



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

HLUK A VIBRACE U VZDUCHOTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ

NOISE AND VIBRATIONS IN AIR-CONDITIONING SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV LIBŘICKÝ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN JEDELSKÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Stanislav Libřický

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hluk a vibrace u vzduchotechnických zařízení

v anglickém jazyce:

Noise and vibrations in air-conditioning systems

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při návrhu vzduchotechnických zařízení je nutné kromě zajištění primární funkce také dbát na další aspekty spojené s provozem těchto zařízení, jedním z nich je omezení hluku a vibrací (h&v), které vznikají v souvislosti s provozem vzduchotechniky. Práce bude zaměřena na mapování relevantních zdrojů h&v, jejich popis a možnosti snižování h&v.

Cíle bakalářské práce:

- Popis typických zdrojů h&v, výběr několika specifických zdrojů s uvedením mechanismů vzniku a šíření h&v
- Používané metody snižování h&v v technice prostředí
- Uvedení a popis relevantní literatury a norem

Seznam odborné literatury:

Smetana, C. a kol.: Hluk a vibrace – měření a hodnocení. ISBN 80-90 1936-2-5, Sdělovací technika, Praha 1998.

Nový, R.: Hluk a chvění, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1995

Székyová, M., Ferstl, K., Nový, R.: Větrání a klimatizace. Jaga, 2006, ISBN: 8080760373, 9788080760373, 359 pages

Vaňková, M. a kol.: Hluk, vibrace a ionizující záření, část I a II.

Rubina A., Akustika ve vzduchotechnice,
<http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/vzt11.pdf>

Beranek, L.L.: Noise and Vibration Control. McGraw-Hill, Inc., 1971

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zdrojů hluku ve vzduchotechnice a možnostech jejich technického snižování. Text obsahuje stručný výčet zdrojů hluku. Důkladněji popisuje pouze hlavních z nich, kterými jsou ventilátory, vlastní aerodynamický hluk potrubní sítě a chladiče. Další součástí práce je popis metod snižování vybraných zdrojů hluku v technice prostředí. Závěr práce obsahuje výběr a popis relevantních zákonů a norem k dané problematice.

KLÍČOVÁ SLOVA

hluk, vibrace, vzduchotechnika, proudění, ventilátor

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the sources of noise in air-conditioning equipment and potential noise reduction. The thesis also includes a detailed list of the sources of noise. Thoroughly describes only the main ones, which are fans, aerodynamic noise of air conduit and chillers. The thesis continues with description of methods of the reduction of selected causes of noise in a certain environment. The final part of the bachelor's thesis includes listing and description of laws and regulations affecting the issue of noise in air-conditioning equipment.

KEYWORDS

noise, vibration, air-conditioning, airflow, fan



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LIBŘICKÝ, S. *Hluk a vibrace u vzduchotechnických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského, Ph.D. a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 27. května 2014

.....

Stanislav Libřický



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za cenné rady, připomínky a trpělivost, kterou mi projevoval v průběhu vzniku této bakalářské práce. Práce byla vytvořena s podporou NETME Centre, regionální výzkumné a vývojové centrum vybudované z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I”.



OBSAH

Úvod	10
1 Hluk a vibrace.....	11
1.1 Zvuk a jeho vlastnosti	11
1.2 Základní akustické a decibelové veličiny	11
1.3 Vliv na životní prostředí	12
1.4 Základní metody boje proti hluku.....	12
1.5 Vibrace	13
1.6 Základní veličiny vibrací	14
1.7 Hladina akustického tlaku A	14
2 Účinky hluku na lidský organismus	15
3 Zdroje hluku a vibrací u vzduchotechnického zařízení	17
3.1 Zdroje hluku a jejich vyzařování	18
3.2 Hluk od strojních zařízení	19
3.2.1 Aerodynamický hluk	19
3.2.2 Mechanický hluk	20
3.2.3 Magnetický hluk	20
3.3 Ventilátory	21
3.3.1 Rozdělení ventilátorů.....	21
3.3.2 Hluk a vibrace od ventilátoru	21
3.3.3 Radiální ventilátor	22
3.3.4 Axiální ventilátor	23
3.4 Elementy potrubní sítě	24
3.4.1 Hluk v přímých vzduchovodech.....	24
3.4.2 Hluk koncových elementů	24
3.4.3 Hluk vznikající v kolenech, odbočkách a obloucích	24
3.4.4 Hluk vznikající v klapkách	25
3.5 Zdroje chladu	25
4 Snižování hluku a vibrací u vzduchotechnických zařízení.....	26
4.1 Mechanismus pohlcování zvuku.....	26
4.2 Neprůzvučnost konstrukce	26
4.3 Strojovna vzduchotechniky.....	26
4.4 Tlumení hluku a vibrací u ventilátorů.....	28
4.4.1 Snižování rychlosti proudění, tlaku, otáček a průtoku vzduchu.....	28
4.4.2 Pružné uložení ventilátoru	28
4.4.3 Izolace ventilátorů pomocí krytů.....	29



