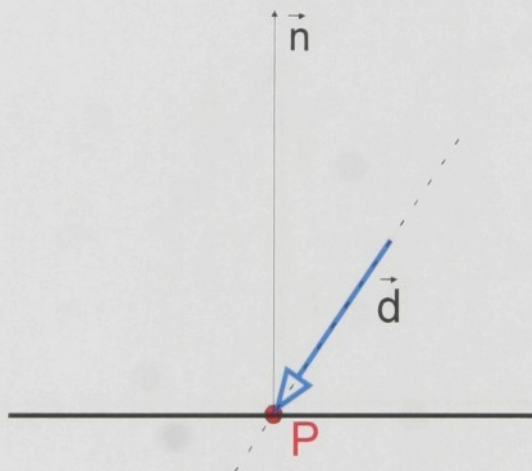
8.1.1 Optimalizace odrazu paprsku

Na začátku procesu optimalizace výpočtu odraženého paprsku jsem se snažil vyhnout používání goniometrických funkcí, na výpočet náročných odmocnin a nutnosti zjišťování pomocné roviny dané normálovým vektorem odrazivé plochy a vektorem dopadajícího paprsku.

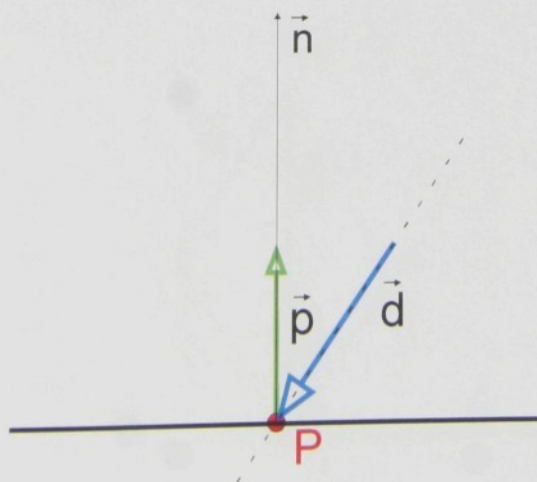
Po několika zdoluhavých optimalizačních krocích jsem výpočet odraženého vektoru zoptimalizoval více než úspěšně.

Postup výpočtu odraženého paprsku od roviny je prováděn následovně:

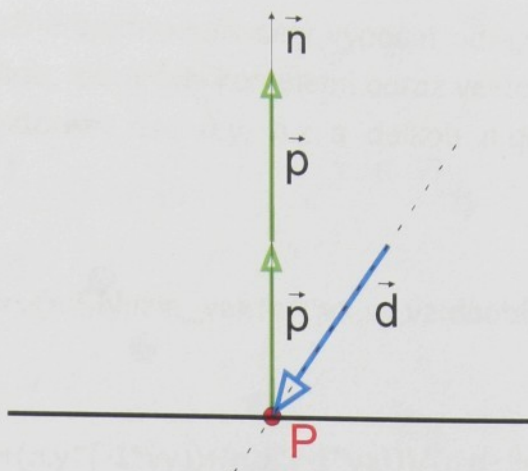
Nalezení bodu P odrazu paprsku d a vytvoření normálového vektoru n v bodě odrazu



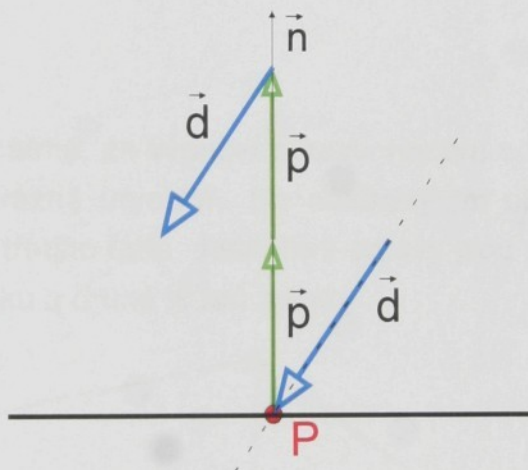
Zjištění průmětu p dopadajícího vektoru do normálového vektoru n a jeho otočení



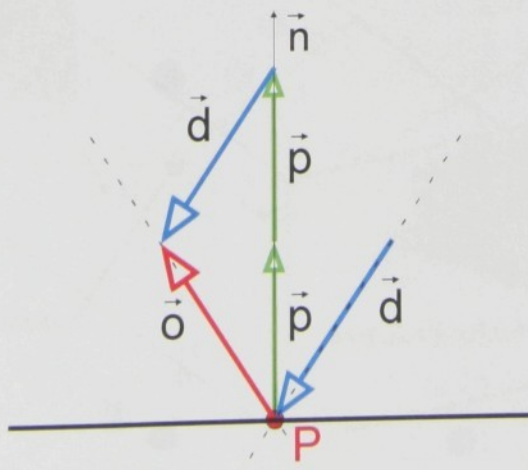
Zvětšení velikosti vektoru p dvakrát



Přičtení původního dopadajícího vektoru d k zvětšenému vektoru p . Koncový bod přičteného vektoru je pak přímo koncovým vektorem hledaného odraženého vektoru.



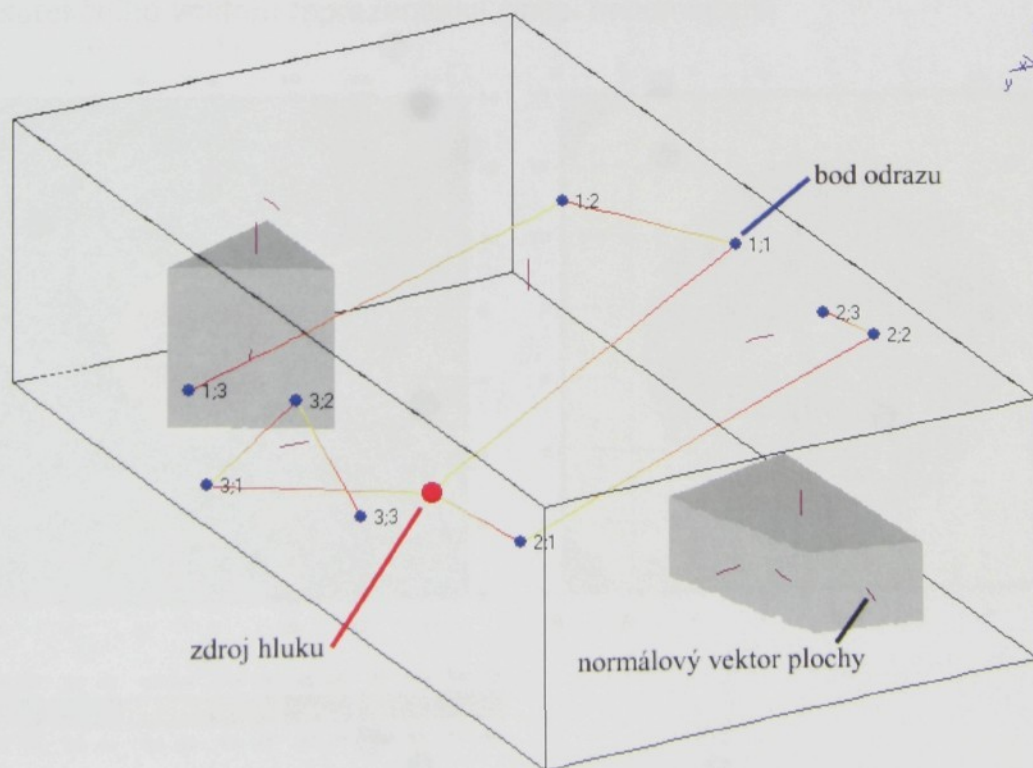
Vytvoření odraženého vektoru o . Počátek vektoru je v místě průniku dopadajícího a normálového vektoru s odrazivou plochou. Koncovým bodem odraženého vektoru je pak koncový bod výše uvedené konstrukce.



Pro ukázkou, jak bylo možné zjednodušit celý výpočet odrazu je uvedena následující ukázkou programového kódu, která řeší kompletní odraz vektoru daného v_x , v_y , a v_z od roviny s normálovým vektorem $n.x$, $n.y$, $n.z$ a délkou $n.delka$. Výsledný odražený vektor je pak dán X , Y a Z .

```
procedure odraz_vektoru(n:GNorm_vektor; vx,vy,vz:double; var X,Y,Z:double);
var c:double;
begin
  c:=(((n.x*(-1*vx)))+(n.y*(-1*vy)))+(n.z*(-1*vz)))/(n.delka)/n.delka;
  X:=(n.x*c*2)+vx;
  Y:=(n.y*c*2)+vy;
  Z:=(n.z*c*2)+vz;
end;
```

Z uvedeného výpisu je patrné, že výpočet odrazu vektoru od roviny je skutečně velmi zjednodušen a tím i výrazně urychlen. Na následujícím obrázku je ukázkou odrazů třech vektorů do odrazu třetího řádu. Jednotlivé odrazy jsou pro názornost očíslovány. První číslo je číslo paprsku a druhé je řád odrazu.



Obr. 8.1. – Ukázkou šíření třech vektorů po interiéru (do třetího odrazu)

8.2 Aplikace činitele nehomogenit

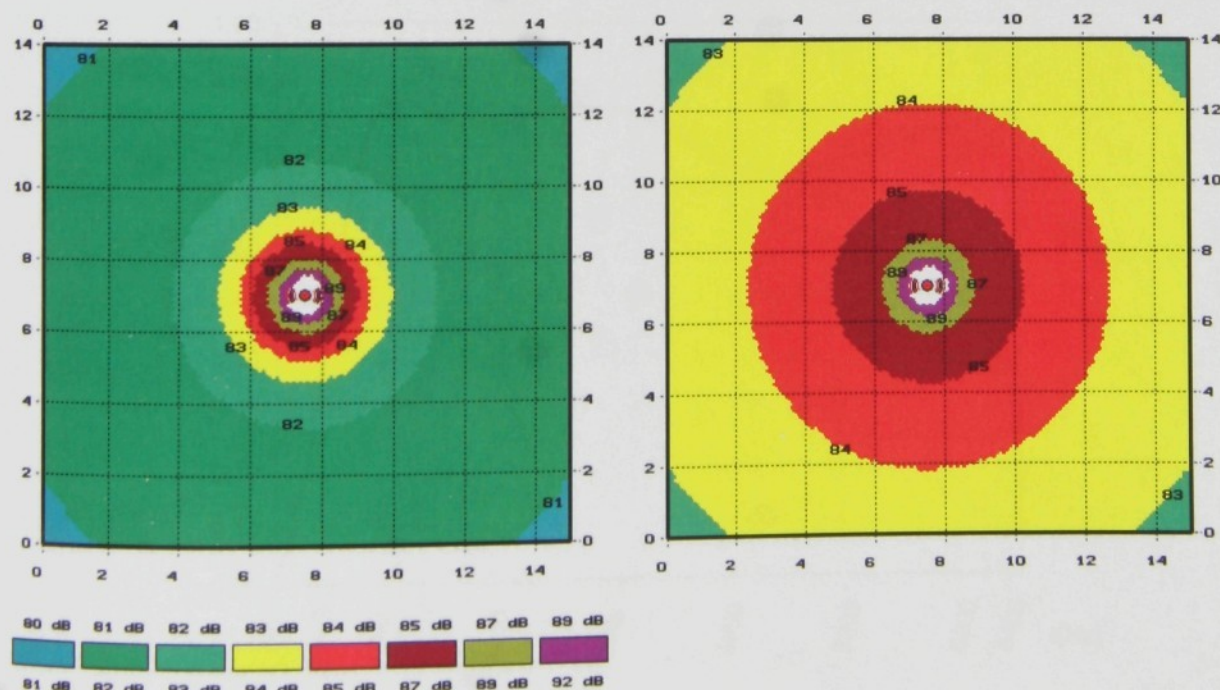
Činitel nehomogenit a nerovností podlahy, stropu a obvodových stěn lze pomocí geometrické akustiky také realizovat. Činitel nehomogenit má na celý prostor globální vliv, projevující se změnami odrazivosti jednotlivých paprsků od dělicích ploch. Těmito plochami jsou pak jak stěny výpočtového prostoru tak i stěny jednotlivých těles uvnitř řešeného interiéru.

Na činitel nehomogenit nelze pak nahlížet globálně, ale samostatně u každé dělicí plochy nebo její části. Tento činitel pak udává nehomogenity dané dílčí plochy.

Jeho vliv lze nahradit přičtením velmi malého vektoru k vektoru odraženému. Tento korekční vektor si můžeme představit jako přiblížení ideálního odrazu daného paprsku odrazu skutečnému. Orientace vlastního korekčního vektoru je pak zvolena pomocí náhodně zvolených souřadnic x , y a z .

Velikost korekčního paprsku je ve skutečnosti velmi malá. Jeho velikost byla zjišťována jednoduchým experimentem. Pokud tento vektor má částečně nahrazovat činitel nehomogenit a nerovností podlahy stropu a obvodových stěn, pak jeho vliv musí být přibližně stejně velký jako vliv daného činitele.

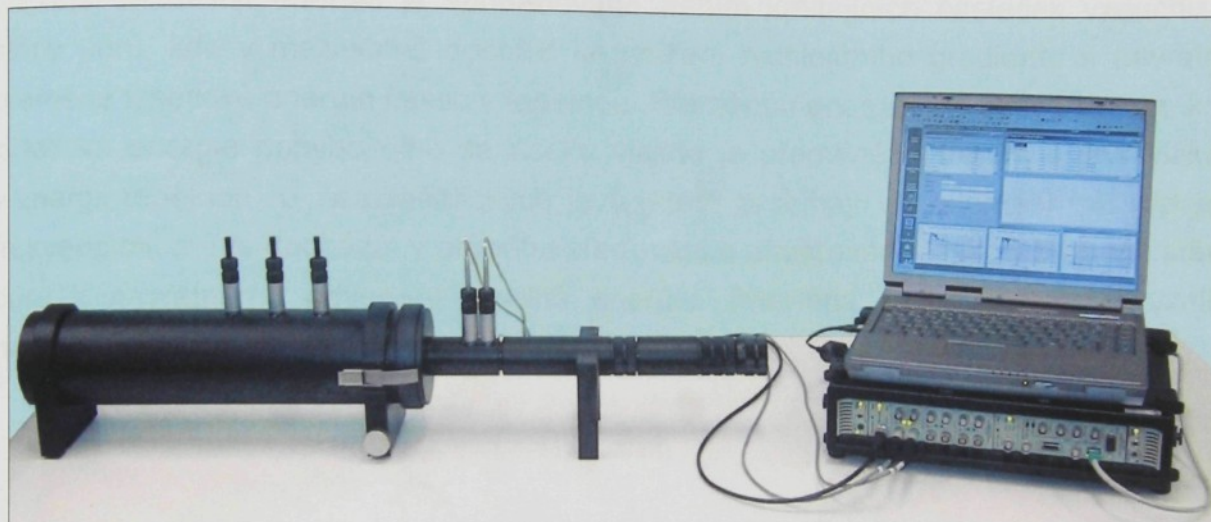
Na následujících obrázcích, předpokládaných hladin hluku v interiéru, je vidět vliv tohoto korekčního vektoru reprezentující činitel nehomogenit.



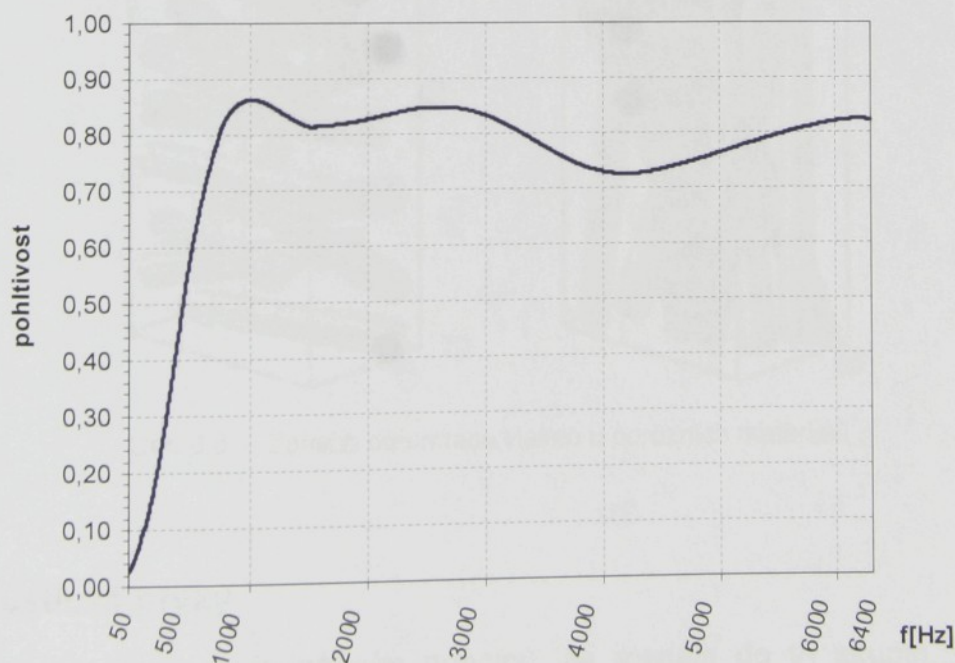
Obr. 8.2. – Vliv činitele nehomogenit na hladiny hluku v interiéru. Činitel nehomogenit zvolen 0,01 (obr. vlevo) a 0,6 (obr. vpravo)

8.3 Akustická pohltivost stěn

Akustickou pohltivostí se rozumí schopnost materiálu pohltit část dopadajícího akustického výkonu. Akustická pohltivost se mění s frekvencí, značíme ji α a nabývá hodnot 0..1. V praxi se můžeme setkat i s akustickou pohltivostí větší než 1, ale to bývá zpravidla zapříčiněno zvětšenou plochou povrchu vzorku různým tvarováním (výstupky či vlnami). Akustickou pohltivost lze zjišťovat v dozvukové místnosti z doby dozvuku nebo s pomocí impedanční trubice.



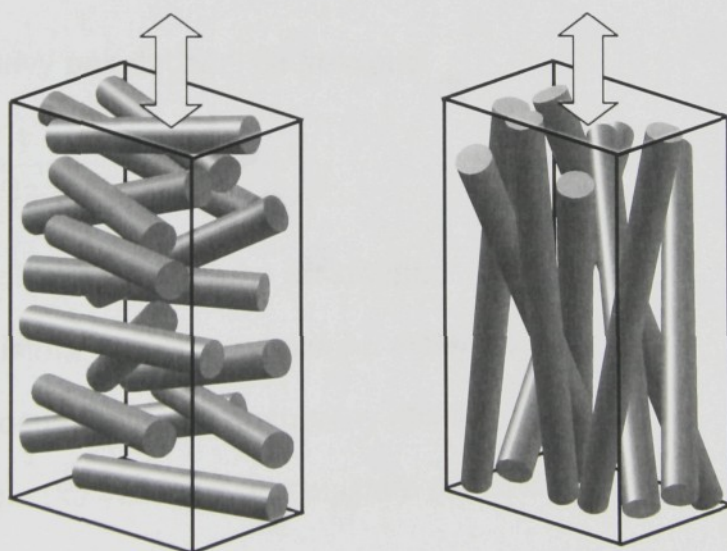
Obr. 8.3. – Impedanční trubice Brüel & Kjær Type 4206



Obr. 8.4. – Akustická pohltivost pohltivého materiálu

Energie, která dopadá na materiál je částečně odražena, částečně absorbována a zčásti projde. Porózní materiály jsou používány ke zmenšování amplitudy odražené zvukové vlny. Pod pojmem pohlcování zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Z tohoto hlediska můžeme způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři druhy, přeměny vznikající třením, přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, tj. změnami relaxačními a přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

Největší množství energie je spotřebováno třením kmitajících částíček vzduchu o stěny pórů, kde v mezivrstvě dochází ke snížení rychlostního gradientu a nevratně přeměně kinetické energie částic v tepelnou. Přeměnou energie je i pohyb vláken, kde kinetická energie pohybujícího se úseku vlákna je přeměněna třením o jiná vlákna v energii tepelnou. U neadiabatických jevů, které probíhají v systémech při nízkých frekvencích, může docházet v průběhu zředování a zhušťování částic v blízkosti stěny póru k nevratnému odvedení tepelné energie. Přeměna zvukové energie vzniká následkem změn akustického tlaku o dané frekvenci.

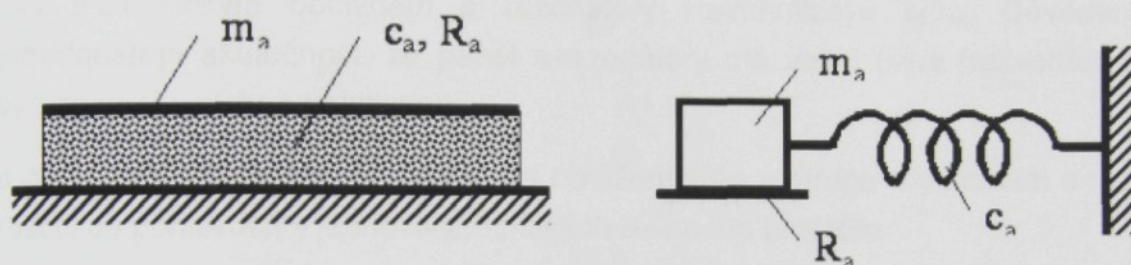


Obr. 8.5. – Způsob deformace vláken u porózních materiálů

8.3.1 Akustické prvky

Materiály založené na rezonančním principu lze rozdělit do tří skupin, uspořádání chovající se jako kmitající membrány, uspořádání chovající se jako kmitající desky a uspořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů.

Pro kmitající membrány se používá mechanická analogie akustické rezonanční soustavy skládající se z akustické hmotnosti m_a , připojené na akustickou poddajnost c_a , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem R_a . Chování membrány (desky) lze přirovnat k chování tělesa určité hmotnosti pružně zachyceného na pružině (reprezentované vzduchovým polštářem, případně vzduchem v pórech materiálu). Dopadne-li na akustickou rezonanční soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance.



Obr. 8.6. – Kmitající membrána – mechanická analogie

K rezonanci soustavy pak dochází na frekvenci

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m_{sq} d}} \quad (8.1)$$

kde c je rychlost šíření zvuku prostředím,

ρ je hustota vzduchu (porózního materiálu),

m_{sq} je plošná hmotnost membrány (desky),

d je tloušťka vzduchového polštáře (porózního materiálu).

Druhý typ rezonančních soustav, používaných pro pohlcování zvuku, jsou rezonátory Helmholtzova typu, uspořádané buď jednotlivě, nebo sdruženě do tzv. děrovaných panelů, které jsou montovány v určité vzdálenosti od odrazivé překážky.

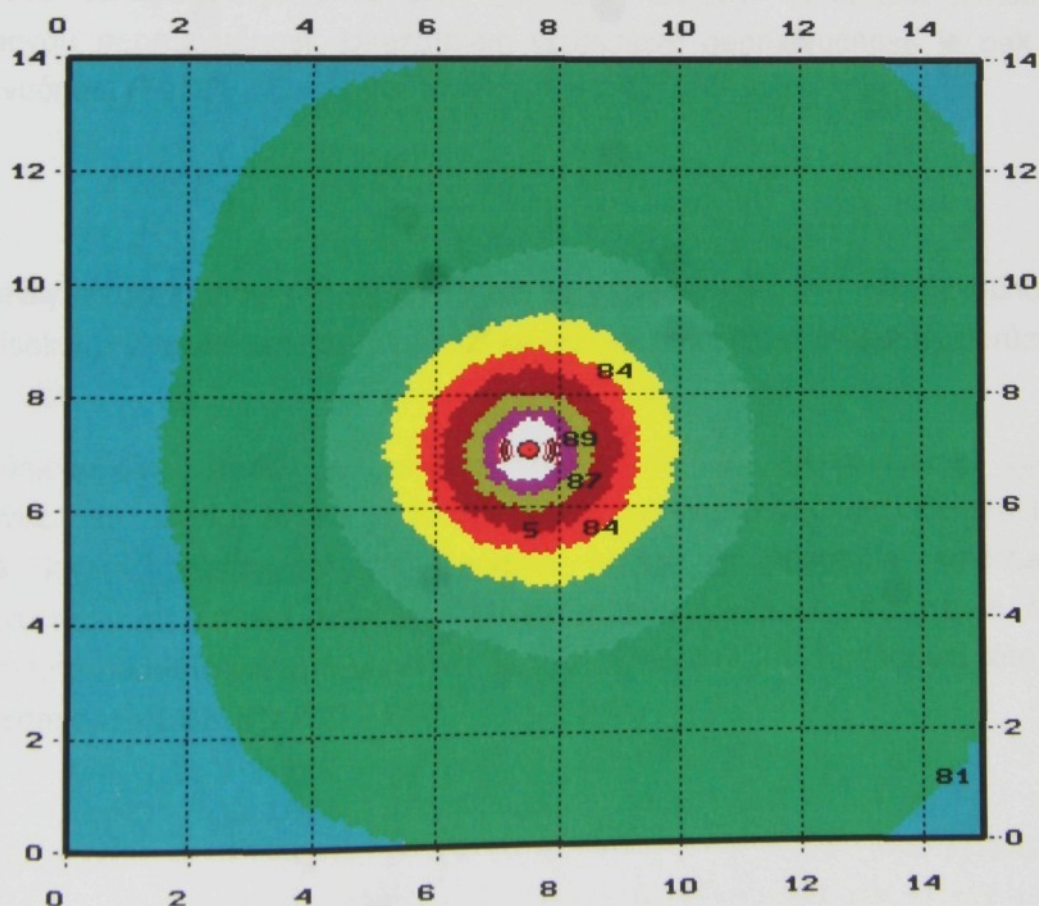
Frekvence děrovaného panelu je pak dána výrazem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l d}} \quad (8.2)$$

kde S_1 je plocha průřezu dutiny,
 S_2 je plocha rezonátoru,
 l je tloušťka panelu a
 d je vzdálenost od stěny.