4.4.4	Konstrukční řešení radiálního ventilátoru	29
4.4.5	Konstrukční řešení axiálního ventilátoru.....	29
4.5	Snižování hluku a vibrací ve vzduchovodech.....	30
4.5.1	Absorpční tlumiče v potrubí	30
4.5.2	Přirozený útlum v potrubí.....	31
4.5.3	Uložení vzduchovodu.....	31
4.5.4	Antivibrační nátěr	31
4.5.5	Snížení hluku koncových prvků	32
4.6	Snižování hluku a vibrací u chladících zařízení	32
4.7	Tlumení hluku akustickou zástěnou	33
5	Normy a relevantní literatura.....	34
5.1	Sbírka zákonů č. 272/2011.....	34
5.2	Sbírka zákonů č. 21/2003.....	35
5.3	Norma ČSN EN ISO 5135.....	35
5.4	Norma ČSN 12 0017.....	35
5.5	Norma ČSN ISO 7235	36
5.6	Norma EN ISO 11546-1	36
5.7	Norma EN ISO 14163	36
5.8	Norma EN ISO 15667.....	36
	Závěr.....	37
	Seznam použitých zdrojů.....	38
	Seznam použitých veličin.....	42

ÚVOD

Vlivem technického rozvoje dochází k neustálému zvyšování nároků nejen na výkon strojů, ale i na jejich hlučnost a vibrace. Na základě mnoha odborných publikací a výzkumných prací můžeme konstatovat, že příčinou nadměrného hluku je z 90 % hluk strojů, dopravních nebo jiných technologických zařízení. Hlučnost těchto strojů má za následek snižování kvality životního prostředí.

Stejně závažná je i otázka po technické stránce. Hluk je průvodním jevem vibrací, které způsobují únavové namáhání materiálu, které může vést až k jeho poškození. Tyto poruchy mohou zapříčinit vyšší ekonomické výdaje přesahující pořizovací náklady.

Zvuk i vibrace jsou určitá vlnění spadající do oboru fyziky. Zvuk se může šířit v kapalinách, plynech i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V rozsahu slyšitelnosti se zvuk šíří v kapalných a plynných látkách. V tuhých látkách se šíří vibracemi. Ve vzduchotechnickém potrubí se hluk šíří vzduchem na velké vzdálenosti. Vibrace se od zdroje hluku šíří konstrukcemi (zdi, stěny vzduchovodu apod.).

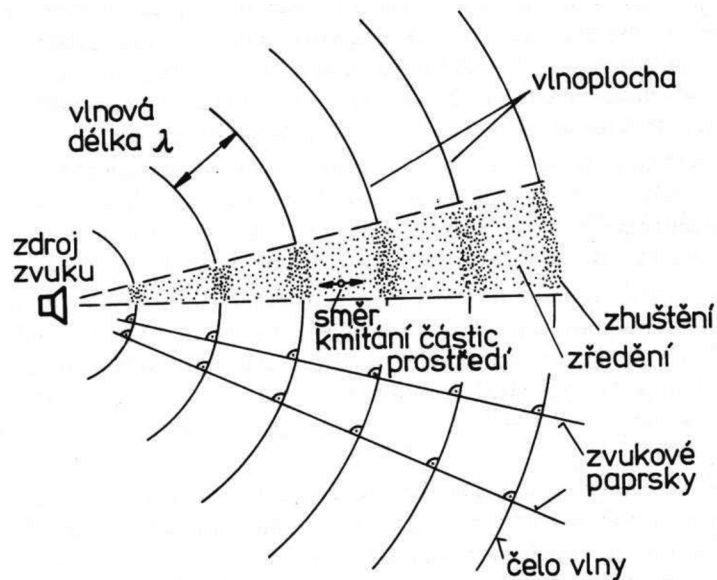
Hlavní náplní vzduchotechniky je doprava a čistota upraveného vzduchu z venkovního prostoru do vnitřních místností a naopak. Při tomto jevu vzniká hluk, vyvolaný např. ventilátorem a samotným prouděním vzduchu přes různé překážky (koleno, zúžení, klapky, koncové elementy atd.) ve vzduchovodu.

Nejdůležitějším cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s problematikou hluku a vibrací u vzduchotechnických zařízení, mapování relevantních zdrojů hluku a vibrací, jejich popis a možnosti jejich snižování v technice prostředí. Dalším cílem je seznámení s relevantní literaturou a normami vztahujícími se k danému tématu.

1 HLUK A VIBRACE

1.1 ZVUK A JEHO VLASTNOSTI

Zvuk je mechanické vlnění v pružném prostředí, které je slyšitelné lidským uchem. Frekvenční rozsah se v akustice rozděluje do tří hlavních oblastí. Do 16 Hz se jedná o infrazvuk (který slyší např. sloni). Člověkem slyšitelný frekvenční rozsah je přibližně v intervalu 16–20 000 Hz. Zvukové vlnění mimo tento rozsah nevyvolává pro člověka sluchový vjem, přesto se občas jako zvuk označuje. Frekvenční vlnění nad 20 000 Hz (např. delfini či netopýři vnímají zvuk až do frekvencí okolo 150 kHz) se nazývá ultrazvuk. Zvuk se šíří podélným nebo příčným vlněním. V plynech a kapalinách nastává pouze podélné vlnění, které se vyznačuje stejným směrem šíření vlny jako směr kmitání jednotlivých částí hmoty. Jelikož pevné látky vykazují pružnost v tahu a tlaku, ale i smyku, může se vlnění vyskytovat podélné i příčné, ale i jejich kombinace. Akustické vlnění se od zdroje hluku šíří ve vlnoplochách. Vlnoplocha je množina bodů v prostoru. Tyto body dorazí na určitá místa ve stejném okamžiku se stejnou fází. [3] [8]



Obr. 1 Šíření zvukové vlny [2]

1.2 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ A DECIBELOVÉ VELIČINY

Akustický tlak p [Pa] je skalární veličina určující rozdíl mezi okamžitým a statickým tlakem. Vzorec pro harmonický signál je dán vztahem [3]:

$$p = p_0 \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \quad (1)$$

Hladina akustického tlaku L_p [dB] je měřítkem zvukové energie vysílané zdrojem hluku. Její referenční hodnota pro vzduch je $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa. Vztah je ve tvaru [4]:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

Akustický výkon P [W] je výkon přenášený akustickým vlněním. Je to energie zvukových vln vyzářená ze zdroje, eventuálně dopadající na plochu nebo procházející plochou za jednotku času. [3]

$$P = Fv = p v S \quad (3)$$

Hladina akustického výkonu L_w [dB] je nezávislá na podmínkách, ve kterých se určuje a je nezbytnou veličinou pro posuzování vlivu hluku na zdraví člověka, ekonomiku společnosti a její životní úroveň. Referenční hodnota akustického výkonu je $P_0 = 10^{-12}$ W. [4]

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

Akustická intenzita I [W/m²] je střední časová hodnota měrného akustického výkonu za jednotku času a zjišťuje směr toku akustického vlnění a určuje směr a množství akustické energie. [3]

$$I = \frac{p_{ef}^2}{2\rho c} \quad (5)$$

Hladina akustické intenzity L_I [dB] vzroste o 10 decibelů při zvýšení akustické intenzity o jeden řád (desetinásobek) a je definována vztahem: [3]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

1.3 VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

V dnešní době s vývojem techniky v každé oblasti a rozvojem dopravy přibývá na hlučnosti. Nové stroje a technologická zařízení jsou navrhována se stále vyššími výkony. Z toho plyne nárůst mechanického výkonu, který je přímo úměrný akustickému výkonu. Moderní trendy vylehčování konstrukcí staveb, strojů a zařízení vedou obvykle k úbytku zvukoizolačních vlastností a vyvolávají rychlý nárůst akustického výkonu. [3] [4]

Hlukem nazýváme každý nežádoucí zvuk, který vyvolává nepříjemný vjem nebo má škodlivý účinek. Pro každého člověka je hluk něco jiného. Jeden člověk může brát určitý zvuk jako hluk a pro druhého může být důležitým přísunem informací. Proto se snažíme zmírnit nadměrně silný hluk a ne hluk jako takový. Nadměrně silný hluk znepříjemňuje a ruší práci, pobyt a případně škodí i zdraví člověka. [3] [4]