Pro účely geometrické akustiky je nejvíce vhodné využití porózních materiálů. Použití akustických prvků, jako jsou kmitající membrány a desky je méně vhodné. Pomocí geometrické akustiky a mnou navrženého postupu výpočtu je nevhodné simulovat prvky s akustickým obkladem s rezonátory Helmholtzova typu. Důvodem této nevhodnosti je skutečnost, že panel s rezonátory má velmi úzká frekvenční pásma s výraznou akustickou pohltivostí.

Na následujícím obrázku je patrný vliv obložení stěn a stropu materiálem s rozdílnou akustickou pohltivostí v jednotlivých půlkách řešeného prostoru.



Obr. 8.7. – Vliv obložení stěn a stropu materiálem s rozdílnou akustickou pohltivostí



8.4 Neprůzvučnost a výpočet do exteriéru

Vzduchová neprůzvučnost, uvažovaná výpočetním algoritmem, je chápána jako vlastnost dělicí příčky nebo akustické bariéry, dále jen konstrukce, projevující se ztrátou akustické energie při přenosu vzduchem prostřednictvím konstrukce.

Schopnost konstrukce přenést část akustického výkonu dopadající zvukové vlny lze vyjádřit činitelem průzvučnosti τ [5]

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (8.3)$$

kde W_t je akustický výkon prošlý dělicí příčkou

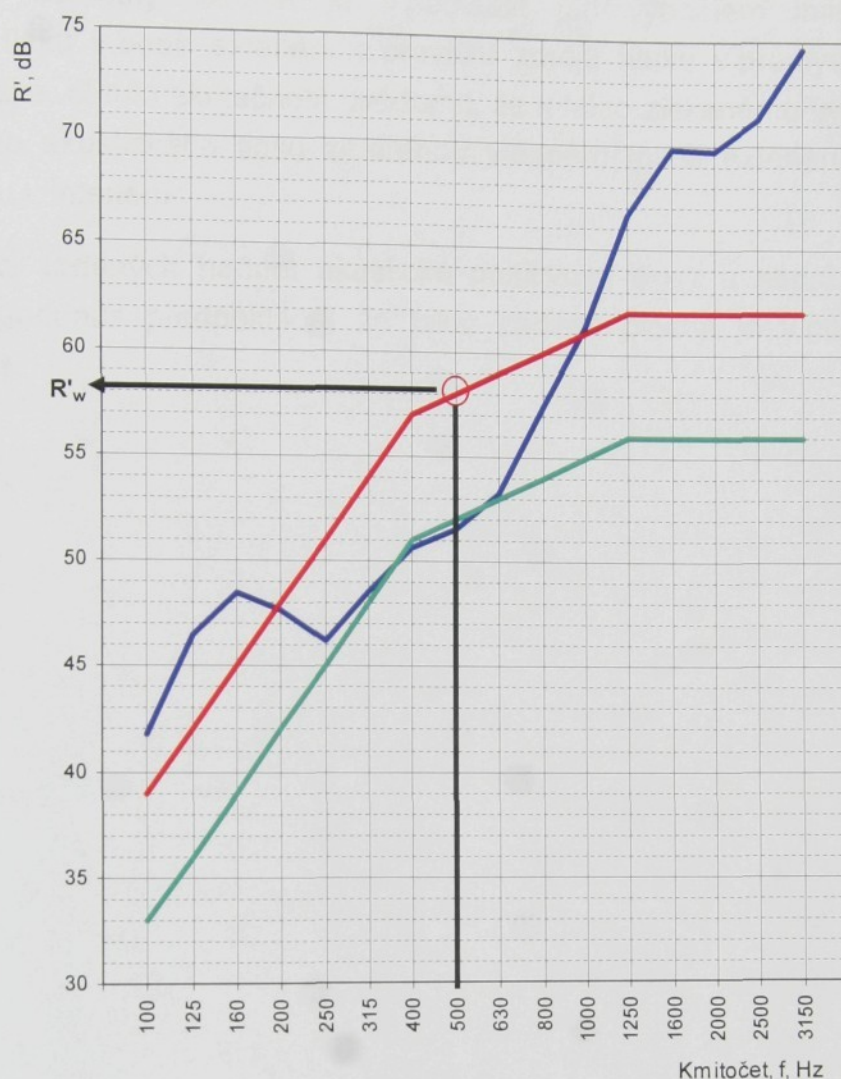
W_i je akustický výkon dopadající zvukové vlny

Činitel průzvučnosti je frekvenčně závislý a s rostoucí frekvencí klesá. Místo přenosové schopnosti je vhodnější vyjadřovat izolační schopnost konstrukcí, tj. vzduchovou neprůzvučnost. Ukazatelem vzduchové neprůzvučnosti je pak veličina neprůzvučnost R v dB.

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{W_i}{W_t} \quad (8.4)$$

Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost se vyjadřují váženou neprůzvučností R_w a jednočíselným ukazatelem, který přihlíží ke typické kmitočtové skladbě neprůzvučností R'_w .

Na následujícím grafu je ukázka naměřené a vyhodnocené vzduchové neprůzvučnosti. Modrá křivka je přímo naměřená neprůzvučnost. Zelená křivka je směrná křivka neprůzvučnosti. Červená křivka je posunutá směrná křivka neprůzvučnosti a v místě kde tato křivka protíná kmitočet 500 Hz je odečtena jednočíselná hodnota vážené stavební neprůzvučnosti R'_w . Vyhodnocení této hodnoty je provedeno dle ČSN EN ISO 717-1.



Obr. 8.8. – Odečet jednočíselné vážené stavební neprůzvučnosti

Výpočtový algoritmus při výpočtu v celkových vážených hladinách akustického tlaku využívá jednočíselně vyjádřené vážené stavební neprůzvučnosti R'_w .

Možnost zadávat neprůzvučnost jednotlivých prvků, tvořící dělicí prvky mezi exteriérem a interiérem je velmi výhodná. Pokud vytvoříme několik rovin, ve kterých nás budou zajímat předpokládaná hladiny akustického tlaku a tyto roviny budou umístěny před jednotlivé dělicí prvky, budeme schopni provést výpočet, kolik akustické energie vyzářené ze zdrojů hluku v interiéru, může proniknout přes samotné dělicí příčky. Tímto způsobem můžeme provádět výpočty směrem do exteriéru [3]. Pro výpočet předpokládaných hladin akustického tlaku v exteriéru budou postačující znalosti akustického tlaku na dělicích prvcích v exteriéru a jejich velikosti (plochy).

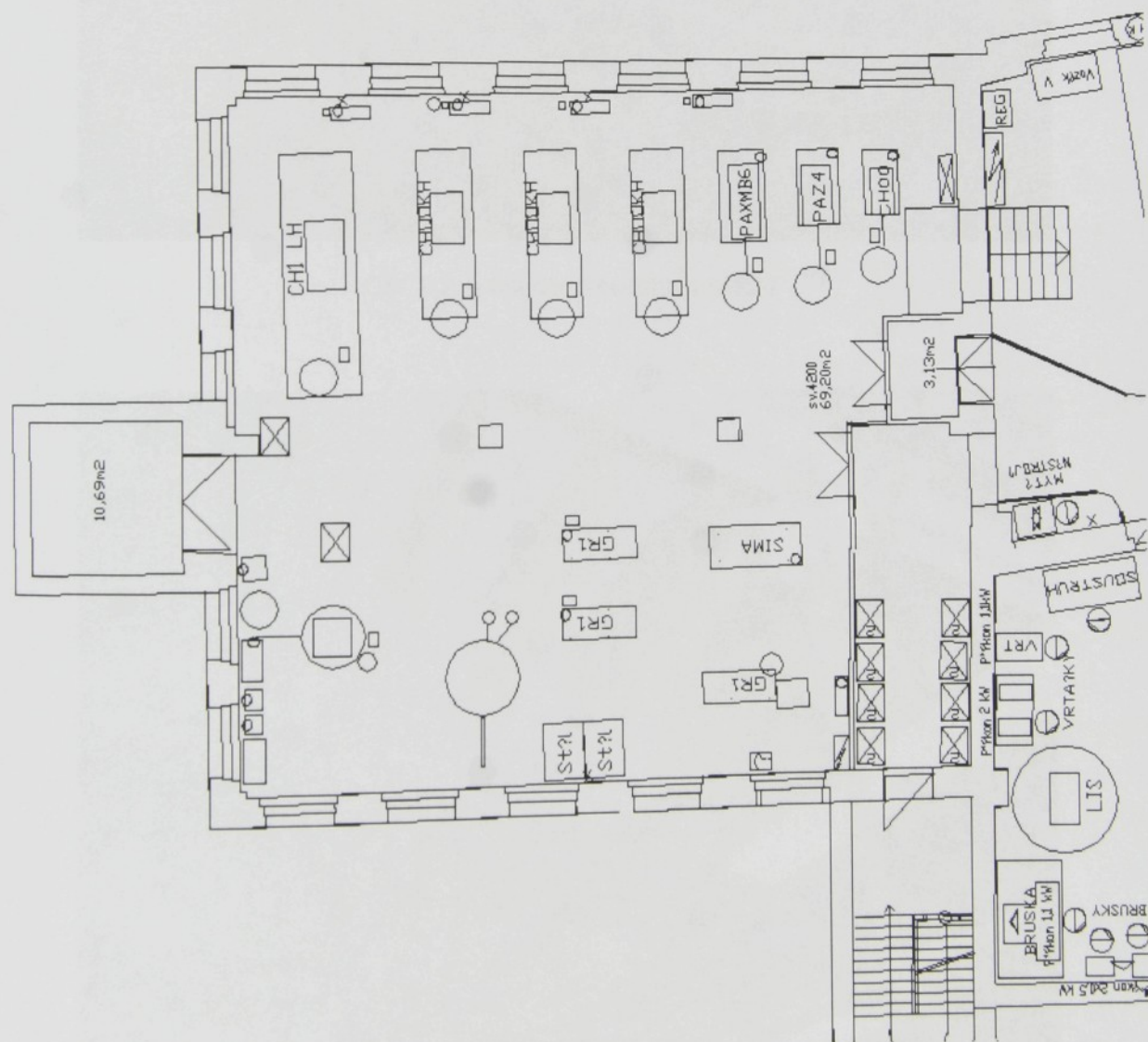


Výpočet pro samotný exteriér je v podstatě jen výpočtem imisních přírůstků akustického tlaku v bodě exteriéru z provozu zdrojů hluku v průmyslovém interiéru [17]. Je důležité, si tuto skutečnost uvědomit, že k takto získanému výsledku je nutné přičíst hladinu akustického tlaku změřenou v daném místě exteriéru při vypnutých zdrojích hluku v interiéru.

Při kombinaci zadaných hodnot akustické pohltivosti $\alpha = 1$ a neprůzvučnosti 0 dB výpočetní algoritmus předpokládá, že takto zadaná plocha je v podstatě otvorem v dělící příčce.

9 Praktická aplikace v průmyslovém prostředí

Praktická aplikace se zabývá akustickou situací v reálném průmyslovém prostoru. Zvoleným prostorem byl provoz „lisovny kovových dílů pro automobilový průmysl“. V hale je 13 významných zdrojů hluku reprezentovaných samotnými lisy, karusely a bruskami pro příležitostnou úpravu nástrojů. Zvolený průmyslový interiér představuje rozložením zdrojů hluku a použitím různých materiálů na stěnách typický průmyslový provoz. V interiéru zvoleného průmyslového prostoru byla nainstalována nezbytná protihluková opatření na stropě haly.



Obr. 9.1. – Půdorys řešeného prostoru



Obr. 9.2. – Interiér řešeného prostoru



Obr. 9.3. – Protihlukové úpravy na stropě



Koncepce strojů v hale je uzpůsobena a dominantně podřízena plynulému a bezbariérovému toku materiálu a jednotlivé etapy výroby na sebe plynule navazují. Toto hledisko, z výrobního a ekonomického pohledu jistě správné, není příliš vhodné z hlediska akustického, jelikož se dílčí hlučná pracoviště negativně ovlivňují, nehledě na další negativní faktory, tj. sčítání hlukových energií v jednom společném prostoru.

Tato praktická aplikace řeší v celém komplexu všechny nepříznivé jevy v oblasti akustické a to jak z makrohlediska (tj. celkové prostorové akustiky) potlačením odrazů zvuku od stěn uzavřeného prostoru tak i z mikrohlediska - potlačením dílčích emisí jednotlivých zdrojů hluku a tím jejich energetickému součtu a řešením jednotlivých dílčích pracovišť, kde dochází k nadměrné emisi hluku konkrétními protihlukovými opatřeními na daném zdroji.

9.1 Naměřené hladiny hluku

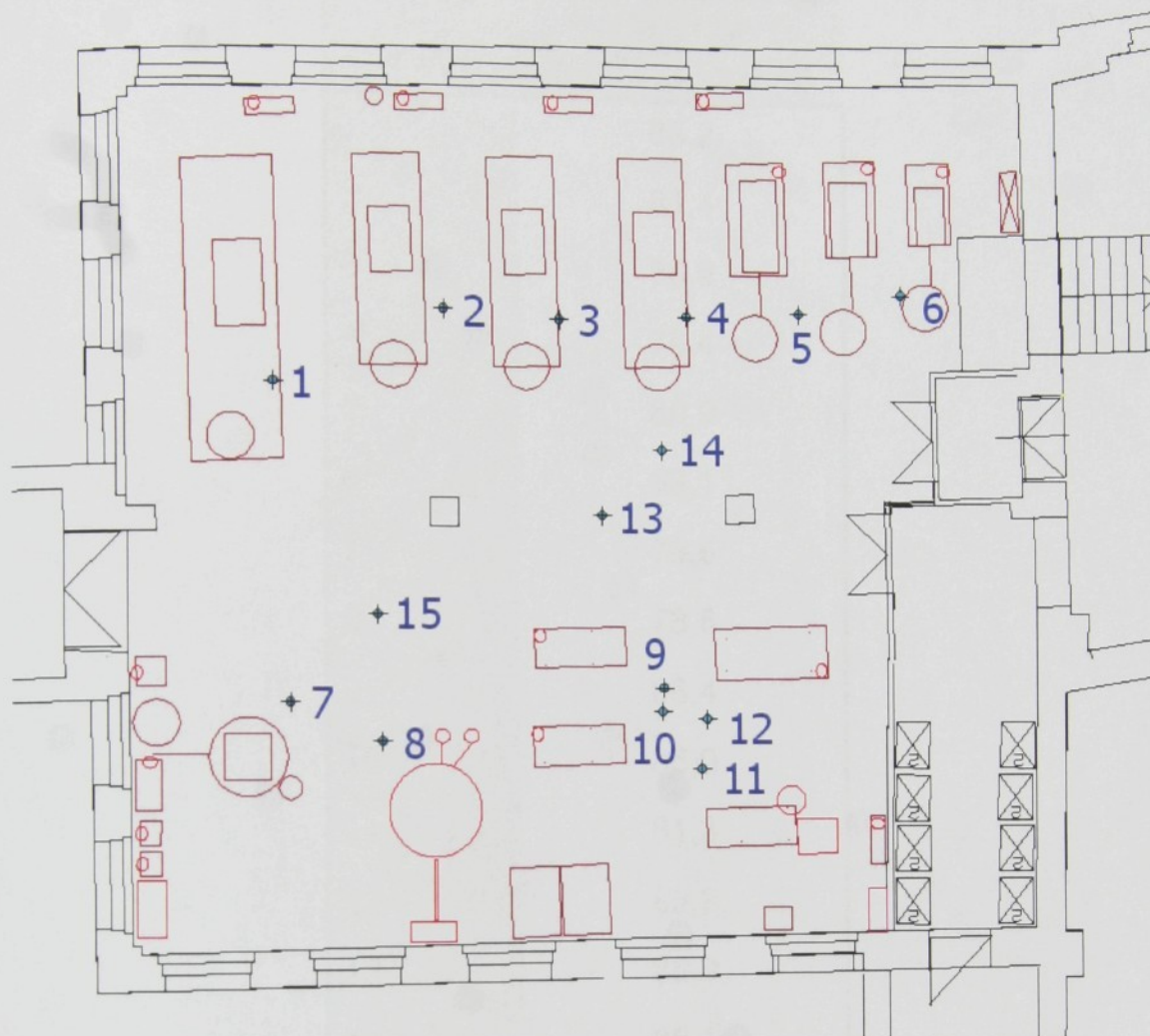
Vzhledem k nutnosti získat vhodné podklady o akustických vlastnostech jednotlivých zdrojů hluku v řešeném prostoru, bylo nutné provést měření hlučnosti těchto strojů. Dle prvních náměrů bylo rozhodnuto, že měřenou veličinou bude akustický tlak. Po změření akustického tlaku bude následně vypočten akustický výkon jednotlivých zdrojů hluku. Naměřené hodnoty hladin hluku byly podkladem pro matematický model.

9.1.1 Použitá měřicí technika

K měření akustického tlaku bylo použito přístrojové vybavení dostupné na katedře. Měření byla prováděna dvoukanálovým analyzátozem Brüel & Kjær Type 2148 a šestikanálovým analyzátozem Brüel & Kjær PULSE Type 3560 /C, který byl napojen na měřicí PC s nainstalovaným řídícím a měřícím programem PULSE LabShop s licencí 7771A (CPB Analysis Software) ve verzi 8. K analyzátoru byl připojen předzesilovač s kondenzátorovým 1/2" mikrofonom Brüel & Kjær Type 4165. Aparatura byla jako celek před měřením justována pomocí akustického kalibrátoru Brüel & Kjær Type 4230.

9.1.2 Místa měření

V uzavřeném prostoru haly byla provedena měření hluku u jednotlivých strojů v hale. Přesná umístění jednotlivých míst měření hluku jsou zobrazena na následujícím schématickém obrázku.



Obr. 9.4. – Místa měření v řešeném prostoru

9.1.3 Postup měření

Měření akustického tlaku bylo provedeno u jednotlivých strojů (zdrojů hluku) zvlášť a vždy byl v chodu jen měřený stroj. Naměřeny byly hladiny hluku v 1/3 oktáv a celkové hladiny. Měření bylo provedeno ve výšce 1,2 m ve vzdálenosti 1m od měřeného stroje (zdroje hluku). Při měření bylo měřidlo nastaveno na časovou konstantu SLOW a nastaveno na lineární průměrování s délkou 60s. Toto nastavení měřidla zajistilo dostatečné průměrování měřeného akustického tlaku během pracovních taktů jednotlivých strojů.

Naměřená třetinooktávová spektra jsou v příloze „Naměřené hodnoty praktické aplikace“. V následující tabulce jsou uvedeny celkové vážené hladiny akustického tlaku L_{Aeq} v jednotlivých místech.



Místo měření č.	Naměřená hladina hluku $L_{Aeq,T}$ [dB(A)]
1	83,2
2	81,4
3	86,5
4	79,4
5	80,9
6	83,1
7	76,5
8	78,6
9	86,4
10	85,0
11	81,3
12	83,9
13	86,9
14	86,1
15	85,6

Tabulka 9.1. – Tabulka naměřených hodnot akustického tlaku

9.2 Zadání prostoru

Charakteristika prostoru - akustické parametry

Z obecného hlediska jsou parametry uzavřeného prostoru, kde dochází k dominantnímu hluku na rozdíl od podobných výrobních prostor relativně horší, zejména pokud se týče doby dozvuku a pohltivosti vnitřní plochy, což je zapříčiněno použitím stavebně přirozeného, ale akusticky velmi nevhodného materiálu na plochách stěn a stropů (omítnuté zdivo, sklo a plech).



Řešený prostor	objem [m ³]	vnitřní plocha [m ²]	činitel pohltivosti
	913	686	0,12

Tabulka 9.2. – Parametry prostoru řešené haly

Uvedený střední činitel pohltivosti je dán jako střední hodnota pro celou halu. Tento střední činitel akustické pohltivosti byl zjištěn pomocí měření doby dozvuku.

9.3 Frekvenční omezení

Pro oddělení jevů řešených geometrickou akustikou je nutné vzít v úvahu zjednodušující předpoklad, podle kterého nás mohou zajímat jen řešené kmitočty splňující podmínku:

$$f > f_{Schr}$$

$$f_{Schr} = 4000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (9.1)$$

kde T je doba dozvuku

V je vnitřní objem řešeného prostoru

pro praktickou aplikaci, bude pro řešený průmyslový interiér

$$f_{Schr} = 127,25 \text{ Hz}$$

Charakteristické rozdělení akustického tlaku v prostoru pro jednotlivé vlastní kmitočty vypočteme podle postupu uvedeného v kapitole 3.1. Samotné vlastní frekvence vypočteme podle výrazu 3.6 uvedeného i níže.

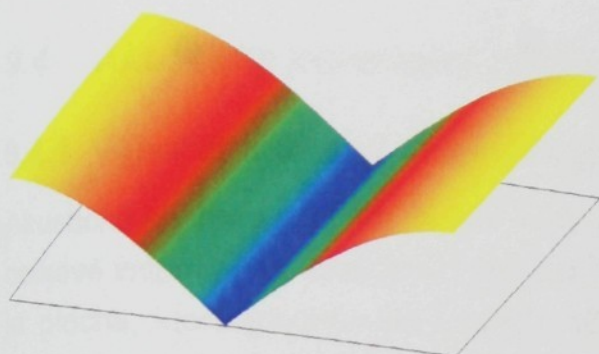
$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Pro nalezení minimální frekvence, omezující použitelnost geometrické akustiky na daný řešený interiér, můžeme uvažovat pouze kmitočty $f_{x,y,z}$ a vyšší, vypočtené pomocí $n_x, n_y, n_z > 3$.

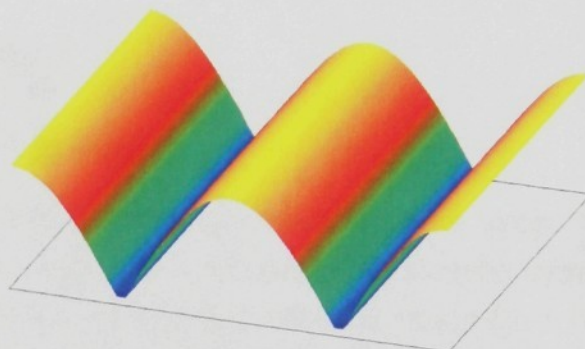
Na následujícím obrázku jsou ukázky stojatých vln (vlastních frekvencí) v řešeném

průmyslovém prostoru. U každé části obrázku jsou uvedeny příslušné hodnoty n_x , n_y , n_z a hodnota kmitočtu $f_{x,y,z}$.