1.4 ZÁKLADNÍ METODY SNIŽOVÁNÍ HLUKU

V boji proti hluku je důležité zaměřit se na to, jak je dodržení hygienických norem hluku ekonomicky a technicky proveditelné. Základní rozdělení snižování hluku: [4]

Metoda redukce hluku ve zdroji – je aktivní metoda, která snižuje budící silové účinky, upravuje povrchy strojů a zlepšuje přenosové vlastnosti struktury strojů (frekvenční ladění). Tento způsob je primární při snižování hluku, protože poskytuje nejúčinnější opatření a potřebuje daleko nižší finanční náklady než dodatečné zajištění. [4] [51]

Metoda dispozice – záleží na vhodném umístění hlučných zařízení a strojů. Tato metoda je využívána již při navrhování objektů. [4] [51]

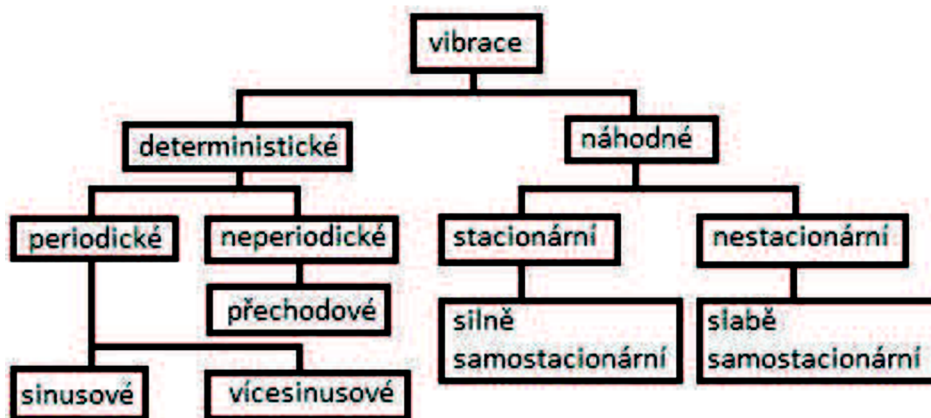
Metoda izolace – metoda využívá zvukoizolační materiály, kterými se odizoluje hlučný stroj v podobě různých krytů a zákrytů. Další možností je odizolovat hlučnou místnost. Jde o návrh různých zvukoizolačních příček, stropů, krytů apod. [4] [51]

Metoda prostorové akustiky – spočívá ve schopnosti materiálu pohlcovat akustickou energii a přeměňovat ji na teplo. [4] [51]

Metoda osobních ochranných pomůcek – používají se jen, když selžou nebo nedostačují předchozí metody. Jako ochranné pomůcky se považují různé přilby, špunty do uší a sluchátkové chrániče. [4] [9] [51]

1.5 VIBRACE

Vibrace jsou kmitání neboli oscilace mechanické soustavy, kde jednotlivé hmotné body vykonávají vratný pohyb kolem své klidové rovnovážné polohy prostředí nebo pružného tělesa. V převážné míře je mechanické kmitání způsobeno různými mechanismy a stroji. Dále může být způsobeno např. zemětřesením, ale to není obsahem této práce. Mechanické kmitání se v rozsahu slyšitelných kmitočtů dříve nazývalo také jako chvění. Vibrace nejen že nepříznivě ovlivňují člověka, ale i snižují spolehlivost a životnost strojů, mechanismů a různých konstrukcí. Velikost vibrací určujeme výchylkou nebo jejími časovými derivacemi. Nejčastěji se z časových derivací používá zrychlení, hladina zrychlení vibrací a další jsou rychlost a ryv kmitavého pohybu. Vibrace jsou rozděleny podle časového průběhu do dvou klíčových skupin viz obr. 2. [2] [3]



Obr. 2 Rozdělení vibrací dle kategorií, upraveno z [2]

Deterministické vibrace jsou předem určitelné. Podle jejich dosavadního průběhu můžeme pravdivě stanovit okamžitou hodnotu v určeném čase. Náhodné vibrace nelze předem stanovit, protože se mění nepředvídatelným způsobem. [2]

1.6 ZÁKLADNÍ VELIČINY VIBRACÍ

Následující veličiny jsou definovány v časovém oboru. [3] [4]