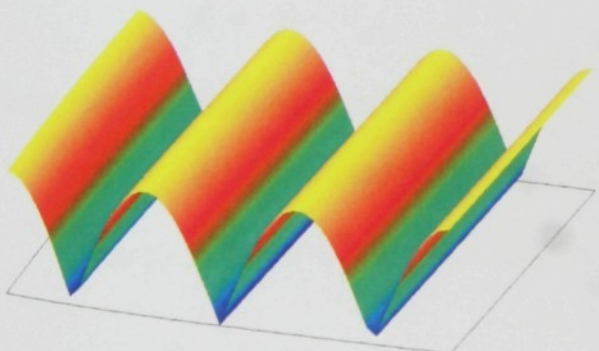
$n_x=1$, $n_y=0$, $n_z=0$, $f_{x,y,z} = 11,4$ Hz



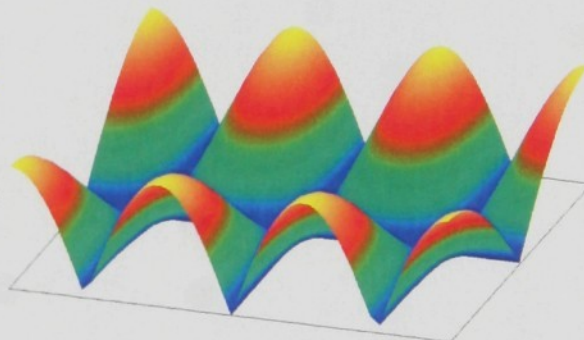
$n_x=2$, $n_y=0$, $n_z=0$, $f_{x,y,z} = 22,9$ Hz



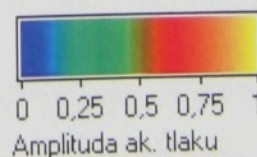
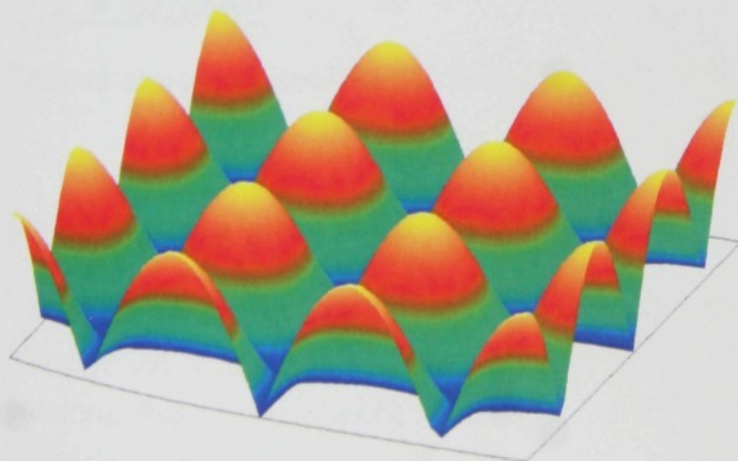
$n_x=3$, $n_y=0$, $n_z=0$, $f_{x,y,z} = 34,3$ Hz



$n_x=3$, $n_y=1$, $n_z=0$, $f_{x,y,z} = 36,4$ Hz



$n_x=3$, $n_y=3$, $n_z=3$, $f_{x,y,z} = 138,2$ Hz



Obr. 9.5. – Stojaté vlny v řešeném prostoru



Dominantní frekvence zjištěné na základě provedené frekvenční třetino-oktávové analýzy jsou od 500 Hz do 5 kHz. Vzhledem k tomu, že všechny dominantní frekvence u zdrojů hluku v řešeném průmyslovém interiéru jsou vyšší než f_{Schr} , je možno pro výpočet předpokládaných hladin hluku v řešeném průmyslovém interiéru využít metody geometrické akustiky.

9.4 Akustické parametry prostoru

9.4.1 Výpočet stávající akustické pohltivosti

Akustická pohltivost je závislá na kvalitě (resp. pohltivosti) materiálu stěn a stropu a na celkové vnitřní ploše uzavřeného prostoru. Akustická pohltivost průmyslového interiéru je plocha, která představuje plošnou velikost absolutně pohltivého materiálu v hale. Tato absolutní pohltivost představuje materiál o akustické pohltivosti $\alpha = 1$. Hodnotu akustické pohltivosti zavádíme pro snadné porovnání různých výpočtových variant. Vlastní výpočet bude proveden dle vztahu:

$$A = S \cdot \alpha_{stř} \quad (9.2)$$

kde: A je celková pohltivost [m^2]

S je celková vnitřní plocha [m^2]

$\alpha_{stř}$ je střední činitel pohltivosti

$$A = 686 \cdot 0,12$$

$$\underline{A = 82,32 \text{ m}^2}$$

Celková akustická pohltivost v řešeném průmyslovém prostoru je $82,32 \text{ m}^2$.

9.4.2 Výpočet dozvukové vzdálenosti:

V ohraničeném prostoru (v průmyslovém interiéru) v němž je zdroj hluku, je pole přímých vln v nejbližším okolí zdroje hluku a pole vln odražených v ostatní části prostoru. Pro hluk s převážně spojitým spektrem se v libovolném místě prostoru sčítá akustický tlak přímých a odražených vln. Pro akustický tlak proto můžeme napsat vztah:



$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha_{stř})}{S \alpha_{stř}} \right] \quad (9.3)$$

Při některých situacích nás může zajímat, v jaké vzdálenosti od zdroje hluku je alespoň přibližně rozhraní mezi polem přímých a odražených vln. Někdy se tato vzdálenost označuje dozvuková vzdálenost. Jelikož v místě rozhraní je stejný přínos části přímých vln jako vln odražených, mohou se při této podmínce porovnat obě části v hranaté závorce výše uvedeného vztahu.

Dozvuková vzdálenost - tj. rozhraní přímých a odražených vln, je pak dána vztahem:

$$r = \sqrt{\frac{S \cdot \alpha_{stř} \cdot Q}{16 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_{stř})}} = \sqrt{\frac{A \cdot Q}{16 \cdot \pi}} \quad (9.4)$$

kde: A celková pohltivost prostoru

Q směrový činitel

Vzhledem k tomu, že většina zdrojů hluku je nejvýše 1 - 2 m od podlahy, bude směrový činitel Q roven 2.

Po dosazení rozměrových hodnot uzavřeného prostoru do vztahu pak výpočet pro řešený prostor bude:

$$r = \sqrt{\frac{82,32 \cdot 2}{16 \cdot \pi}}$$
$$\underline{r = 1,8 \text{ m}}$$

Dozvuková vzdálenost v řešeném průmyslovém prostoru je 1,8 m.



9.5 Předepsané hlukové limity

Požadavky na úroveň a hodnocení akustické situace jsou dány zákonem č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví. Prováděcím právním předpisem je Nařízení vlády č. 502/2000 Sb. z 27.11.2000 o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací ve znění NV č. 88/2004 Sb.. Toto nařízení nabylo účinnosti dnem 1. dubna 2004.

Nejvyšší přípustná ekvivalentní hladina akustického tlaku v **pracovním prostředí** se stanoví součtem základní hladiny $L_{AZ} = 85 \text{ dB(A)}$ a korekcí na druh vykonávané činnosti podle následující tabulky:

Korekce na druh činnosti

Druh práce	korekce v dB
Práce koncepční s převahou tvořivého myšlení	- 40
Duševní práce velmi náročná a složitá spojená s velkou zodpovědností a soustředěním	- 30
Duševní práce vyžadující značnou pozornost, soustředěnost, s možností snadného dorozumění řečí	- 20
Duševní práce rutinní povahy s trvalým sledováním a kontrolou sluchem, práce vykonávaná na základě sluchových informací	- 10
Fyzická práce náročná na přesnost a soustředění	- 5
Fyzická práce bez nároků na duševní soustředění, sledování a kontrolu sluchem (rozhodující je ochrana sluchu)	0



Na základě nejvyšších přípustných ekvivalentních hladin akustického tlaku v pracovním prostředí uvedených v tabulce, lze vzhledem ke druhu činnosti předběžně stanovit požadavek ve výši $L_{Aeq} = 85 \text{ dB(A)}$.

9.6 Hluková situace

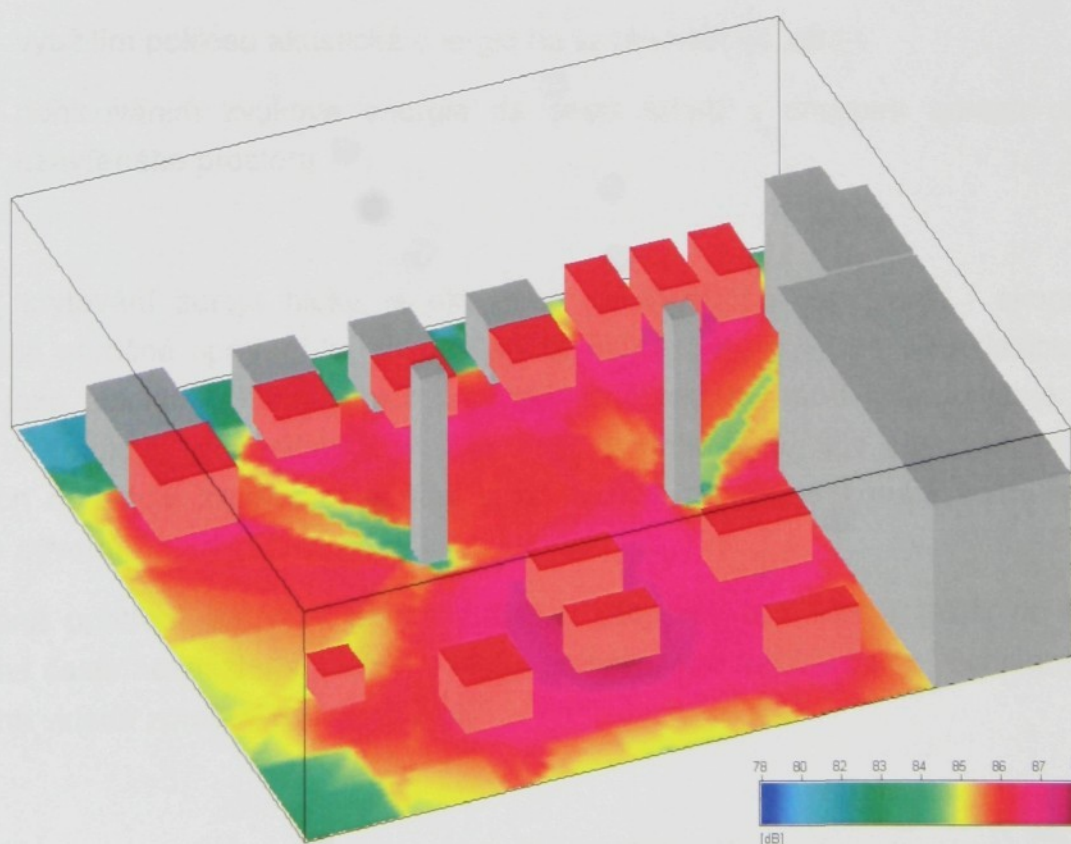
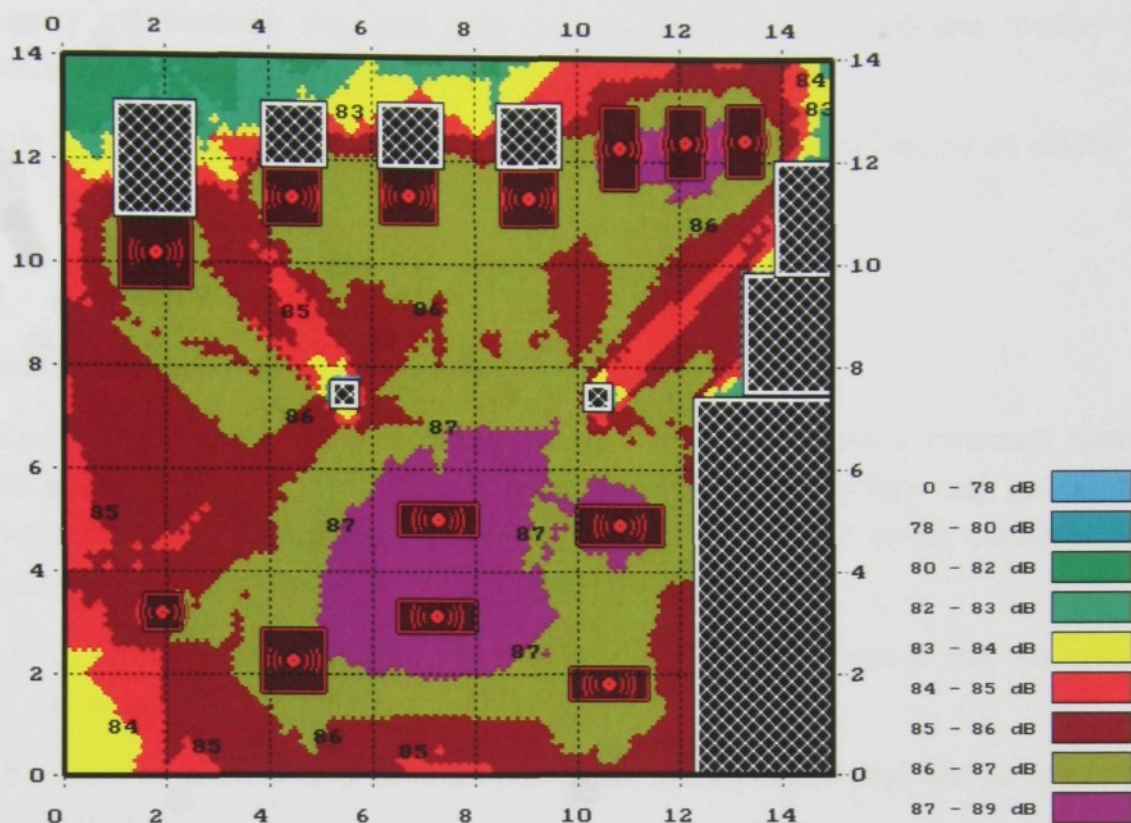
Matematická simulace rozložení předpokládaných hladin hluku byla provedena výše popsanou metodou, využívající geometrické akustiky.

Díky aplikaci software je možné velice snadno a rychle provádět výpočty hladin hluku jak v jednotlivých bodech výpočtového prostoru, tak i ve zvolené rovině výpočtového prostoru. Snadnou změnou vstupních hodnot si tak můžeme prohlédnout jak bude vypadat rozložení předpokládaných hladin hluku po provedení např. akustických úprav v průmyslovém interiéru změnou akustické pohltivosti jedné nebo více stěn.

K zadání je třeba znát akustické parametry zdrojů, které jsou nebo budou v prostoru provozovány. Lze tak např. dopředu stanovit nutné požadavky na ochranu osob v tomto prostoru, rozsah protihlukových opatření či reálnost splnění hygienických limitů.

9.7 Matematická simulace

Matematické simulace řešila hlukovou situaci v hale ve výpočtové rovině. Výpočtová rovina je rovnoběžná s podlahou a je ve výšce 1,6 m. Výsledné rozložení předpokládaných stávajících hladin hluku je zobrazeno na následujících obrázcích.



Obr. 9.6. – Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – původní stav



Výsledky matematické simulace byly ověřeny porovnáním naměřené hladiny hluku v referenčních místech č.13, 14 a 15.

V hale je 70,32% plochy ve kterých dochází k překročení limitní hladiny 85 dB(A).

9.8 Protihluková opatření

Obecné koncepce možných řešení [8]:

Z obecného hlediska má prostorová akustika určité možnosti k omezení hluku na cestě šíření, tj. přenosu od zdroje hluku k příjemci. Tato opatření mají zabránit toku zvukové energie k chráněným místům nebo tento tok alespoň snížit, čehož může být dosaženo:

- a) uzavřením (krytováním) zdroje hluku od okolního prostoru kde se pohybuje obsluha)
- b) využitím akustického stínu za překážkou (akustickou zástěnou, závěsem nebo bariérou)
- c) využitím poklesu akustické energie na vzdálenost od zdroje
- d) pohlcováním zvukové energie na cestě šíření a omezení odrazů od stěn uzavřeného prostoru

ad a/ krytování zdroje hluku je akusticky nejúčinnější a současně i ekonomicky nejméně náročné opatření ke snížení emise hluku. Lze jej využít jako klasické kryty nebo jako polokryty, které jsou z principiálního hlediska současně podobné jako u bodu b. Polokryty jsou výhodné jestliže obsluha stroje je nucena v určitých časových úsecích do stroje zasahovat a není proto možné provést dokonalé krytování již z těchto důvodů.

Uvedená opatření lze však použít pouze u stacionárních zdrojů hluku do kterých obsluha často nezasahuje a nikoli u hluku emitovaného např. z lisů a jiných strojů kde obsluha vkládá zpracovávaný materiál.

ad b/ Vzhledem ke specifickým podmínkám řešeného průmyslového prostoru tj. možnosti rozdělit halu mezi sloupy uprostřed haly, bude nutno o tomto řešení



uvažovat. Pomocí protihlukových zástěn je možné částečně zvukově odstínit zdroje hluku z jedné poloviny haly do druhé, čímž v místech „akustického stínu“ nebude docházet k energetickému sčítání s ostatními zdroji hluku.

ad c d/ Zdroj hluku, umístěný ve volném prostoru (na rovině odrážející hluk) vyzařuje hlukovou energii do okolí a hladiny hluku měřené ve zvětšující se vzdálenosti od zdroje pravidelně klesají o cca 6 dB na každé zdvojnásobení vzdálenosti.

9.9 Řešení hlukové situace

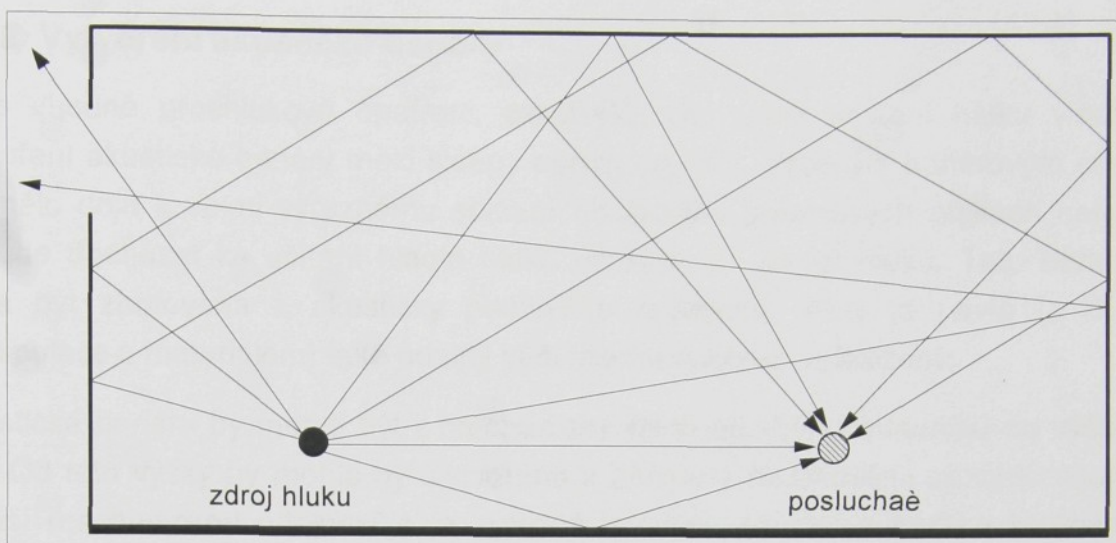
Konkrétní řešení ukázkového příkladu bude v daném případě představovat úpravy dvojího typu. Prvním typem úprav bude zvýšení akustické pohltivosti stěn haly. Druhým typem úprav bude vytvoření akustické bariéry mezi dvěma sloupy uprostřed haly.

V následující části jsou tyto navrhované úpravy dostatečně popsány.

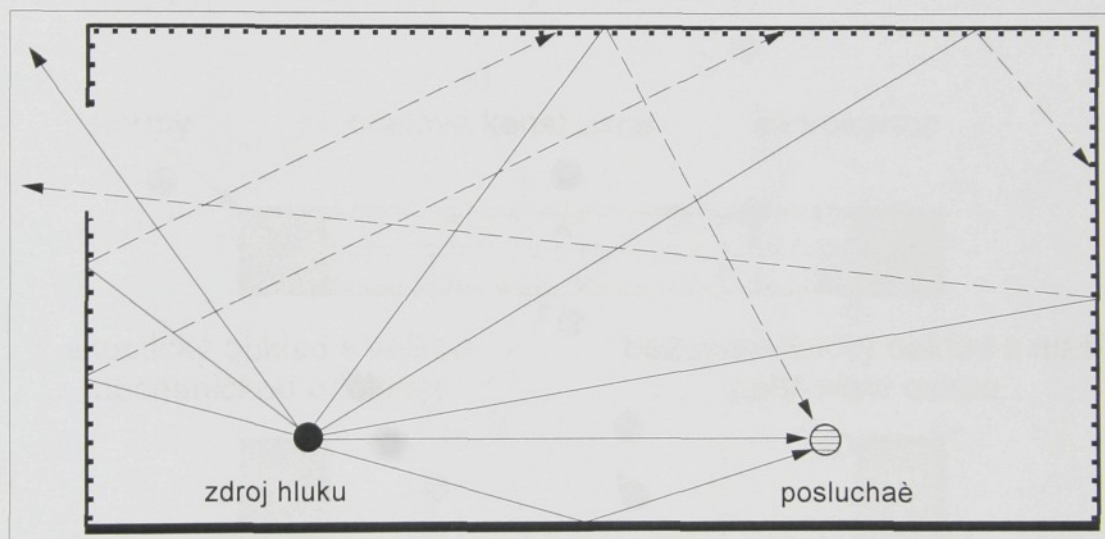
9.9.1 Zvýšení akustické pohltivosti stropu a stěn

Pomocí zvýšení celkové pohltivosti uzavřeného prostoru snížíme i hladiny hluku v tomto prostoru. Z toho vyplývá, že pro snížení hlučnosti je třeba všechny velké odrazové plochy (v praxi obvykle strop a stěny) upravit pomocí zvukopohltivých materiálů (obvykle na bázi minerálních vláken nebo jiných porézních materiálů). V případě požadavku na snížení hlučnosti v uzavřeném prostoru, tedy zvýšíme jeho celkovou pohltivost zvukopohltivou úpravou stropu (případně i stěn). Ke snížení hluku v prostoru dojde na téměř celé ploše vyjma blízkého okolí dominantních zdrojů (dozvuková vzdálenost). Uvedené opatření má vliv i na obsluhu dominantních zdrojů hluku (součet expoziční hladiny v době přípravy materiálu a přestávek) a zásadní vliv na snížení expoziční hladiny pro obsluhu ostatních vzdálenějších pracovišť.

Orientační přiblížení významu zvukové pohltivosti prostoru viz. následující schematické obrázky:



Obr. 9.7. – Akusticky neošetřený prostor



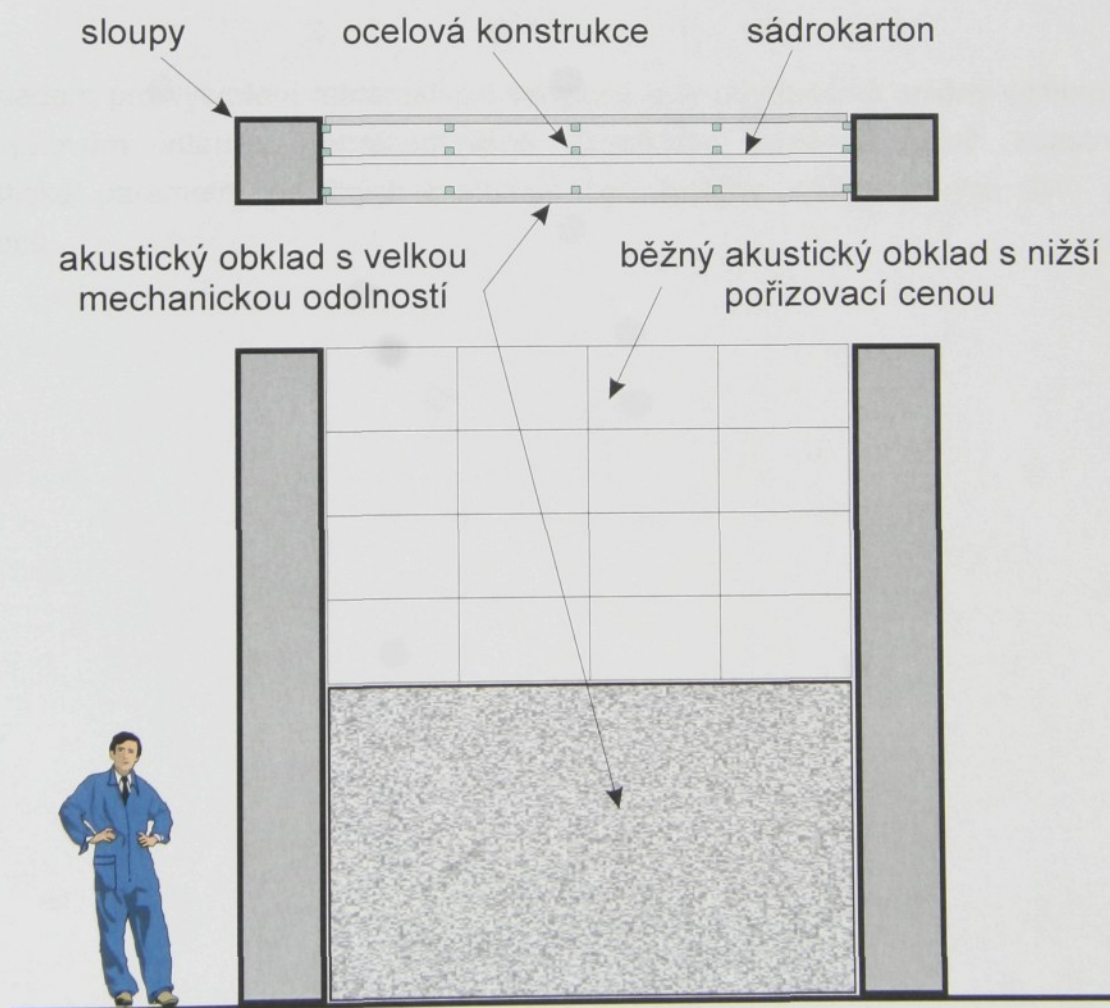
Obr. 9.8. – Prostor obložený zvukopohltivým materiálem

V našem konkrétním případě bude mít případný vliv obkladu částí stěn pozitivní vliv na hlukové hladiny v celém dozvukovém poli. V prostorách podobných řešené hale je také vhodnější použití rovinného (vodorovného) obkladu stropu zvukopohltivým materiálem. Stávající protihlukové panely by bylo vhodné zavěsit až pod takto nově vzniklý akustický podhled. Po provedení těchto protihlukových úprav dojde i k následnému snížení hlukové emise do venkovního prostoru.

9.9.2 Vytvoření akustické bariéry

Jako vhodné protihlukové opatření, zajišťující významné snížení hluku v hale, je vytvoření akustické bariéry mezi sloupy uprostřed haly. Vzniklým bariérovým efektem by mělo dojít k velmi výraznému snížení hlučnosti v jednotlivých půlkách haly, kde nebude docházet ke sčítání hladin hluku od různých zdrojů hluku. Tato bariéra by měla být zhotovena z akusticky pohltivého materiálu, který je navíc (z důvodů manipulace s materiálem) také odolný vůči mechanickému poškození.

Akustická bariéra by mohla být z mechanicky velmi odolného materiálu do výše min. 2m. Od této výšky by mohla být vytvořena z běžného akustického obkladu, který má menší mechanickou odolnost a je výrazně levnější. Akustická bariéra by měla být dvojitá a pro zvýšení neprůzvučnosti by měl být uprostřed např. sádrokarton. Návrh akustické bariéry je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 9.9. – Navržená akustická bariéra



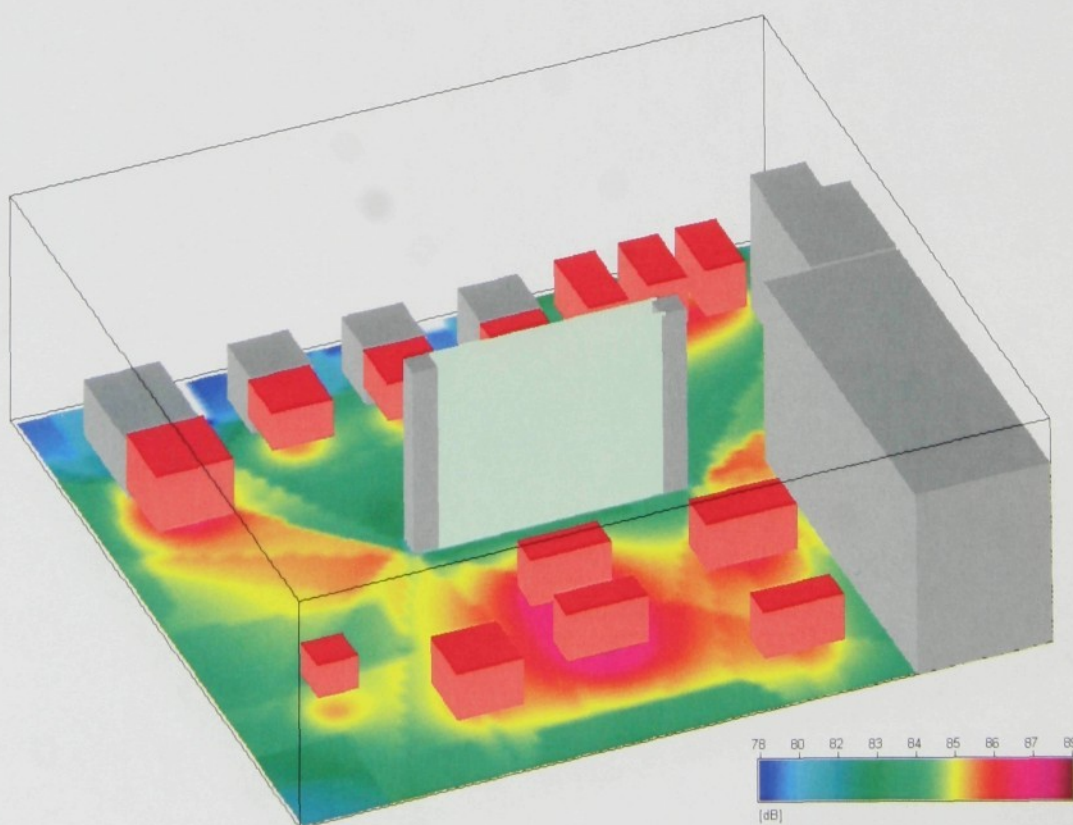
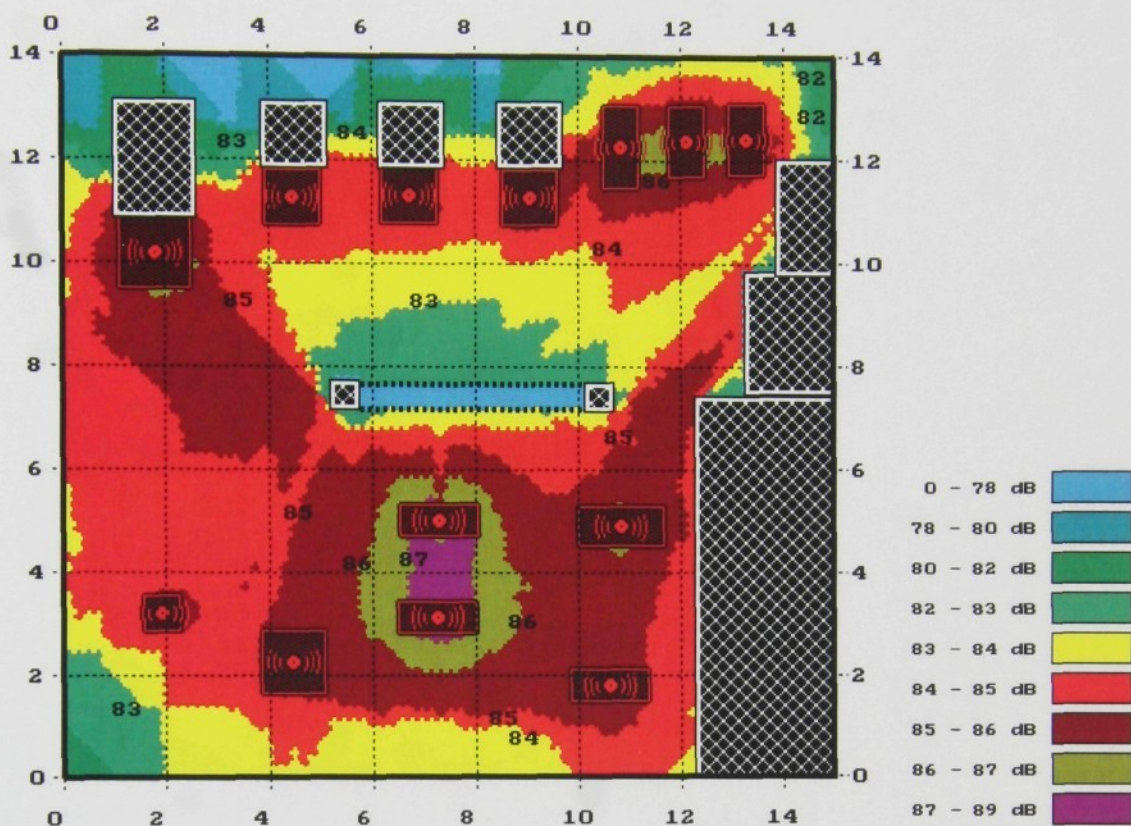
9.9.3 Matematické simulace

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny předpokládané hladiny hluku po provedení výše zmíněných protihlukových úprav v hale.

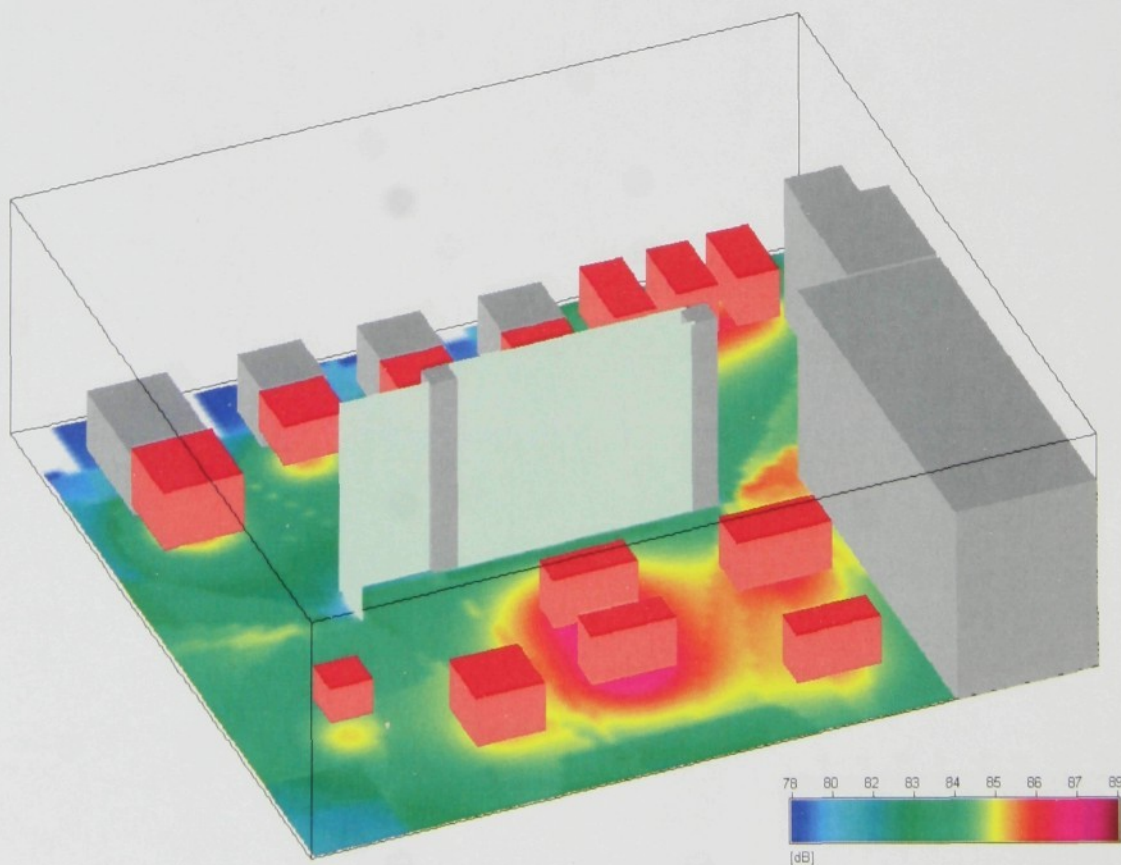
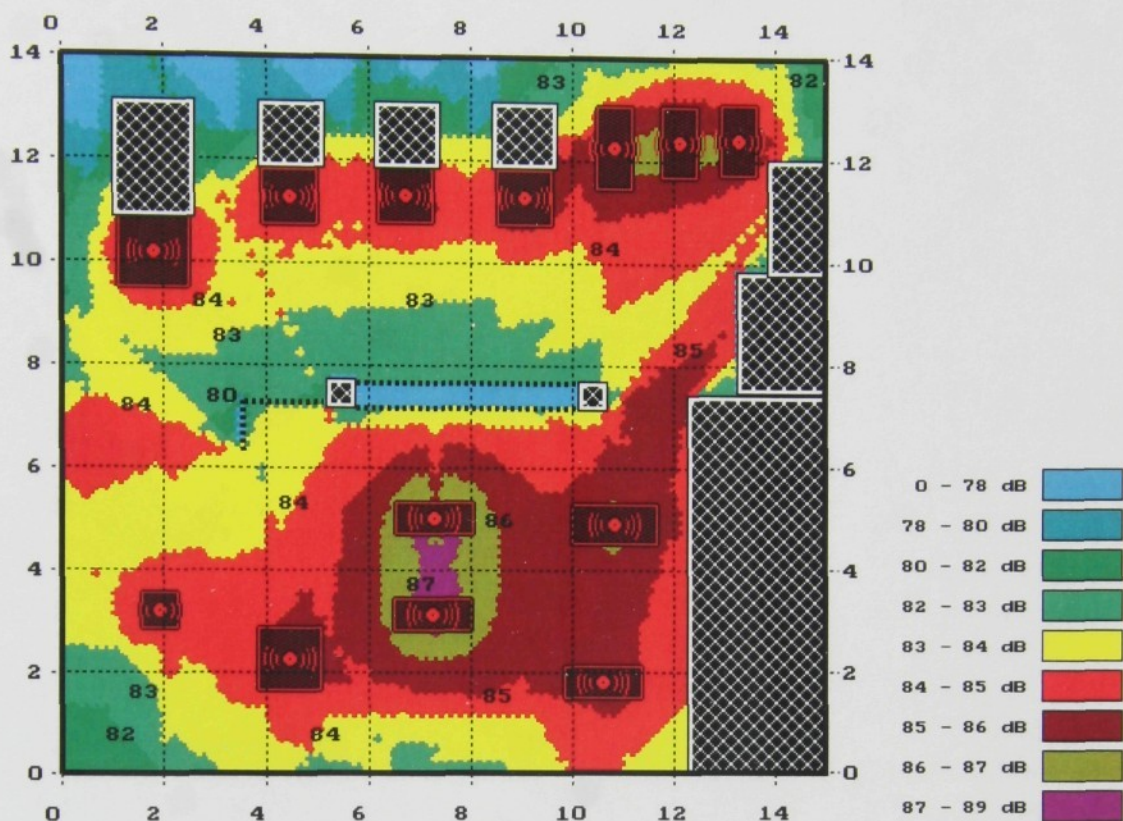
Matematické simulace byly provedeny pro tyto tři modely :

- **Akustická bariéra** vytvoření protihlukové bariéry popsané výše
- **Rozšířená akustická bariéra** vytvoření rozšířené protihlukové bariéry viz obrázky ze simulací níže
- **Akustická bariéra +protihlukový obklad** vytvoření výše popsané akustické bariéry a zvýšení akustické pohltivosti stropu a částí stěn

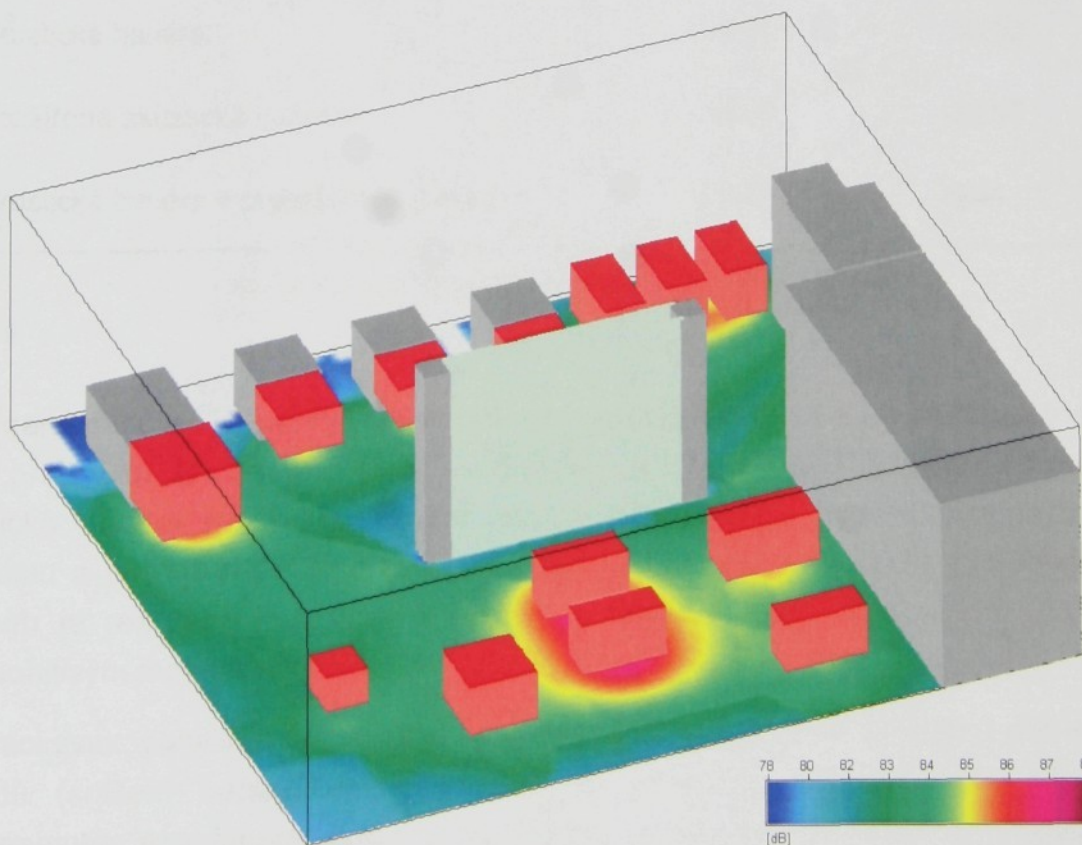
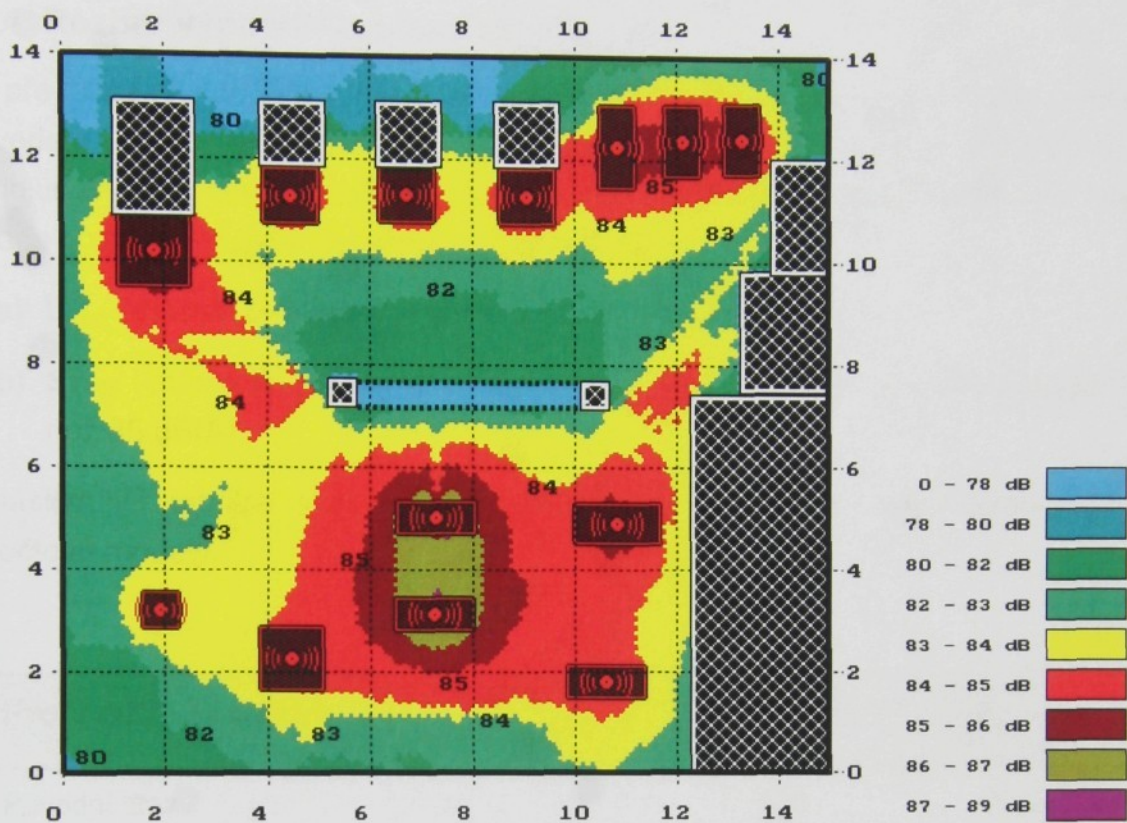
Podkladem pro vytvoření matematické simulace byly navrhované změny v samotném průmyslovém interiéru reprezentované akustickou bariérou různé konstrukce. Akustické parametry použitých materiálů byli zjištěny z katalogových listů jejich výrobců.



Obr. 9.10. – Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – akustická bariéra



Obr. 9.11. – Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – rozšířená akustická bariéra



Obr. 9.12. – Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – akustická bariéra + protihlukový obklad



9.9.4 Rozbor vypočtených hodnot

Na předchozích obrázcích jsou zobrazeny předpokládané hladiny hluku v hale po provedení jednotlivých protihlukových úprav. Aby bylo možno jednotlivé vlivy protihlukových úprav na hlučnost v hale rychle a snadno porovnat, bude celá hluková situace porovnávána dle následujících kritérií.

- a) L_{Aeq} - střední ekvivalentní hladina hluku v řešené rovině
- b) $S\%_{85}$ - procentuální vyjádření velikosti plochy, ve které je vyšší hladina hluku než 85 dB(A)

V následující tabulce jsou tato kritéria přehledně uvedena pro všechny použité výpočtové modely.

Protihlukové opatření	L_{Aeq}	$S\%_{85}$
Původní stav	85,8	70,32
Akustická bariéra	83,9	30,02
Rozšířená akustická bariéra	83,5	20,95
Akustická bariéra + protihlukový obklad	82,8	9,31

Tabulka 9.3. – Hodnocení účinnosti protihlukových úprav

Z uvedené tabulky je patrný velký význam protihlukové bariéry mezi sloupy v hale. Toto protihlukové opatření bude nezbytné k snížení hlučnosti v hale. Rozšířená akustická bariéra má také význam, ale je otázkou zda by nebránila přesunům materiálu a hotových výrobků po hale. Z tabulky je také patrné, že nejvýhodnějším řešením je realizace protihlukové bariéry a rovinné obložení stropu a částí stěn zvukopohltivým materiálem.

Instalaci zvukopohltivého materiálu bude třeba bezpodmínečně provést z akustických důvodů (snížení odrazů hluku od stěn a stropu a jeho následný pokles) v posuzovaném uzavřeném prostoru, kde by bez protihlukových opatření hladiny hluku přesahovaly maximální povolené hygienické limity (85 dB(A)).

Uvedená protihluková opatření jsou navíc univerzální a na rozdíl od krytů a jiných úprav fungují stejně účinně i při změně či rozšíření technologie v hale.

Jako optimální řešení, i z hlediska ekonomického, ve zvoleném průmyslovém prostoru byla zvolena pouze realizace protihlukové bariéry.

Po instalaci výše uvedené protihlukové bariéry poklesne ekvivalentní hladina hluku v průmyslovém prostoru, v cca. 70% plochy, pod maximální limitní hodnoty pro hluk v pracovním prostředí.

9.10 Realizované protihlukové úpravy

Během příprav na realizaci protihlukových úprav bylo objednatelem a firmou realizující vlastní protihlukové úpravy rozhodnuto o změně konstrukce protihlukové bariéry. Tato bariéra proto byla v celé výšce realizována z materiálu s vysokou mechanickou odolností.



Obr. 9.13. – Realizovaná akustická bariéra



Materiál použitý na realizaci protihlukové bariéry má v požadovaných frekvencích o něco menší akustickou pohltivost než původně předpokládaný materiál s malou mechanickou odolností.