Okamžitá výchylka s [m]

$$s(t) = s_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Okamžitá rychlost v [m/s]

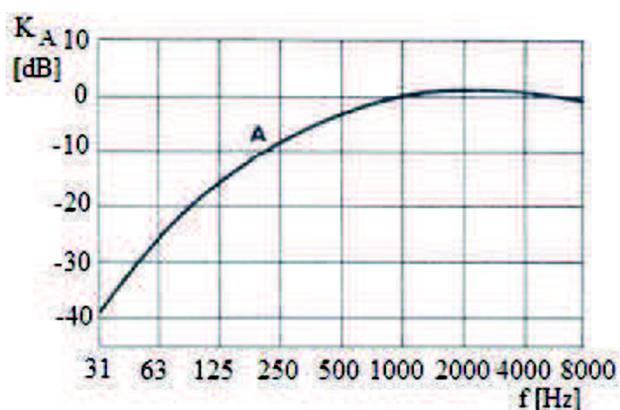
$$v(t) = \frac{ds}{dt} = s_0 \omega \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

Okamžité zrychlení a [m/s²]

$$a(t) = \frac{d^2s}{dt^2} = -s_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

1.7 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU A

Váhové filtry se používají z důvodu zkreslené citlivosti lidského sluchu při různých kmitočtech. Používají se k přepočítávání skutečně naměřených hodnot hladin zvuku na jiné hodnoty hladin zvuku. Existují různé kmitočtové filtry, např. A, B, C, D. Jednoznačně nejpoužívanější je váhový filtr A, značený L_{pA} [dB]. Je to hladina akustického tlaku frekvenčně váženého filtrem A. Útlumová frekvenční charakteristika filtru A je v každém hlukoměru a hygienická služba podle něj určuje, zda hluk nepřesahuje vyhovující kritéria. Charakteristika odpovídá senzitivitě zdravého lidského ucha. V oblasti frekvence okolo 1000 Hz jsou nulové korekce jednotlivých filtrů, protože při této frekvenci je lidský sluch nejcitlivější.



Obr. 3 Útlumová charakteristika váhového filtru A, upraveno z [4]

Z hladin akustického tlaku v oktávních pásmech nebo třetinoctávních lze vypočítat hladinu zvuku A dle vztahu: [2] [3] [4]

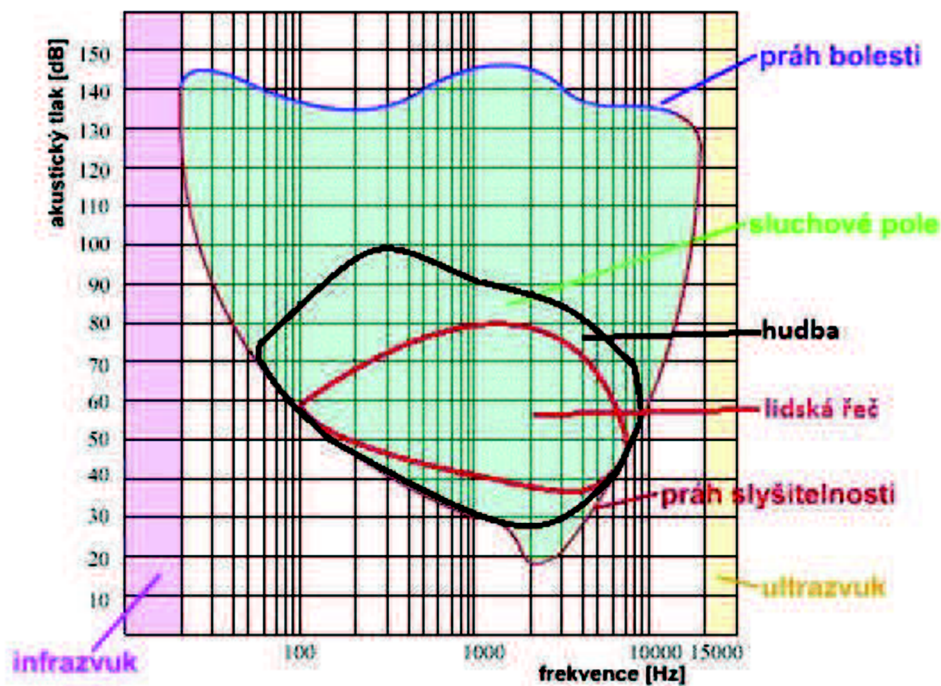
$$L_{pA} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi} + K_{Ai}}{10}} \quad (10)$$