Celková akustická pohltivost byla ještě navíc snížena vytvořením okna, které bylo do akustické bariéry zabudováno (toto okno není na předchozím obrázku znázorněno). Toto snížení akustické pohltivosti však bylo úplně kompenzováno částečným obložením stropu a malé části stěn. Tento dodatečný obklad byl rovnoměrně rozmístěn po hale.

9.11 Ověření vypočtených hladin hluku

Geometrický model popisující rozmístění jednotlivých vnitřních těles, zdrojů hluku a ploch na stěnách byl vytvořen ze schématického podkladu a upřesněn změřením rozměrů.

Akustické vlastnosti jednotlivých stěn, dělicích ploch a těles v interiéru byly do matematického modelu zadány z databáze akustických pohltivostí materiálů používaných v průmyslových interiérech.

Samotné akustické výkony jednotlivých zdrojů hluku byly dopočítávány z naměřených hladin akustického tlaku v definované vzdálenosti od geometrického středu zdroje hluku. Toto zjednodušení bylo použito na základě prvních náměrů, kdy bylo zjištěno, že stroje používané v řešeném interiéru nemají z hlediska šíření hluku výrazný směrový charakter.

Po kompletním zadání řešeného interiéru, byly prováděny výpočty předpokládaných hladin akustického tlaku v referenčních bodech. Po těchto výpočtech následovalo porovnání vypočtených a naměřených hladin akustických tlaků.

V případě rozdílů byla provedena korekce akustických výkonů u těch zdrojů, které měly v referenčním bodě největší vliv na odchylku proti naměřené hodnotě.

Tento proces byl opakován do té doby, dokud nebyly odchylky vypočtených a naměřených hladin akustických tlaků menší než 0,1 dB(A). (*Dosažení této chyby znamenalo úpravy akustického výkonu u 5 zdrojů hluku průměrně o 0,8 dB(A)*). Po tomto procesu přizpůsobování matematického modelu skutečnosti byly prováděny všechny matematické simulace.

Vzhledem k rozsahu navrhovaných protihlukových úprav bylo předpokládáno, že jim



přizpůsobený matematický model bude také vyhovovat.

Na následující tabulce jsou uvedeny naměřené a vypočtené hladiny akustického tlaku v referenčních bodech. Uvedené vypočtené hodnoty jsou pro stav uvedený jako „původní stav“.

Místo měření č.	Naměřená hladina hluku $L_{Aeq,T}$ [dB(A)]	Vypočtená hladina hluku (původní stav) $L_{Aeq,T}$ [dB(A)]	Odchylka v dB
13	86,9	86,9	0
14	86,1	86,1	0
15	85,6	85,5	-0,1

Tabulka 9.4. – Srovnání naměřených a vypočtených hodnot hladin akustického tlaku v referenčních bodech – původní stav



10 Závěry doktorské disertační práce

10.1 Význam výsledků doktorské disertační práce

Mnou navržená nová metoda výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech a následná vizualizace vypočtených hodnot s sebou nese především zjednodušení a všeobecnou srozumitelnost při hodnocení hlukové problematiky. To je důležité zejména pro možnost zapojení ostatních zúčastněných při řešení problematiky snižování hluku v průmyslových prostorech.

V době, kdy se výroba odehrává především v regulované oblasti, kde jsou jasné definovány odpovědnosti, forma výstupů, způsob kontroly, nároky na vzdělání, měřidla a metodiky je i vizualizace předpokládaných hladin hluku v řešeném interiéru, cestou vedoucí k vyšší srozumitelnosti a většímu množství informací, které jsme schopni zpracovat. Vhodné výpočetní algoritmy umožňující přehledné zobrazení výsledků hlukové situace jsou cestou jak tento obor učinit více srozumitelnější. Vizualizace předpokládaných hladin v interiéru je vhodná i s ohledem na požadavky možných prezentací výsledků.

Výsledkem této doktorské disertační práce je výpočetní algoritmus, který nám pomáhá řešit problematiku hluku v průmyslových prostorech a ukazuje způsoby šíření hluku v řešených interiérech a metody jeho efektivního snižování.

Význam vhodného výpočetního algoritmu je ještě umocněn při řešení konkrétní hlukové situace a zejména při cíleném návrhu protihlukových opatření. Díky takto získaným výsledkům, můžeme mnohem efektivněji navrhnout vhodná protihluková opatření a to jak z hlediska technického (akustického) tak i z hlediska ekonomického.

10.2 Osobní přínos doktoranda

Metodiku výpočtu předpokládaných hladin hluku jsem během svého doktorského studia kompletně navrhl, na základě rozborů jednotlivých metod, kterými lze problematiku hluku v průmyslových interiérech řešit. Metodiku výpočtu využívající metod geometrické akustiky, lze dle mého názoru i relativně snadno a komplexně realizovat.

Po uvážení výběru metodiky jsem prakticky celou metodu vytvořil do její současné



podoby. Během vývoje byl každý krok porovnáván se známým interiérem. Tento postup byl důležitý a zabezpečil tak, že bylo možno celou metodu realizovat po krocích.

Na závěr byla metoda na několika příkladech ověřena a stanovil jsem i podmínky, které musí řešený průmyslový interiér splňovat, aby bylo navrženou metodu použít s minimálními chybami ve výpočtu.

10.3 Nové poznatky a závěry pro rozvoj oboru

V počátcích vývoje vlastního výpočetního algoritmu jsem řešil problém, jaký typ metody zvolit za základ. Dlouhou dobu jsem si pohrával s myšlenkou, celý algoritmus realizovat pomocí metody konečných prvků dále jen MKP. Při úvahách o jednotlivých částech výpočtového algoritmu se však postupně ukazovalo, že některé kroky jsou těžce realizovatelné. Například nastavení akustických parametrů zdrojů z naměřených hodnot hluku na obalových plochách. Dalším problémem by bylo komplikované řešení pro nejzajímavější celkové hladiny. Pomocí MKP by bylo snadné řešit ohyb a interferenci vlnění, ale akustické parametry zdrojů by nebylo možné zadávat v celkových hladinách (toto je velký nedostatek pro stroje o jejichž nákupu uvažujeme a v katalogu je uvedena pouze jedno číselná hodnota akustického výkonu). Při realizaci výpočtového algoritmu pomocí MKP by bylo nutné vše řešit ve zvolených frekvenčních pásmech.

Jak se ukazuje byla volba geometrické akustiky relativně vhodnou volbou a ani v současné době bych tuto volbu neměnil. Z výsledků této práce vyplývá, že se výsledky výpočtů předpokládaných hladin akustického tlaku pomocí geometrické akustiky vyrovnají doposud používaným metodám. S neustále se zvyšujícím výkonem současných PC některé negativní vlastnosti metody výpočtu pomocí geometrické akustiky ustupují do pozadí. V současné době předělávám celý algoritmus pro výpočty na více procesorových procesorech a ukazuje se že očekávaný příchod čtyř jádrových procesorů (schopných řešit čtyři paprsky současně) bude velkým přínosem v rychlosti. S tímto zrychlením bude možné některá zjednodušení zcela odstranit.

Zcela jedinečným přínosem jsou ale vlastní metaechogramy. Vyhodnocením metaechogramů se nechá zjistit vliv jednotlivých zdrojů hluku na hlukovou situaci v daném bodě. Z metaechogramů můžeme zjistit i účinnost akustické pohltivosti jednotlivých ploch. Touto účinností je myšleno zjištění od kterých ploch se odrážejí do řešeného místa paprsky s největší přenášenou akustickou energií. Této úpravy by šlo



využít i pro návrh místa, kam umístit protihlukové panely. Touto úpravou by byly návrhy případných protihlukových opatření více efektivnější.

10.4 Přesnost metody a možnosti zlepšení

Při návrhu výpočetního algoritmu jsem si dal velký požadavek na rychlost a na přesnost metody. Přesnost výpočtu předpokládaných hladin akustického tlaku je výrazně závislá na členitosti řešeného průmyslového interiéru. U velmi členitého interiéru, neobdélníkového půdorysu, plného většího počtu vnitřních těles, s velmi rozdílnými akustickými pohltivostmi stěn je chyba výpočtu v některých místech větší než 3 dB.

Chyba výpočtu větší než 3 dB se mi zdá relativně velká a proto bude nutné na této části výpočetního algoritmu ještě nějak zasáhnout. Největší zjištěná chyba v členitém interiéru byla 3,7 dB.

Tato chyba je pravděpodobně nejvíce způsobena nepřesným výpočtem v prvním chodu. Toto je fakt velký problém a nalezení té nejkratší spojnice mezi zdrojem hluku a buňkou je opravdu komplikované.

Tento členitý interiér nebyl řešen v celé rovině, ale v rámci vývoje algoritmu byl prováděn výpočet předpokládané hladiny hluku ve zvolených bodech, kde se tato velká chyba nechala předpokládala (za tělesy a v místech malého počtu paprsků procházejících buňkami v řešené rovině).

U málo členitých průmyslových prostorů, se kterými jsem se běžně setkával, je chyba výpočtu pomocí mnou navrženého algoritmu do 1,2 dB. Tuto chybu považuji za absolutně vyhovující. I takto malá chyba výpočtu se však nechá ovlivnit jedním způsobem.

Tento způsob vychází z provedení měření akustického tlaku v několika náhodně zvolených bodech v celém interiéru. Po provedení výpočtu se stačí podívat na odchylky naměřených a vypočtených hodnot, zjistit jaký zdroj hluku má jaký vliv na posuzované body a poupravit akustické parametry zdrojů hluku a prostředí, aby ve všech posuzovaných bodech byl minimalizován rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou. Tento způsob snižování chyby výpočtu je poměrně pracný a časově velmi náročný. Možná by bylo vhodné tento postup nějakým vhodným způsobem automatizovat.



Na tomto místě bych chtěl zdůraznit opravdu velký význam metaechogromu, díky kterému lze snadno zjistit, jaké jsou v daném místě přírůstky od jednotlivých zdrojů hluku.

10.5 Co do budoucna

Vývoji mnou navrženého algoritmu bych se chtěl věnovat i nadále. Zejména bych chtěl vyřešit relativně velkou chybu při výpočtu předpokládaných hluku v členitých interiérech a interiérech neobdélníkového půdorysu. Dále bych se chtěl zaměřit na automatické přizpůsobování zadaných hodnot naměřeným hodnotám v referenčních bodech. Po vyřešení těchto relativně velmi komplikovaných problémů by se mohla otevřít cesta do exteriéru. Výpočet v exteriéru by pak nebyl prováděn jen ve zvolených bodech, ale v celých plochách i s uvažováním okolního terénu, zástavby a jiných zdrojů hluku.

Věřím, že cesta z průmyslového interiéru do exteriéru je pro výpočtové metody využívající geometrickou akustiku možná, ale také předpokládám že bude plná úskalí které se začnou postupně projevovat v době jejich řešení. Teď již ale vím, že se řešení těchto problémů dá s úspěchem nalézt.



Seznam použité literatury

- [1] NOVÝ, R. : Hluk a chvění, Praha, ČVUT 2000
- [2] KOLMER, F., KYNCL, J : Prostorová akustika, Praha, SNTL 1980
- [3] LIBERKO, M. : Úvod do urbanistické akustiky, Praha, ČSVTS 1989
- [4] SMETANA, C. : Hluk a vibrace, Praha, Sdělovací technika, 1998
- [5] ČECHURA, J. : Stavební fyzika 10, Praha, ČVUT, 1999
- [6] HASSALL, J. R., ZAVERI, K. : Acoustic Noise Measurements, Nærum, Brüel & Kjær, 1979
- [7] ŽIARAN, S. : Hluk a vibrácie, Bratislava, SVŠT, 1988
- [8] BERANEK, L. L. : Snižování hluku, Praha, SNTL, 1965
- [9] NĚMEČEK, P. : Hluk v technické praxi I., Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1998
- [10] ŠKVOR, Z. : Akustika a elektroakustika, Praha, Academia, 2001
- [11] DRS, L., JEŽEK, F. : Matematické metody v počítačové grafice, Praha, ČVUT, 1988
- [12] KUTMAN, O. : Fyzika II (Akustika), Praha, ČVUT 1991
- [13] KRUPKA, F., KALIVODA, L. : Fyzika, Praha, 1989
- [14] KOČANDRLE, M., BOČEK, L. : Analytická geometrie, Praha, Prometheus, 2001
- [15] REKTORYS, K. : Přehled užití matematiky, Praha, Prometheus, 1996
- [16] ČSN 01 1613 - Výpočet předpokládaných hladin hluku v průmyslových prostorech, Praha, ČNI, 1989
- [17] ČSN ISO 9613-2 – Útlum při šíření zvuku ve venkovním prostoru, Praha, ČNI, 1998
- [18] Noise Control, Nærum, Brüel & Kjær, 1986
- [19] Measurements in Building Acoustic, Nærum, Brüel & Kjær, 1988
- [20] Sound Intensity, Nærum, Brüel & Kjær, 1993
- [21] Technical Review No.1/2004, Nærum, Brüel & Kjær, 2004



Seznam autorových publikací souvisejících s danou problematikou

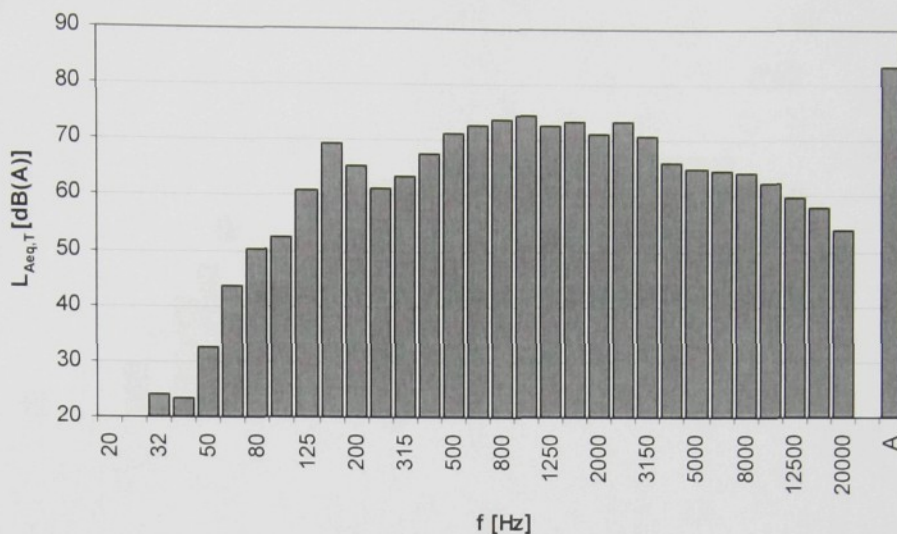
- [A1] NOVÁK, J.: Hluk v průmyslovém interiéru a jeho snižování. In: VIII. International Conference on the Theory Machines and Mechanisms. TU Liberec, Liberec 2000. ISBN 80-7083-418-8, pp. 529-534.
- [A2] NOVÁK, J.: Počítačová simulace v prostorové akustice. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2001", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. ISBN 80-7078-869-0, pp. 42-47.
- [A3] NOVÁK, J.: Prostorová akustika - vizualizace hluku. Spolehlivost a diagnostika v dopravní technice 2001 – Univerzita Pardubice. ISBN 80-7194-397-5, pp. 114-119.
- [A4] NOVÁK, J.: Vizualizace hluku. Výsledky grantu FRVŠ 1429/2001. TU Liberec, 2001.
- [A5] NĚMEČEK, P., NOVÁK, J.: Vizualizace hluku. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2002", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. ISBN 80-248-0045-4.
- [A6] NOVÁK, J.: Vizualizace diagnostických veličin, 64. Akustický seminář, Česká akustická společnost, Vysoké nad Jizerou 2002. pp.4 ISBN 80-01-02648-5.
- [A7] NOVÁK, J.: Měření akustické pohltivosti. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2004", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. pp.6. ISBN 80-248-0465-4.
- [A8] NOVÁK, J.: Zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2004", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. pp.4. ISBN 80-248-0465-4.
- [A9] NOVÁK, J.: Akustické vlastnosti materiálů. 45. mezinárodní konference Kateder částí a mechanismů strojů, VÚT Brno, Brno 2004, pp.4. ISBN 80-214-2702-7.
- [A10] NOVÁK, J.: Počítačová podpora měření zvuku. 69. Akustický seminář, ČVUT Praha 2004, pp.6. ISBN 80-01-03081-4.
- [A11] NOVÁK, J.: Akustická pohltivost a neprůzvučnost, 3. setkání uživatelů PULSE, Spectris Praha spol. s r.o. 2005 pp.6. ISBN 80-239-4909-8.
- [A12] NOVÁK, J.: Aplikace pro Pulse LabShop, 3. setkání uživatelů PULSE, Spectris Praha spol. s r.o. 2005 pp.6. ISBN 80-239-4909-8.

PŘÍLOHA

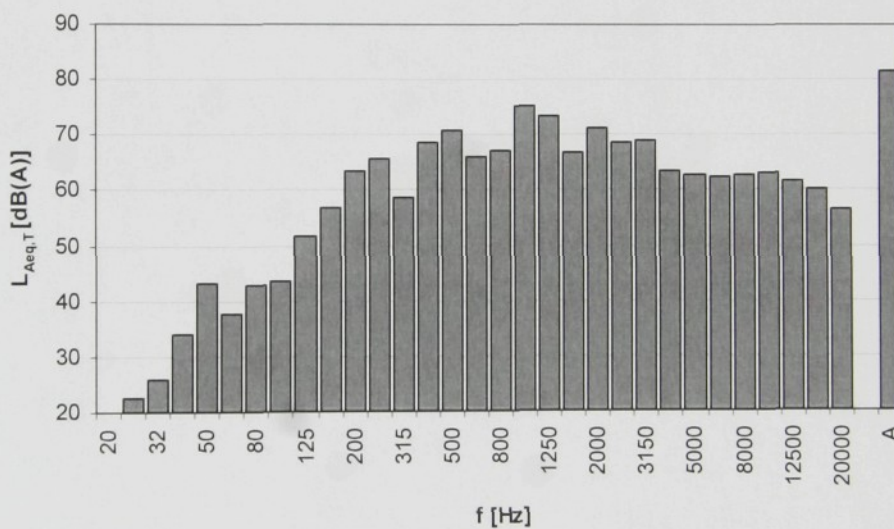
Naměřené hodnoty – Praktická aplikace



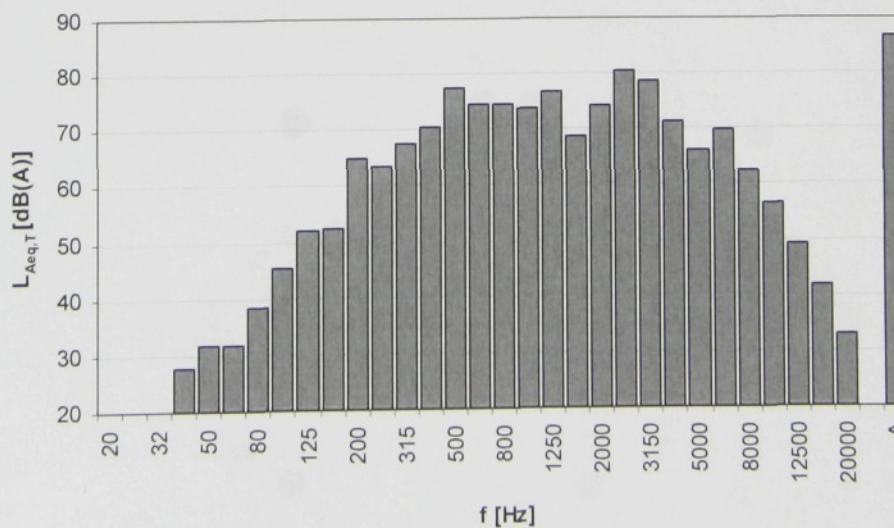
Místo měření č. 1. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 2. $L_{Aeq,T}$

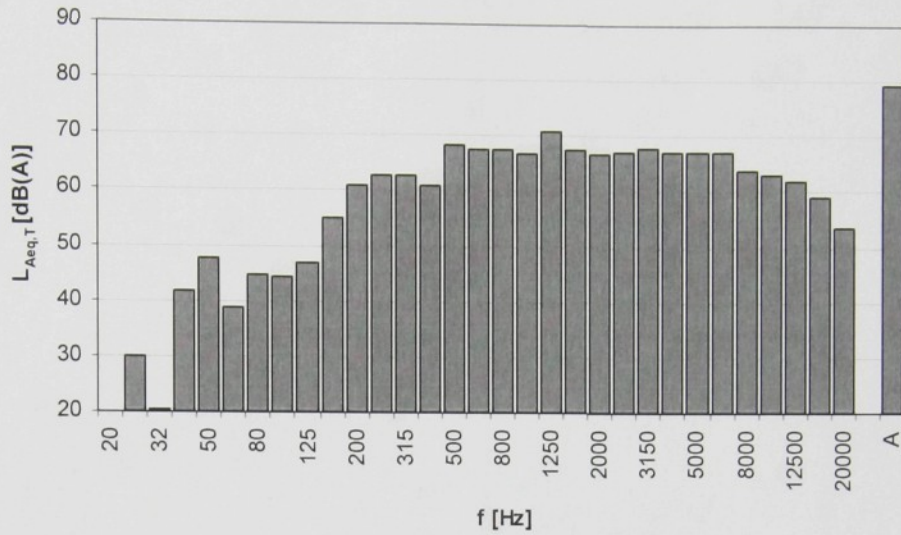


Místo měření č. 3. $L_{Aeq,T}$

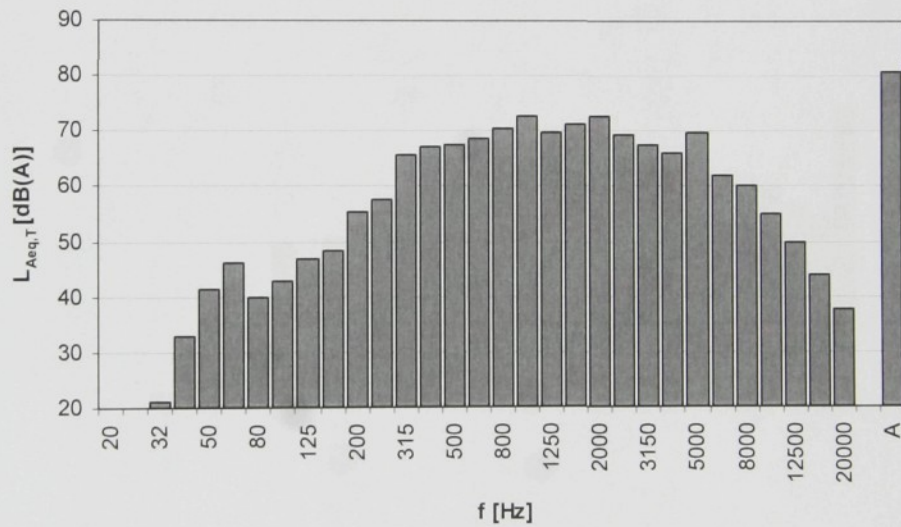




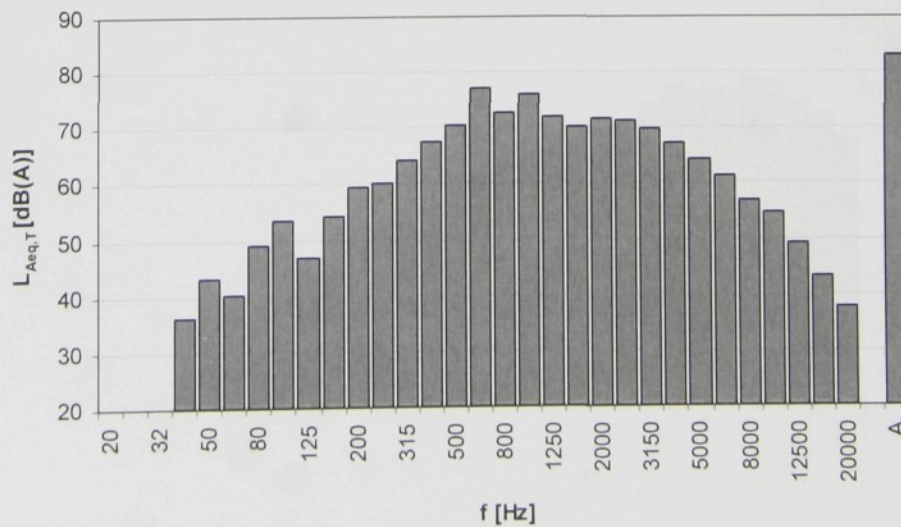
Místo měření č. 4. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 5. $L_{Aeq,T}$

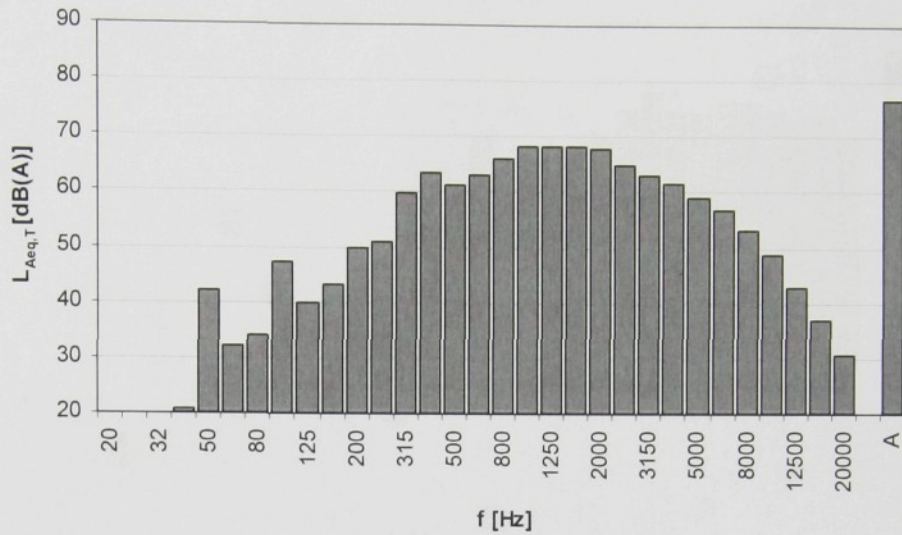


Místo měření č. 6. $L_{Aeq,T}$

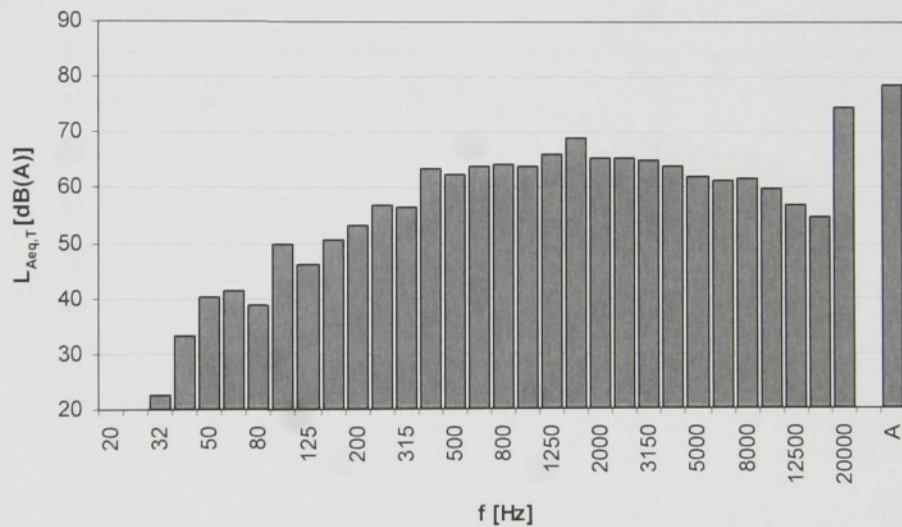




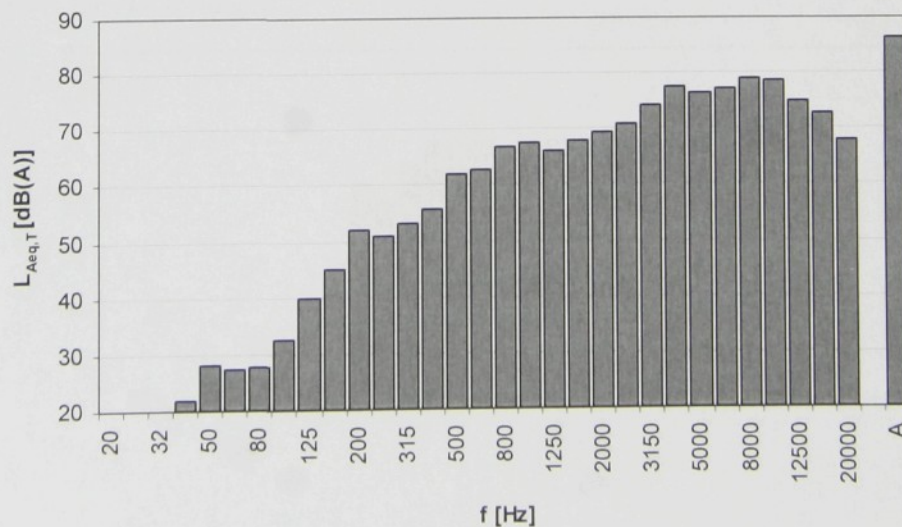
Místo měření č. 7. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 8. $L_{Aeq,T}$

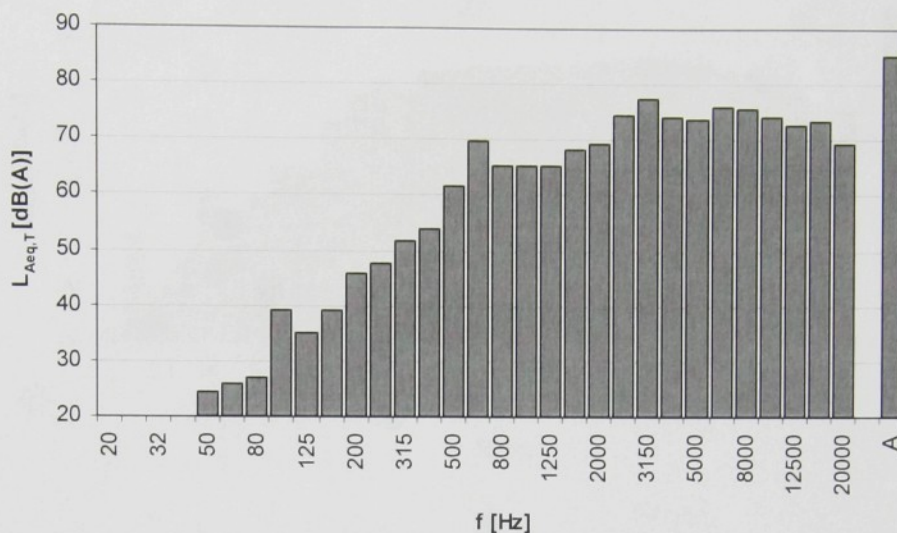


Místo měření č. 9. $L_{Aeq,T}$

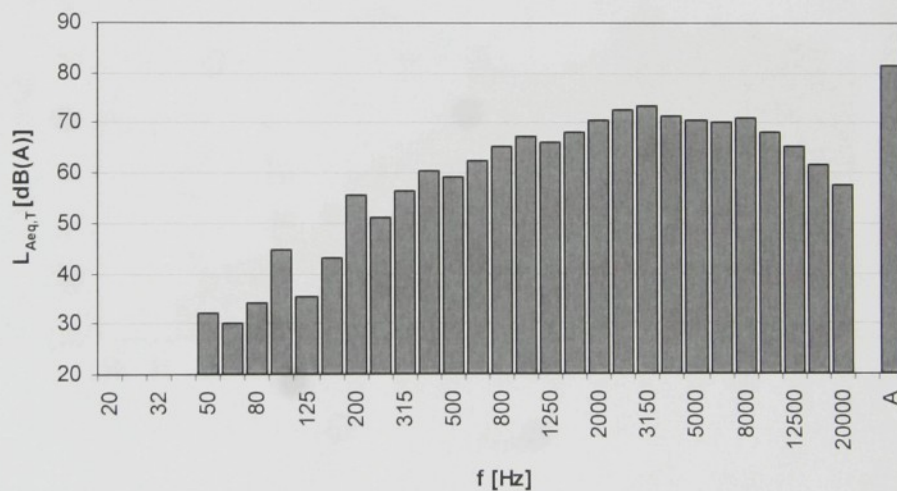




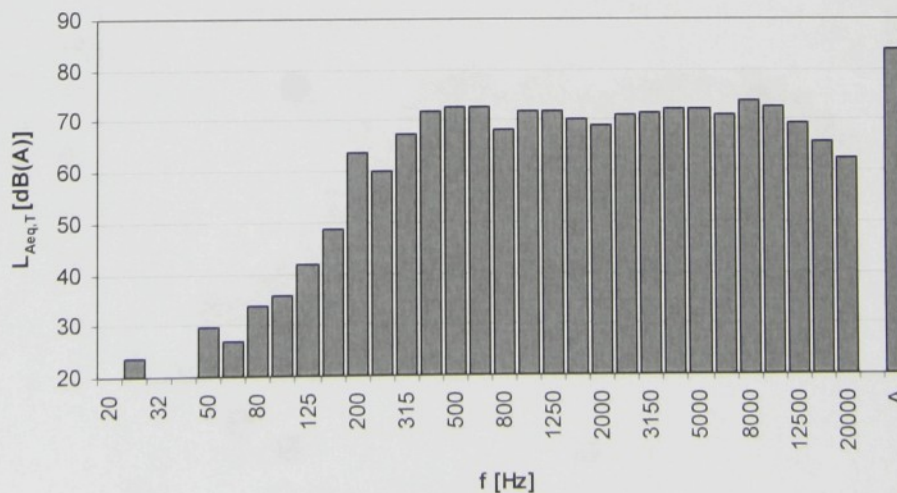
Místo měření č. 10. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 11. $L_{Aeq,T}$

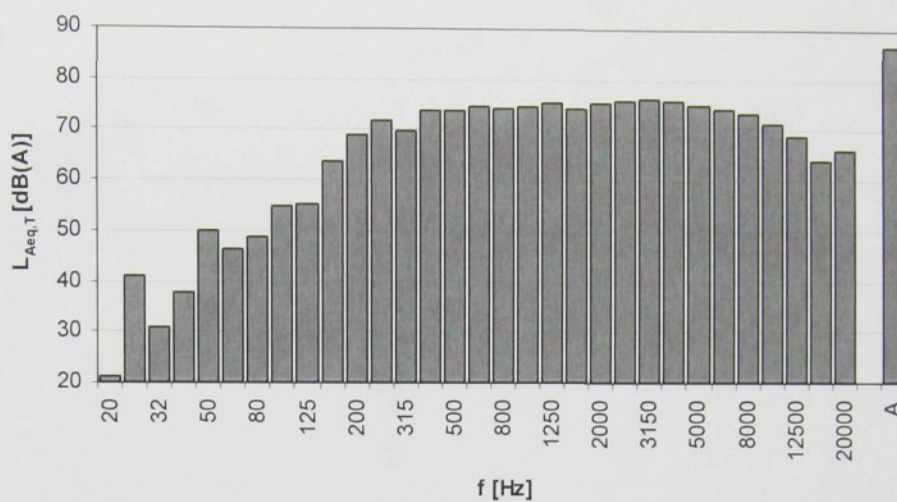


Místo měření č. 12. $L_{Aeq,T}$

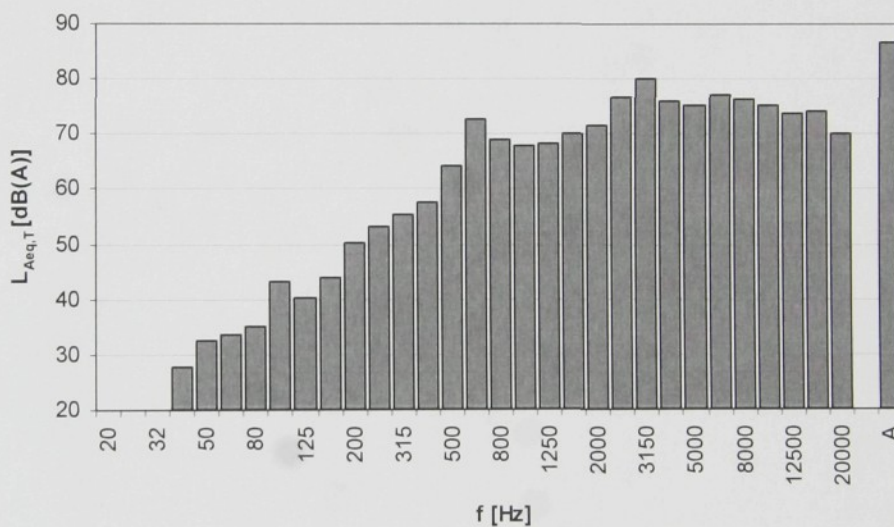




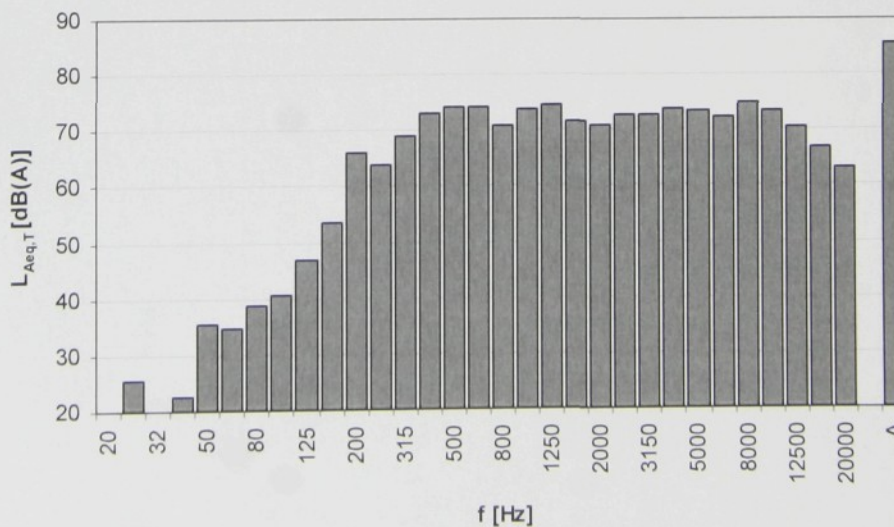
Místo měření č. 13. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 14. $L_{Aeq,T}$



Místo měření č. 15. $L_{Aeq,T}$



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



Ing. Jan Novák

HLUK V PRŮMYSLVÉM INTERIÉRU

(Teze disertační práce)

Liberec 2005

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



Ing. Jan Novák

HLUK V PRŮMYSLVÉM INTERIÉRU (Teze disertační práce)

Liberec 2005

Autor: Ing. Jan Novák

Studijní program:

P 2302 Stroje a zařízení

Studijní obor:

2302V010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření:

Technická diagnostika

Školící pracoviště:

katedra strojů průmyslové dopravy

Školitel:

doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Recenzenti:

prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.

VŠB TU Ostrava

doc. Ing. Július Balog, CSc.

MF SPU Nitra

doc. Ing. František Helebrant, CSc.

VŠB TU Ostrava

Termín obhajoby:

9. března 2006 ve 13,00 hod. na KST TU Liberec



OBSAH

1. Úvod.....	3
2. Současné metody řešení.....	3
Zvukové pole v interiérech z hlediska vlnové teorie.....	3
Zvukové pole v interiérech z hlediska statistické teorie.....	4
Geometrická akustika.....	4
3. Popis navrhované metody.....	5
4. Zdroje hluku.....	8
Akustické vlastnosti zdroje.....	8
Pohled geometrické akustiky na zdroj hluku.....	8
Přesná metoda.....	9
Řešení pomocí náhodných čísel.....	10
Náhodná metoda.....	11
Mapování pole kolem zdroje hluku.....	12
Akustická energie nesená paprskem.....	13
5. První chod.....	14
Výpočet prvního chodu.....	15
6. Prvky v interiéru.....	16
Akustická pohltivost stěn.....	16
Neprůzvučnost a výpočet do exteriéru.....	17
7. Praktická aplikace v průmyslovém prostředí.....	18
Matematická simulace.....	19
Řešení hlukové situace.....	19
Zvýšení akustické pohltivosti stropu a stěn.....	19
Vytvoření akustické bariéry.....	20
Matematické simulace.....	21
Rozbor vypočtených hodnot.....	21
8. Závěry doktorské disertační práce.....	22
Význam výsledků doktorské disertační práce.....	22
Osobní přínos doktoranda.....	22
Nové poznatky a závěry pro rozvoj oboru.....	23
Přesnost metody a možnosti zlepšení.....	23
Co do budoucna.....	23

KLÍČOVÁ SLOVA (KEY WORDS)

geometrická akustika, hluk v průmyslovém interiéru, výpočty hluku, snižování hluku
geometric acoustic, noise in industrial interior, noise analysis, noise reduction



ANOTACE

Hluk v průmyslovém interiéru

Tato doktorská disertační práce shrnuje poznatky a výsledky studia zaměřeného na šíření hluku v průmyslových interiérech a na možnostech jeho snižování. Přispívá tak k dosavadním znalostem o možnostech výpočtů předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech.

Práce se zabývá využitím metod geometrické akustiky a shrnuje základní možnosti těchto metod. V práci je popisován navržený výpočtový algoritmus, s jehož pomocí lze kompletně popsat šíření hluku od zdrojů řešeným průmyslovým interiérem. Práce obsahuje i popis všech významných prvků v řešených interiérech jako jsou: zdroje hluku, vnitřní tělesa, akustické bariéry a stěny výpočtového prostoru. Tyto významné prvky v interiéru jsou popisovány ve vztahu k použité výpočtové metodě geometrické akustiky. Z navrženého výpočtového algoritmu jsou shromážděny výsledky a nové poznatky možnostech geometrické akustiky a jsou zformulovány závěry pro rozvoj oboru.

V experimentální části práce je ukázáno řešení v typického průmyslového prostoru včetně popisu koncepce možných návrhů protihlukových opatření.

ANNOTATION

Noise in industrial interiors

This doctorate dissertation summarises the findings and results of a study focused on the spread of noise in industrial interiors and the means of reducing these levels. It therefore contributes to our current knowledge of the means of calculating expected noise levels in industrial interiors.

The work deals with the application of geometric acoustic methods and summarises the basic options offered by these methods. The work describes a proposed computation algorithm which can be used to give a description of the spread of noise from sources within an industrial interior. The work also contains a description of all the elements which are significant in such areas, such as: sources of noise, internal bodies, acoustic barriers and the walls of the computed space. These significant interior elements are described in relation to the geometric acoustic calculation method. The results from the proposed computational algorithm are collated together with the new findings concerning the possibilities of geometric acoustics and are used to formulate conclusions to benefit the development of the field.

The experimental part of the work demonstrates a solution in a typical industrial interior and includes a description of the concept of possible anti-noise measures that can be taken.



1. Úvod

Hlučnost v našem prostředí roste a stále více jsou překračovány hranice zdravotní únosnosti. Zvláště v některých lidských činnostech začíná mít působení hluku i trvalé následky na sluch a organizmus vůbec. Problém zvýšené hlučnosti, je i problémem většiny stávajících průmyslových provozů a je nutné účinně navrhovat vhodná řešení pro snižování hlučnosti v těchto prostorech. V nově projektovaných výrobních provozech je nutné myslet na problematiku hlučnosti již v samém počátku návrhu projektu. V této fázi je poměrně snadné proti vysokému hluku budoucí výrobní linky lépe bojovat. Tím může být volba nákupu tišších strojů, optimalizace jejich rozložení ve výrobním prostoru nebo využití akusticky více optimalizovaných materiálů v posuzovaném interiéru.

Abychom mohli posuzovat vliv hluku na celý řešený prostor a případně posuzovat různé varianty návrhu výstavby nových výrobních linek i z pohledu minimalizace vlivu hluku na pracovníky ve výrobě, je nutné tuto problematiku hluku v průmyslových interiérech efektivně řešit.

Efektivním řešením výše uvedeného problému, může být využití vhodných matematických simulací ve výpočtech předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru.

2. Současné metody řešení

Pro vytvoření vhodného výpočtového algoritmu, umožňujícího výpočty šíření hluku v interiérech a tím provádět i výpočet předpokládaných hladin hluku v interiérech je nutné zvolit nejprve vlastní způsob výpočtu. Výpočtový algoritmus a následná matematická simulace může využívat principy:

- vlnové akustiky
- statistické akustiky
- geometrické akustiky

Zvukové pole v interiérech z hlediska vlnové teorie

K úplnému výsledku dojdeme řešením vlnové rovnice. Okrajová podmínka je pro akustickou rychlost částic vzduchu, které jsou v bezprostřední blízkosti stěn ohraničující prostor. Složka akustické rychlosti kolmá ke stěně musí být rovna nule. Vlnová rovnice je popsána takto:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Na tomto místě je nutné podotknout, že řešení vlnové rovnice je v reálných případech velmi komplikované.

Zvukové pole v interiérech z hlediska statistické teorie

Stanovení okamžitých akustických veličin charakterizujících zvukové vlnění je pro velké a členité prostory početná cestou nemožné. Zvukové pole v libovolném bodě prostoru bude tvořeno přímými vlnami, ale také příspěvky odrazů zvuku od stěn a jiných ploch. Základní veličinou charakterizující zvukové pole bude v tomto případě hustota zvukové energie. Hustotu zvukové energie je ale možné stanovit pouze díky některým požadavkům, které můžeme shrnout takto:

1. Velikost zvukové energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn. Z toho plyne, že se nelze zabývat vyšetřováním okamžitých hodnot amplitud a fází veličin charakterizujících zvukové pole.
2. Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejné veliká.
3. Všechny úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou stejně pravděpodobně zastoupeny.

Ve skutečnosti ale nejsou vždy všechny uvedené předpoklady splnitelné.

Geometrická akustika

Řešení šíření hluku pomocí geometrická akustiky je uskutečňováno pomocí „zvukového paprsku“. Na tento zvukový paprsek lze také nahlížet jako na transportní prostředek pro zvukovou energii.

Paprsek šířící se od zdroje zvuku, prochází místností a jeho energie či akustický tlak jím nesený ubývá se vzrůstající vzdáleností tak dlouho, dokud se neutlumí pod zanedbatelnou úroveň, nebo nedorazí k překážce. Pak je jeho další chování určeno její velikostí.

Vnitřní prezentace historie zvukového paprsku, se zaznamenává (metaechogram) od okamžiku jeho vygenerování do jeho zániku. Například: přehled stěn na kterých došlo k odrazu, energie paprsku a úhel dopadu, atd.

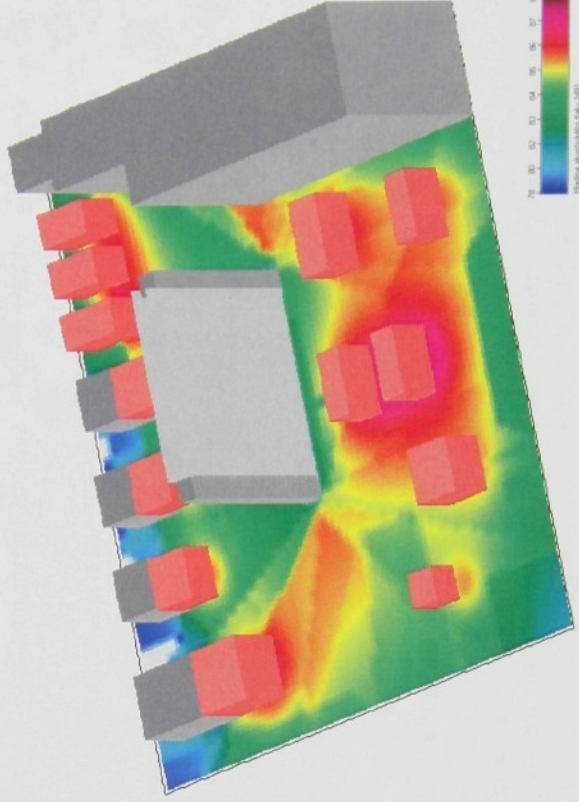
Dojde-li k odrazu, pak paprsek dále prochází prostorem dokud nedorazí k nové bariéře, k přijímači, nebo se neutlumí vlivem impedance prostředí.

Velikost energie odražené od konečné plochy závisí na vztahu mezi její velikostí a uvažovanou vlnovou délkou. Dokonalý odraz nastává na vysokých frekvencích (a pro tuhé, málo pohltivé překážky).

3. Popis navrhované metody

Mnou navržený postup výpočtu šíření akustické energie v průmyslovém interiéru je založen jen na principech geometrické akustiky. Šíření akustické energie řeší pomocí „zvukového paprsku“, jako jejího nositele. Ze zdroje hluku se šíří velké množství těchto paprsků a na základě jejich sledování, respektive na jejich šíření v řešeném prostoru, jsou následně vypočteny předpokládané hladiny hluku.

Mnou navržená metoda řešení šíření hluku je vhodná pro obecné interiéry. Budu však vše popisovat pouze na průmyslovém interiéru a to z důvodu, že v interiérech využívaných k jiným účelům by bylo nutné hodnotit např. i dobu dozvuku, možnou ozvěnu, srozumitelnost řeči a další akustické vlastnosti zajišťující příjemné akustické prostředí.



Ukázka výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru

Mnou navržená metoda, je výhodná v tom, že částečně eliminuje vliv ohybu paprsku způsobený tvarem interiéru a vnitřními tělesy v něm. Mnou navržená metoda také, jako ostatní metody geometrické akustiky, zanedbává možnou interferenci vln v řešeném průmyslovém interiéru.



Velmi stručně lze celou navrženou metodu popsat níže uvedeným popisem, který se bude zabývat jedním paprskem.

Z uvažovaného zdroje hluku se šíří paprsek. Paprsek, prochází interiérem a vhodnými algoritmy se hledá první místo jeho odrazu. Tímto místem odrazu může být dělicí prvek interiéru (stěna nebo i otvor), vnitřní těleso v interiéru reprezentované např. vnitřní zástavbou nebo i akustickou bariérou, ale i dalším zdrojem hluku u něž uvažujeme s jeho rozměry. Po nalezení tohoto místa zjistíme příslušnost bodu odrazu k vnitřnímu tělesu nebo ke stěně, provedeme rozbor akustických vlastností v daném bodě odrazu a vyřešíme samostatný odraz paprsku. Dle akustických vlastností tělesa v bodě odrazu vypočteme i snížení akustické energie nesené dále paprskem a ubývající s jednotlivými odrazy a se vzrůstající vzdáleností.

Z hlediska velké časové náročnosti celého procesu výpočtu šíření těchto paprsků, reprezentující šíření zvukové energie průmyslovým prostorem, provádíme záznam dat souvisejících s jednotlivými paprsky do takzvaného metaechogramu. Metaechogram pak obsahuje informace o každém paprsku šířeného ze zdroje hluku do řešeného prostoru.

Údaje uložené v metaechogramu každého paprsku jsou ukládány pro možnost jejich dalšího využití v následných rozbořech a výpočtech.

Jak jsou však výhodnocovány předpokládané hladiny hluku v celém průmyslovém interiéru?

Tyto předpokládané hladiny akustického tlaku se výhodnocují v předem definované rovině (rovinách) např. v určité výšce nad podlahou. Během sledování míst, kde dojde k odrazu paprsku se totiž sleduje i průnik paprsku řešenou (posuzovanou) rovinou. Místo jednoho posluchače v řešeném interiéru je při použití mnou navržené metody sledována celá rovina rozdělená do sítě s předem definovanou hustotou buněk.

Výhodou mnou navržené metody je, že nehlédáme pouze paprsky, které dospějí po n odrazech od stěn do místa posluchače, ale využíváme všechny vzniklé paprsky u daného zdroje hluku. Oproti klasickým metodám geometrické akustiky tak můžeme snadno řešit i velmi členité interiéry s velkým množstvím vnitřních těles.

Nevýhodou je neschopnost řešit vlnové jevy. Například se jedná o difrakci (ohyb) paprsků okolo překážek konečných rozměrů, či o interference. Ohyb paprsků je částečně eliminován takzvaným „prvním chodem“ viz. kapitola 5.

Celý postup je zobrazen i na následujícím vývojovém diagramu. Vývojový diagram zobrazuje šíření paprsku z jednoho vybraného zdroje hluku po řešení průmyslovém interiéru.



Vybraný zdroj hluku

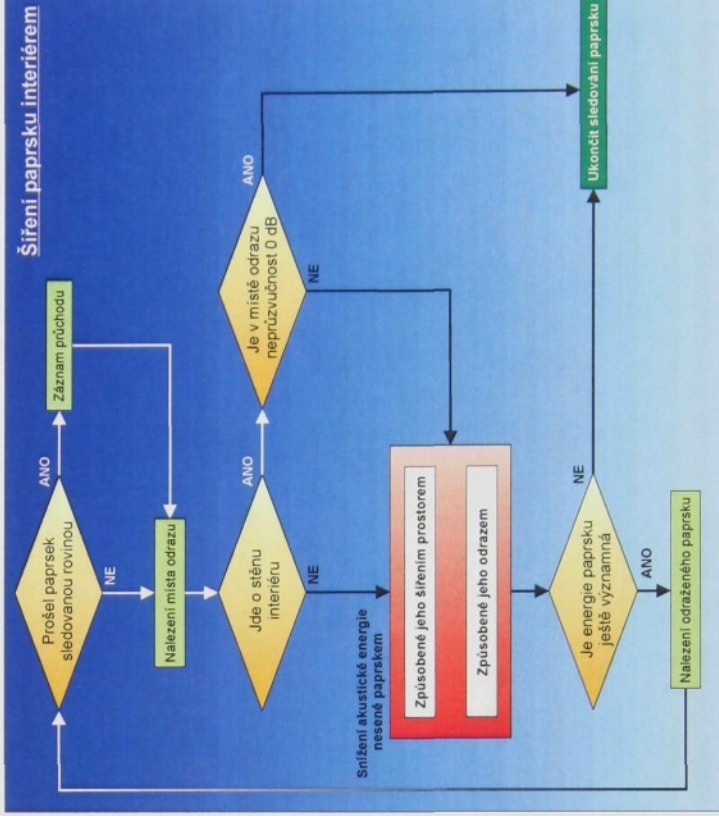
o o o Ostatní zdroje hluku v řešeném interiéru



Vytvoření paprsků

Určení akustické energie nesené paprskem

První chod



Vývojový diagram zobrazující navrženou metodu výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslovém interiéru

4. Zdroje hluku

Zdroj hluku je akustického pohledu základním prvkem průmyslového interiéru, který je již tvořen samotnými stěnami. V běžných průmyslových interiérech se nachází často i velké množství samostatných zdrojů hluku. Při návrhu základní koncepce programu bylo již od počátku uvažováno o dvou typech zdrojů hluku běžně se vyskytujících v průmyslových interiérech. Mezi tyto dva základní typy lze zařadit:

- bodový zdroj hluku
- liniový zdroj hluku

Při vytváření programu nebyl uvažován plošný zdroj hluku, jehož výskyt není tak častý. Dodatečná integrace tohoto typu zdroje hluku do algoritmu je však možná.

Akustickou energii vyzařovanou z posuzovaného zdroje hluku popisujeme frekvenčně a to třetino-oktávovým spektrem. Vzhledem k formě výstupu, který požaduje vyčištění předpokládaných hladin akustického tlaku v celkových hladinách, budou i zdroje hluku uvažovány akustickým parametrem zastupující jejich celkové hladiny vážené váhovým filtrem A.

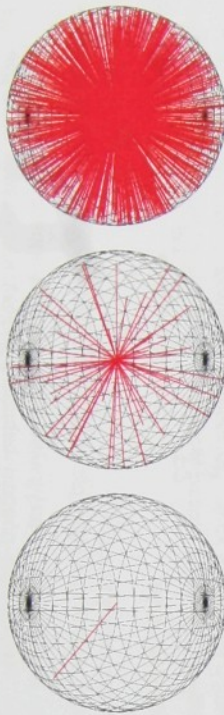
Akustické vlastnosti zdroje

Z hlediska zjišťování hlukové situace, v řešeném průmyslovém interiéru, je neobjektivnějším parametrem popisujícím množství akustické energie, šířící se od daného zdroje, akustický výkon. Akustický výkon je vhodnou veličinou nejen vzhledem k „jednočíselnému (pokud není celá situace řešena např. po zlomcích oktáv)“ vyjádření, ale i k jeho snadnému zjištění příslušným měřením.

V případě, že jsme při vytváření akustické studie schopni provádět měření akustické intenzity, bude pro nás vhodnější, popsat zdroj hluku např. pomocí obalového kvádru nebo polokoule s naměřenými hodnotami akustické intenzity na těchto obalových plochách. Tento postup je vhodný zejména u zdrojů hluku, u kterých dochází při jejich provozu k výraznému směrovému vyzařování hluku.

Pohled geometrické akustiky na zdroj hluku

Zdroj hluku si lze v geometrické akustice představit např. jako bod s kulovou vyzařovací charakteristikou (liniové zdroje hluku jsou pak složením bodových zdrojů hluku s částečně omezenou vyzařovací plochou). Ze středu této koule jsou vyzařovány paprsky reprezentující šíření akustické energie. Počáteční bod každého paprsku je ve středu koule a druhý bod tvoří body na povrchu koule.



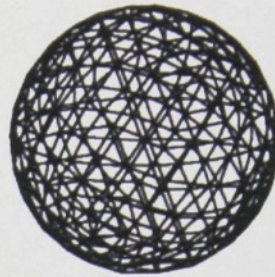
Vyzařované paprsky z bodového zdroje hluku

Pro vytvoření dostatečně přesného matematického modelu popisujícího zdroj hluku je nutné, aby byl bodový zdroj hluku popsán pomocí 10.000 až cca. 750.000 tisíc paprsků. Počet těchto paprsků pak není určen samotným zdrojem hluku nýbrž členitostí interiéru, ve kterém se daný zdroj hluku nachází.

Na tomto místě je nutné si uvědomit, že potřebný počet paprsků k popsání zdroje hluku je značný, ale přesná poloha paprsku na povrchu není důležitá. Nejdůležitější je však co možná nejrovnoměrnější rozložení těchto paprsků na povrchu kulové plochy.

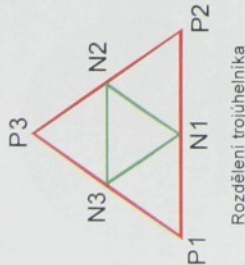
Existují dva přesné způsoby jak rozdělit povrch kulové plochy.

Přesná metoda

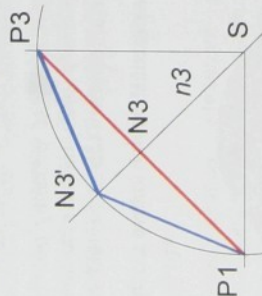


Rozdělení povrchu koule pomocí trojúhelníků

Vhodný způsob, jak rovnoměrně rozdělit povrch kulové plochy, je založen na postupném dělení trojúhelníků. První trojúhelníky jsou dány např. body ve kterých protínají osy x , y a z povrch koule. Tím nám vzniká prvních šest bodů a takto lze vytvořit prvních osm trojúhelníků. Druhým krokem je rozdělení těchto trojúhelníků. Každý trojúhelník lze snadno rozdělit na čtyři. Na následujícím obrázku je rozdělení „původního“ trojúhelníku P1, P2, P3.



Body „nového“ trojúhelníku N1, N2, N3 jsou středy předchozího trojúhelníku. Nyní vytvoříme tři vektory $n1$, $n2$ a $n3$. Tyto vektory mají počátek ve středu koule a procházejí body N1, N2 a N3. Pomocí těchto vektorů vypočteme polohu bodů N1', N2' a N3' jako průsečíky vektorů SN s povrchem koule. Nové trojúhelníky jsou pak tvořeny pouze body na povrchu koule, viz následující obrázek.



Výtvoreni bodu na povrchu koule z rozděleného trojúhelníka

Metoda rovnoměrného dělení pomocí dělení trojúhelníků má ale i své nevýhody. Mezi největší nevýhody patří mimo naprogramování relativně složitějšího algoritmu i doba potřebná k tomuto výpočtu. Z hlediska možnosti výpočetní techniky se nejedná o zásadní nedostatek, ale při uvažování více zdrojů hluku v jednom interiéru je toto zpomalení počátku výpočtu již znatelné.

Řešení pomocí náhodných čísel

Vzhledem k velmi velkému počtu požadovaných bodů na povrchu kulové plochy lze k tomuto problému přistupovat i pomocí statistiky, pomocí náhodných čísel. Úkolem je totiž pouze rovnoměrné rozdělení povrchu kulové plochy bez nutnosti směřovat paprsky konkrétním směrem.

Řešení rovnoměrného rozdělení povrchu kulové plochy pomocí náhodných čísel, má i jednu na počátku zřejmou výhodu. Tou je, že mohou přestat vytvářet další body na



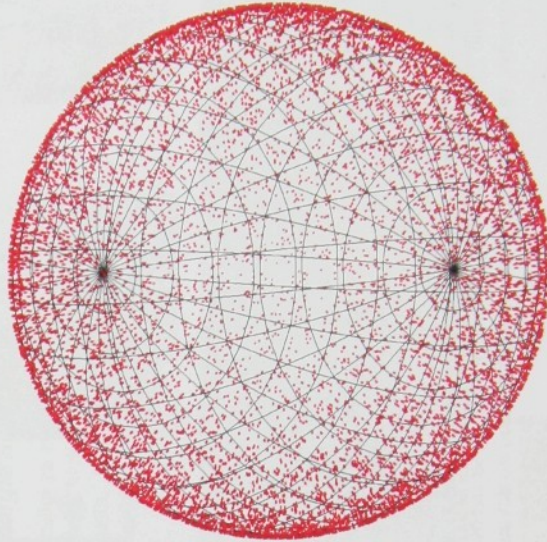
povrchu, představující budoucí paprsky prakticky v jakémkoliv okamžiku. To velmi výrazně snižuje čas potřebný k výpočtu celé hlukové situace.

V zásadě existují dva způsoby, kterými lze zajistit skutečně náhodné rozložení bodů na povrchu kulové plochy.

Náhodná metoda

Tato metoda umožňuje pomocí jednoduchého algoritmu určit náhodné rozložení bodů na povrchu jednotkové koule. Metoda spočívá v náhodném volbě čtyř proměnných x_0 , x_1 , x_2 a x_3 z intervalu $(-1, 1)$ a s použitím rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti. Vlastní výpočet souřadnic bodů na povrchu jednotkové koule je proveden jednoduchým výpočtem. Z tohoto následujícího výpočtu jsou přitom vynechány ty pokusy, kdy $x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \geq 1$. Ze zbývajících pokusů snadno vypočteme potřebné souřadnice v kartézském souřadném systému dle převodních vztahů pro kartézský souřadný systém a jejich souřadnice jsou :

$$x = \frac{2(x_1x_3 + x_0x_2)}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad y = \frac{2(x_2x_3 - x_0x_1)}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad z = \frac{x_0^2 + x_3^2 - x_1^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$$



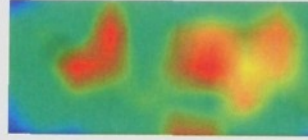
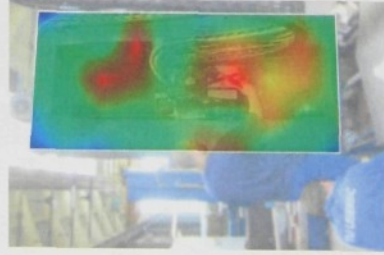
Náhodné rozložení bodů na povrchu koule

Z hlediska jednoduchého algoritmu a vzhledem k vyhovující rovnoměrnosti rozložení bodů na povrchu kulové plochy, je tato metoda pro popis zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky nejvhodnější.

Mapování pole kolem zdroje hluku

Většina strojních zařízení a strojirenských výrobků jsou relativně složité systémy dílčích zdrojů hluku, jejichž celkovou vyzářovanou akustickou energii lze těžko matematicky popsat. Největší problém je především v komplikované cestě šíření hluku, v množství dílčích zdrojů hluku reprezentované navenek jedním zdrojem hluku, množství pohltivých a odrazivých materiálů a mnohdy i velké členitosti povrchu samotného zdroje [9].

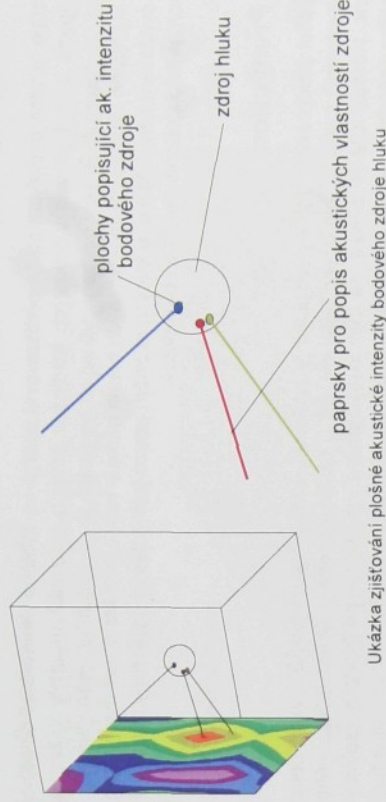
Vhodným způsobem popisujícím daný zdroj hluku je využití mapování akustického pole v obalové ploše kolem zdroje hluku, viz též [21].



Mapování akustického pole (akustické intenzity) ve zvolené ploše

Dalším postupem je pak jen volbou daného typu zdroje hluku, bodový nebo liniový a nalezení plošné akustické intenzity zvoleného zdroje hluku. Tuto plošnou akustickou intenzitu zdroje můžeme například stanovit jako střední hodnotu plošné intenzity zdroje s udáním činitele směrovosti pro danou část plochy, nebo jako plošnou akustickou intenzitu dané části plochy.

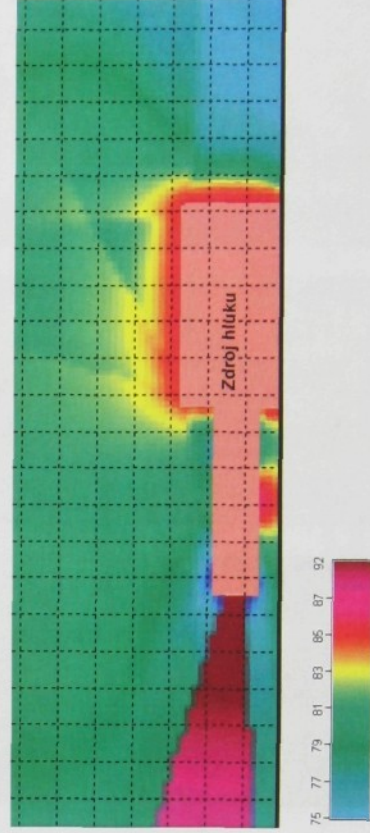
Samotný postup stanovení plošné akustické intenzity je jednoduchý viz. následující obrázek. Z bodového zdroje jsou vyzářovány paprsky (např. výše uvedeným vhodným principem) a sledujeme, ve kterém místě tyto paprsky protnou obalovou plochu zdroje hluku.



V místě průniku je zjištěna např. akustická intenzita v obalové ploše, zjištěná měřením a vzdálenost tohoto bodu průniku od zdroje. Označování „plošná intenzita“ jsem zavedl s ohledem na minimalizaci vektorů potřebných k popsání zdroje hluku. V praxi se tato úspora projevuje tak, že vypočtená intenzita není pouze v bodě průniku vektoru kulovou plochou bodového zdroje hluku, ale i v blízkém okolí.

Akustická energie nesená paprskem

Paprsek vycházející ze zdroje hluku musí protnout nejprve „virtuální obalovou plochu“ samotného zdroje hluku. V místě průniku je známa již dříve vypočtená plošná akustická intenzita, která je určujícím prvkem pro stanovení akustické energie přenášené jednotlivými paprsky vyzářovanými z daného zdroje.



Zdroj hluku s výraznou směrovou charakteristikou

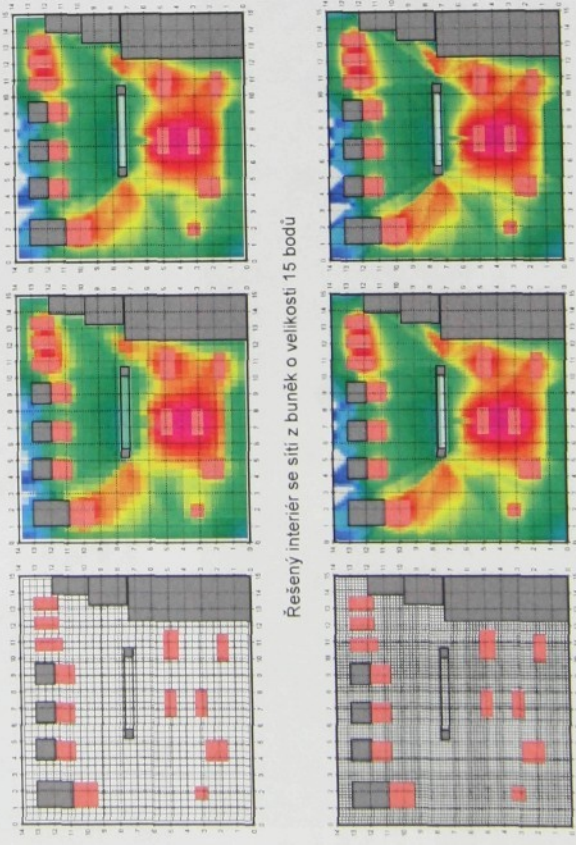


Energie nesená paprskem může představovat energii ve zvolené třetino-oktávě, nebo v případě řešení situace v celkových hladinách hladinu akustické intenzity váženou váhovým filtrem A. Řešení pouze v celkových hladinách je do jisté míry zjednodušující, ale v případě výpočtu předpokládaných hladin hluku v interiérech které neexistují nebo při uvažování zdrojů hluku, u kterých je znám pouze jednočíselné vyjádření akustický výkon, je toto zjednodušení akceptovatelné.

5. První chod

Výpočet předpokládaných hladin hluku je prováděn vždy jen ve zvolené rovině, nebo ve zvolených rovinách, tvořených buňkami. Síť je tvořena pouze buňkami čtvercového tvaru. Hustota sítě je závislá na členitosti interiéru respektive na hustotě zaplnění interiéru vnitřními tělesy a rozměry zdrojů hluku. Hustotu sítě lze zvolit i s ohledem na grafické zobrazení výsledků. Optimální hustota sítě pak nevychází ze skutečných rozměrů, ale z rozměrů které budou reprezentovány zobrazením výsledků. S využitím vhodných interpolačních algoritmů, lze pak dodatečně rozlišení zvýšit.

Na následující skupině obrázků je ukázán řešený interiéru s buňkami o velikosti 7 a 15 bodů. První obrázek ukazuje řešený interiéru s buňkami sítě, druhý vypočtené předpokládané hladiny hluku a obrázek vpravo zobrazuje předpokládané hladiny hluku „vyhlazené“ vhodnou interpolací [11].



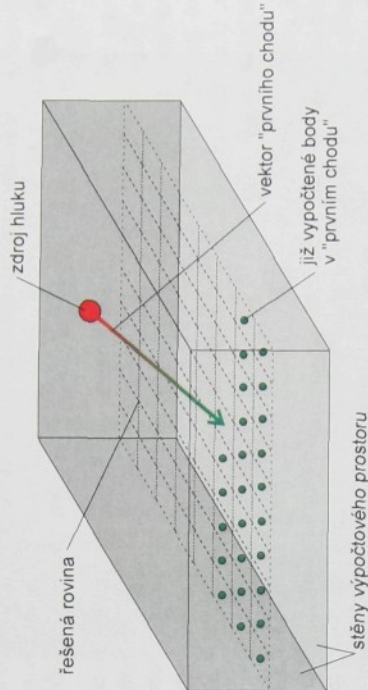
Řešený interiéru se sítí z buněk o velikosti 15 bodů

Řešený interiéru se sítí z buněk o velikosti 7 bodů



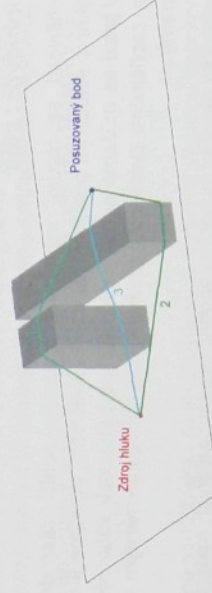
Výpočet prvního chodu

Aby bylo s jistotou zabezpečeno, že bude akustický tlak (hluk) vypočten v každé buňce, je před samotným šířením paprsků ze zdrojů nutné provést výpočet prvního chodu.



Výpočet prvního chodu, prováděný pro každou buňku

Výpočet prvního chodu je realizován výpočtem geometrickým a také akustickým. Geometrický výpočet má za cíl nalézt nejkratší spojnice mezi posuzovaným zdrojem hluku a každou buňkou v řešené rovině. Hledání této nejkratší spojnice je velmi složitou záležitostí viz následující obrázek.



Nejkratší spojnice mezi zdrojem a posuzovaným bodem

Po nalezení nejkratší spojnice mezi posuzovaným zdrojem hluku a středem jednotlivých buněk je proveden i akustický výpočet. Tento výpočet se skládá z výpočtu útlumu přenašené akustické energie vzduchem a z výpočtu útlumu způsobeného bariérovým efektem (stínění vnitřními tělesy a stěnami).



6. Prvky v interiéru

Řešený interiéru je v algoritmu tvořen ostatními důležitými prvky, které ze nachází uvnitř průmyslového interiéru. Samotný interiéru je tvořen stěnami, které zároveň ohraničují výpočtový prostor. Tyto stěny mohou obsahovat plochy s rozdílnými akustickými vlastnostmi. Mezi tyto vlastnosti patří zejména akustická pohltivost a neprůzvučnost.

Mezi prvky umístované v průmyslovém interiéru patří zejména vnitřní tělesa. Tato tělesa ve skutečnosti představují různé vestavby, sloupky, veliny a jiná objemná tělesa situovaná do řešeného průmyslového prostoru. Dalším typem vnitřních těles jsou akustické bariéry. Akustické bariéry jsou v podstatě vnitřní tělesa o velmi malé tloušťce. U akustických bariér je nutno uvažovat i jejich neprůzvučnost a to právě z důvodu jejich malé tloušťky.

Všechny výše uvedené prvky v interiéru, jako jsou vnitřní tělesa, akustické bariéry, samotné zdroje hluku a plochy, které ohraničují samotný interiéru tvoří odrazivé plochy pro paprsky šířené ze zdrojů hluku a pro paprsky již odražené. Pro každý paprsek šířící se v řešeném interiéru je nutno určit místo, kde dojde k odrazu paprsku. Při tomto odrazu dojde k útlumu přenášené akustické energie paprskem způsobeným akustickou pohltivostí daného prvku. Výsledkem odrazu je tedy jiný paprsek s nižší přenášenou akustickou energií, než tomu bylo před jeho odrazem.

Všechny výše uvedené prvky interiéru, mohou navíc obsahovat ještě jeden speciální typ prvku. Tímto prvkem je plocha, která může být umístěna na jakémkoliv tělese či obvodové stěně. Významem plochy je změna akustických vlastností objektu na kterém je plocha umístěna. Změněné akustické vlastnosti jsou pouze v místě samotné plochy.

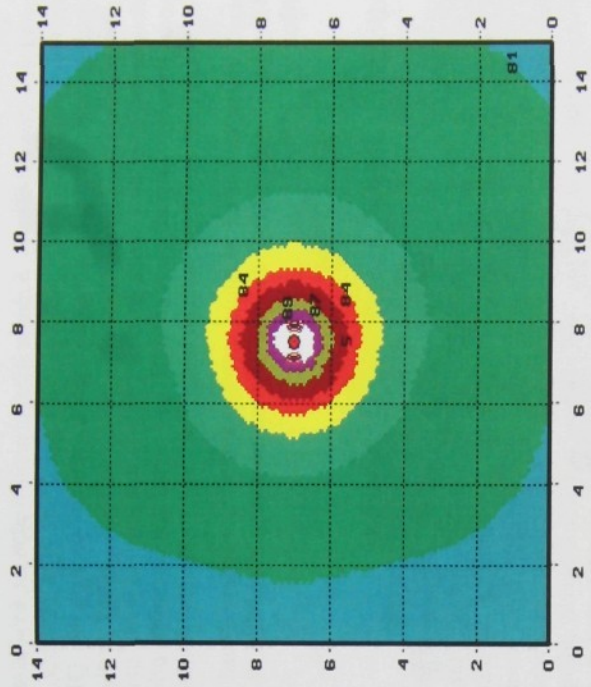
U plochy lze změnit akustickou pohltivost a neprůzvučnost.

Akustická pohltivost stěn

Akustickou pohltivostí se rozumí schopnost materiálu pohltit část dopadajícího akustického výkonu. Akustická pohltivost se mění s frekvencí, značíme ji α a nabývá hodnot 0..1. V praxi se můžeme setkat i s akustickou pohltivostí větší než 1, ale to bývá zpravidla zapříčiněno zvětšenou plochou povrchu vzorku různým tvarováním (výstupky či vlnami).

Pro účely geometrické akustiky je nejvíce vhodné využití poréznych materiálů. Použití akustických prvků, jako jsou kmitající membrány a desky je méně vhodné. Pomocí geometrické akustiky a mnohou navrženého postupu výpočtu je nevhodné simulovat prvky s akustickým obkladem s rezonátory Helmholtzova typu. Důvodem této nevhodnosti je skutečnost, že panel s rezonátory má velmi úzká frekvenční pásma s výraznou akustickou pohltivostí.

Na následujícím obrázku je patrný vliv obložení stěn a stropu materiálem s rozdílnou akustickou pohltivostí v jednotlivých půlkách řešeného prostoru.



Vliv obložení stěn a stropu materiálem s rozdílnou akustickou pohltivostí

Neprůzvučnost a výpočet do exteriéru

Vzduchová neprůzvučnost, uvažovaná výpočtním algoritmem, je chápána jako vlastnost dělicí přčky nebo akustické bariéry, dále jen konstrukce, projevující se ztrátou akustické energie při přenosu vzduchem prostřednictvím konstrukce.

Ukazatelem vzduchové neprůzvučnosti je veličina neprůzvučnost R v dB.

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{W_r}{W_i}$$

Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost se vyjadřují váženou neprůzvučností R_w a jednočíselným ukazatelem, který přihlíží ke typické kmitočtové skladbě neprůzvučnosti R'_w .

Výpočtový algoritmus při výpočtu v celkových vážených hladinách akustického tlaku využívá jedno číselně vyjádřené vážené stavební neprůzvučnosti R'_w .

Možnost zadávat neprůzvučnost jednotlivých prvků, tvořící dělicí prvky mezi exteriérem a interiérem je velmi výhodná. Pokud vytvoříme několik rovin, ve kterých nas budou zajímat předpokládaná hladiny akustického tlaku a tyto roviny budou

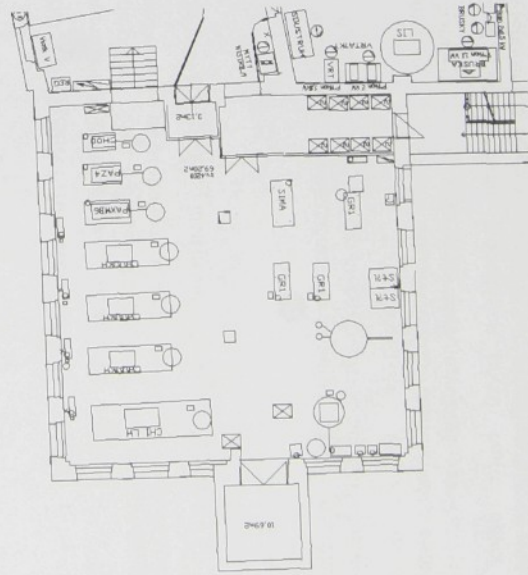


umístěny před jednotlivé dělicí prvky, budeme schopni provést výpočet, kolik akustické energie vyzářené ze zdrojů hluku v interiéru, může proniknout přes samotné dělicí příčky. Tímto způsobem můžeme provádět výpočty směrem do exteriéru [3]. Pro výpočet předpokládaných hladin akustického tlaku v exteriéru budou postačující znalosti akustického tlaku na dělicích prvcích v exteriéru a jejich velikosti (plochy). Výpočet pro samotný exteriér je v podstatě jen výpočtem imisních přírůstků akustického tlaku v bodě exteriéru z provozu zdrojů hluku v průmyslovém interiéru.

Při kombinaci zadанных hodnot akustické pohltivosti $\alpha = 1$ a neprůzvučnosti 0 dB výpočetní algoritmus předpokládá, že takto zadaná plocha je v podstatě otvorem v dělicí příčce.

7. Praktická aplikace v průmyslovém prostředí

Praktická aplikace se zabývá akustickou situací v reálném průmyslovém prostoru. Zvoleným prostorem byl provoz „lisovny kovových dílů pro automobilový průmysl“. V hale je 13 významných zdrojů hluku reprezentovaných samotnými lisy, karusely a bruskami pro příležitostnou úpravu nástrojů. Zvolený průmyslový interiéř představuje rozložení zdrojů hluku a použitím různých materiálů na stěnách typický průmyslový provoz. V interiéru zvoleného průmyslového prostoru byla nainstalována nezbytná protihluková opatření na stropě haly.

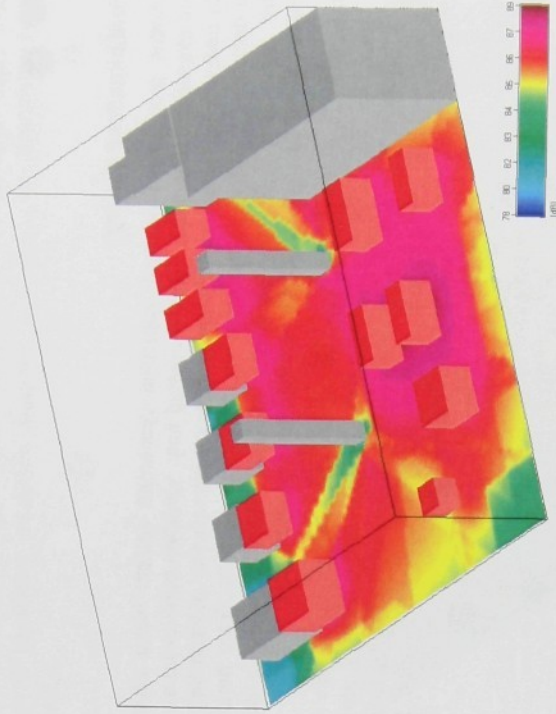


Půdorys řešeného prostoru



Matematická simulace

Matematické simulace řešila hlukovou situaci v hale ve výpočtové rovině. Výpočtová rovina je rovnoběžná s podlahou a je ve výšce 1,6 m. Výsledné rozložení předpokládaných stávajících hladin hluku je zobrazeno na následujícím obrázku.



Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – původní stav

Výsledky matematické simulace byly ověřeny porovnáním naměřené hladiny akustického tlaku v referenčních bodech. V hale je 70,32% plochy ve kterých dochází k překročení limitní hladiny 85 dB(A).

Řešení hlukové situace

Konkrétní řešení ukázkového příkladu bude v daném případě představovat úpravy dvojího typu. Prvním typem úprav bude zvýšení akustické pohltivosti stěn haly. Druhým typem úprav bude vytvoření akustické bariéry mezi dvěma sloupy uprostřed haly.

Zvýšení akustické pohltivosti stropu a stěn

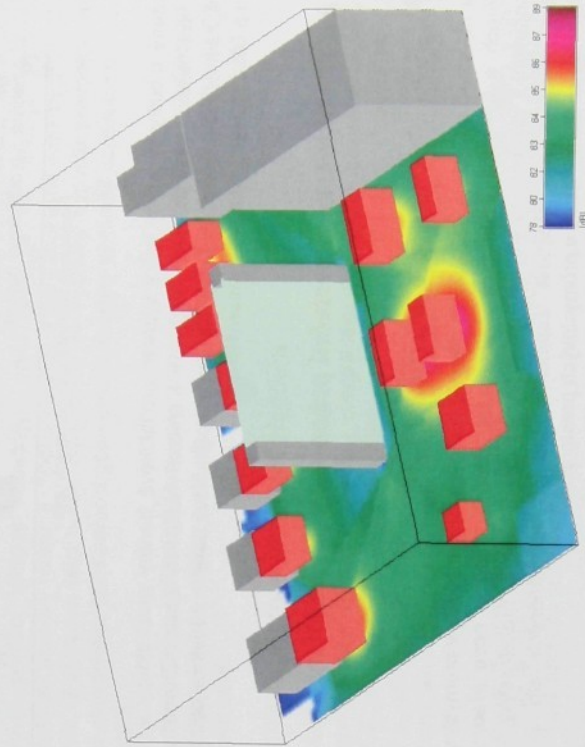
Pomocí zvýšení celkové pohltivosti uzavřeného prostoru snížíme i hladiny hluku v tomto prostoru. Z toho vyplývá, že pro snížení hlučnosti je třeba všechny velké

Navržená akustická bariéra

Matematické simulace

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny předpokládané hladiny hluku po provedení výše zmíněných protihlukových úprav v hale.

Akustické parametry použitých materiálů byli zjištěny z katalogových listů jejich výrobců.



Předpokládané hladiny hluku v řešeném prostoru – akustická bariéra + protihlukový obklad

Rozbor vypočtených hodnot

Na předchozích obrázcích jsou zobrazeny předpokládané hladiny hluku v hale po provedení jednotlivých protihlukových úprav. Aby bylo možno jednotlivé vlivy protihlukových úprav na hlukost v hale rychle a snadno porovnat, bude celá hluková situace porovnáвана dle následujících kritérií.

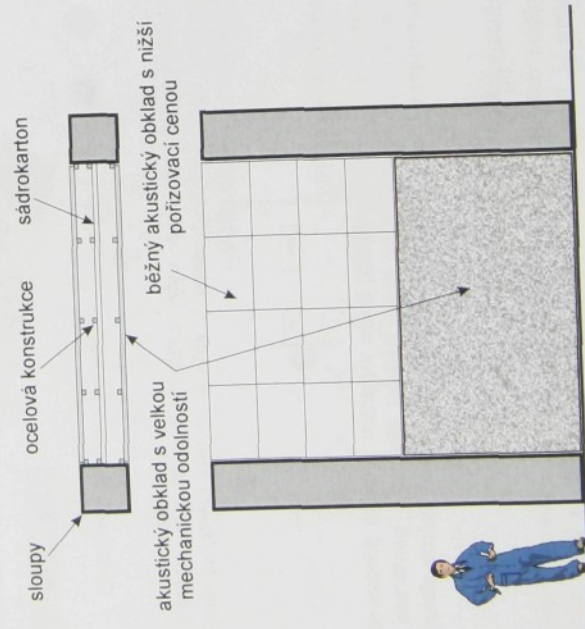
- a) L_{Aeq} - střední ekvivalentní hladina hluku v řešené rovině
- b) $S'_{\%85}$ - procentuální vyjádření velikosti plochy, ve které je vyšší hladina hluku než 85 dB(A)

V následující tabulce jsou tato kritéria přehledně uvedena pro všechny použité

Vytvoření akustické bariéry

Jako vhodné protihlukové opatření, zajišťující významné snížení hluku v hale, je vytvoření akustické bariéry mezi sloupky uprostřed haly. Vzniklým bariérovým efektem by mělo dojít k velmi výraznému snížení hlukosti v jednotlivých půlkách haly, kde nebude docházet ke sčítání hladin hluku od různých zdrojů hluku. Tato bariéra by měla být zhotovena z akusticky pohltivého materiálu, který je navíc (z důvodů manipulace s materiálem) také odolný vůči mechanickému poškození.

Akustická bariéra by mohla být z mechanicky velmi odolného materiálu do výše min. 2 m. Od této výšky by mohla být vytvořena z běžného akustického obkladu, který má menší mechanickou odolnost a je výrazně levnější. Akustická bariéra by měla být dvojí a pro zvýšení neprůzvučnosti by měl být uprostřed např. sádrokarton. Návrh akustické bariéry je zobrazen na následujícím obrázku.



výpočtové modely.

Protihlukové opatření	L _{Aeq}	S _{%85}
Původní stav	85,8	70,32
Akustická bariéra	83,9	30,02
Akustická bariéra + protihlukový obklad	82,8	9,31

Hodnocení účinnosti protihlukových úprav

Z uvedené tabulky je patrný velký význam protihlukové bariéry mezi sloupy v hale. Toto protihlukové opatření bude nezbytné k snížení hluchnosti v hale. Z tabulky je patrné, že nejvýhodnějším řešením je realizace protihlukové bariéry a rovinné obložení stropu a části stěn zvukopohltivým materiálem.

8. Závěry doktorské disertační práce

Význam výsledků doktorské disertační práce

Mnou navržená nová metoda výpočtu předpokládaných hladin hluku v průmyslových interiérech a následná vizualizace vypočtených hodnot s sebou nese především zjednodušení a všeobecnou srozumitelnost při hodnocení hlukové problematiky. To je důležité zejména pro možnost zapojení ostatních zúčastněných při řešení problematiky snižování hluku v průmyslových prostorech.

Výsledkem této doktorské disertační práce je výpočetní algoritmus, který nám pomáhá řešit problematiku hluku v průmyslových prostorech a ukazuje způsoby šíření hluku v řešených interiérech a metody jeho efektivního snižování.

Význam vhodného výpočetního algoritmu je ještě umocněn při řešení konkrétní hlukové situace a zejména při cíleném návrhu protihlukových opatření. Díky takto získaným výsledkům, můžeme mnohem efektivněji navrhnout vhodná protihluková opatření a to jak z hlediska technického (akustického) tak i z hlediska ekonomického.

Osobní přínos doktoranda

Metodiku výpočtu předpokládaných hladin hluku jsem během svého doktorského studia kompletně navrhl, na základě rozborů jednotlivých metod, kterými lze problematiku hluku v průmyslových interiérech řešit. Metodiku výpočtu využívající metod geometrické akustiky, lze dle mého názoru i relativně snadno a komplexně realizovat.



Po uvážení výběru metodiky jsem prakticky celou metodu vytvořil do její současné podoby. Během vývoje byl každý krok porovnáván se známým interiérem. Tento postup byl důležitý a zabezpečil tak, že bylo možno celou metodu realizovat po krocích.

Nové poznatky a závěry pro rozvoj oboru

V počátcích vývoje vlastního výpočetního algoritmu jsem řešil problém, jaký typ metody zvolit za základ. Dlouhou dobu jsem si pohrával s myšlenkou, celý algoritmus realizovat pomocí konečných prvků. Jak se ale ukazuje, byla volba geometrické akustiky relativně vhodnou volbou a ani v současné době bych tuto volbu neměnil. Z výsledků této práce vyplývá, že se výsledky výpočtů předpokládaných hladin akustického tlaku pomocí geometrické akustiky vyrovnají doposud používaným metodám.

Zcela jedinečným přínosem jsou ale vlastní metaechogramy. Vyhodnocováním metaechogramů se nechá zjistit vliv jednotlivých zdrojů hluku na hlukovou situaci v daném bodě.

Přesnost metody a možnosti zlepšení

Při návrhu výpočetního algoritmu jsem si dal velký požadavek na rychlost a na přesnost metody. Přesnost výpočtu předpokládaných hladin akustického tlaku je výrazně závislá na členitosti řešeného průmyslového interiéru. U velmi členitého interiéru, neobdélníkového půdorysu, plného většího počtu vnitřních těles, s velmi rozdílnými akustickými pohltivostmi stěn je chyba výpočtu v některých místech větší než 3 dB.

Tato chyba je pravděpodobně nejvíce způsobena nepřesným výpočtem v prvním chodu. Toto je fakt velký problém a nalezení té nejkratší spojnice mezi zdrojem hluku a buňkou je opravdu komplikované.

U málo členitých průmyslových prostorů, se kterými jsem se běžně setkával, je chyba výpočtu pomocí mnou navrženého algoritmu do 1,2 dB. Tuto chybu považuji za vyhovující.

Co do budoucna

Vývoji mnou navrženého algoritmu bych se chtěl věnovat i nadále. Zejména bych chtěl vyřešit relativně velkou chybu při výpočtu předpokládaných hluku v členitých interiérech a interiérech neobdélníkového půdorysu. Dále bych se chtěl zaměřit na automatické přizpůsobování zadaných hodnot naměřeným hodnotám v referenčních bodech. Po vyřešení těchto relativně velmi komplikovaných problémů by se mohla otevřít cesta do exteriéru. Výpočet v exteriéru by pak nebyl prováděn jen ve zvolených bodech, ale v celých plochách i s uvažováním okolního terénu, zástavby a jiných zdrojů hluku.



Seznam autorových publikací souvisejících s danou problematikou

- [A1] NOVÁK, J.: Hluk v průmyslovém interiéru a jeho snižování. In: VIII. International Conference on the Theory Machines and Mechanisms. TU Liberec, Liberec 2000. ISBN 80-7083-418-8, pp. 529-534.
- [A2] NOVÁK, J.: Počítačová simulace v prostorové akustice. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2001", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. ISBN 80-7078-869-0, pp. 42-47.
- [A3] NOVÁK, J.: Prostorová akustika - vizualizace hluku. Spolehlivost a diagnostika v dopravní technice 2001 - Univerzita Pardubice. ISBN 80-7194-397-5, pp. 114-119.
- [A4] NOVÁK, J.: Vizualizace hluku. Výsledky grantu FRVŠ 1429/2001. TU Liberec, 2001.
- [A5] NĚMEČEK, P., NOVÁK, J.: Vizualizace hluku. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2002", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. ISBN 80-248-0045-4.
- [A6] NOVÁK, J.: Vizualizace diagnostických veličin, 64. Akustický seminář, Česká akustická společnost, Vysoké nad Jizerou 2002. pp. 4 ISBN 80-01-02648-5.
- [A7] NOVÁK, J.: Měření akustické pohltivosti. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2004", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. pp. 6. ISBN 80-248-0465-4.
- [A8] NOVÁK, J.: Zdroje hluku z pohledu geometrické akustiky. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení "DIAGO 2004", VŠB - TU Ostrava + Asociace technických diagnostiků. pp. 4. ISBN 80-248-0465-4.
- [A9] NOVÁK, J.: Akustické vlastnosti materiálů. 45. mezinárodní konference Kateder částí a mechanismů strojů, VÚT Brno, Brno 2004, pp. 4. ISBN 80-214-2702-7.
- [A10] NOVÁK, J.: Počítačová podpora měření zvuku. 69. Akustický seminář, ČVUT Praha 2004, pp. 6. ISBN 80-01-03081-4.
- [A11] NOVÁK, J.: Akustická pohltivost a neprůzvučnost, 3. setkání uživatelů PULSE, Spectris Praha spol. s r.o. 2005 pp. 6. ISBN 80-239-4909-8.
- [A12] NOVÁK, J.: Aplikace pro Pulse LabShop, 3. setkání uživatelů PULSE, Spectris Praha spol. s r.o. 2005 pp. 6. ISBN 80-239-4909-8.



Seznam použité literatury

- [1] NOVÝ, R.: Hluk a chvění, Praha, ČVUT 2000
- [2] KOLMER, F., KYNCL, J.: Prostorová akustika, Praha, SNTL 1980
- [3] LIBERKO, M.: Úvod do urbanistické akustiky, Praha, ČSVTS 1989
- [4] SMETANA, C.: Hluk a vibrace, Praha, Sdělovací technika, 1998
- [5] ČECHURA, J.: Stavební fyzika 10, Praha, ČVUT, 1999
- [6] HASSALL, J. R., ZAVERI, K.: Acoustic Noise Measurements, Nærum, Brüel & Kjær, 1979
- [7] ŽIARAN, S.: Hluk a vibrácie, Bratislava, SVŠT, 1988
- [8] BERANEK, L. L.: Snižování hluku, Praha, SNTL, 1965
- [9] NĚMEČEK, P.: Hluk v technické praxi I., Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1998
- [10] ŠKVOR, Z.: Akustika a elektroakustika, Praha, Academia, 2001
- [11] DRS, L., JEŽEK, F.: Matematické metody v počítačové grafice, Praha, ČVUT, 1988
- [12] KUTMAN, O.: Fyzika II (Akustika), Praha, ČVUT 1991
- [13] KRUPKA, F., KALIVODA, L.: Fyzika, Praha, 1989
- [14] KOČANDRLE, M., BOČEK, L.: Analytická geometrie, Praha, Prometheus, 2001
- [15] REKTORYS, K.: Přehled užití matematiky, Praha, Prometheus, 1996
- [16] ČSN 01 1613 - Výpočet předpokládaných hladin hluku v průmyslových prostorech, Praha, ČNI, 1989
- [17] ČSN ISO 9613-2 - Útlum při šíření zvuku ve venkovním prostoru, Praha, ČNI, 1998
- [18] Noise Control, Nærum, Brüel & Kjær, 1986
- [19] Measurements in Building Acoustic, Nærum, Brüel & Kjær, 1988
- [20] Sound Intensity, Nærum, Brüel & Kjær, 1993
- [21] Technical Review No. 1/2004, Nærum, Brüel & Kjær, 2004

Název	Hluk v průmyslovém interiéru
Autor	Ing. Jan Novák
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Schváleno	Rektorátem TU v Liberci č.j.: RE 143/05
Vyšlo	v listopadu 2005
Počet stran	25
Vydání	1.
Tiskárna	Technická univerzita v Liberci
Číslo publikace	55-107-05

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 80-7372-012-4