Tab. 1 Korekce K_{Ai} v dB, upraveno z [3]

Frekvence [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Filtr A [dB]	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,0

2 ÚČINKY HLUKU NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Intenzita zvuku je základní veličinou určující povahu hluku. Mezi další faktory, které ovlivňují účinek zvuku na lidský organismus, patří frekvence, rozložení zvuku v čase a psychický vztah člověka k danému hluku. Hodnota okolo 20 dB je pro většinu populace nepřirozené ticho. Z toho důvodu je např. nezbytné vytvořit kosmonautům při letech do vesmíru zvukovou kulisu, která má přiblížit život na zemi. Hladina okolo 30 dB je brána jako příjemné ticho. Oblasti od 65 dB se začínají nepříznivě projevovat na lidský organismus, zejména na vegetativní nervový systém. Při práci nebo pobytu v místě s akustickým tlakem nad 85 dB se začínají projevovat trvalé sluchové vady. Jakmile akustický tlak přesáhne 130 dB, účinky hluku působí bolestivě na sluchové ústrojí. Nebezpečí v podobě prasklého bubínku začíná okolo 160 dB. Největší problém nastává v tom, že lidské tělo nemá žádné přirozené obrané prostředky proti snížení hluku jako např. u zraku, kde můžeme přivřít nebo zcela zavřít oči. [3] [10]



Obr. 4 Kmitočtové a amplitudové složení řeči a hudby, upraveno z [11]

Hluk člověku poskytuje důležité poplašné signály, které vnímá sluchovým smyslem. Na náhlé zvuky tělo reaguje např. těmito mechanismy: [2]

- zvýšení krevního tlaku
- zrychlení tepu
- stažení periferních cév
- zvýšení hladiny adrenalinu
- ztráta hořčiku



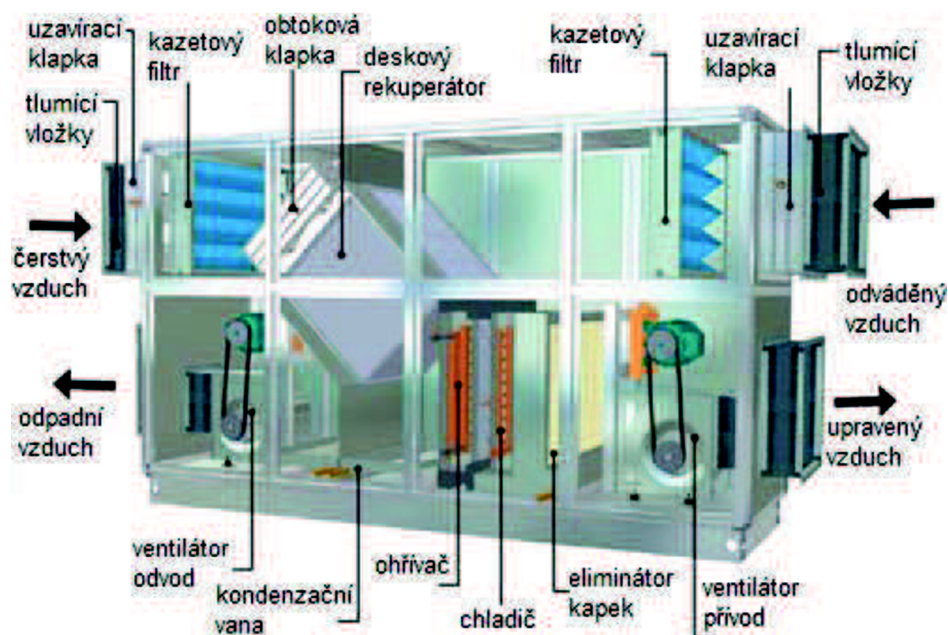
Hluk člověku ztěžuje dorozumívání a obecně ho ruší a obtěžuje. Za předpokladu dlouhodobě působící nadměrné hlučnosti dochází k zhoršování fyzického stavu lidského těla. Jedná se o sluchové ztráty, poruchy spánku a poruchy regulací. [2]

Psychické potíže jsou dalším negativním důsledkem působení hluku na lidský organismus. Jsou to např. rozmrzelost, agresivita nebo různé depresivní stavy. Hluk způsobuje také únavu, se kterou je spojené snižování pozornosti a výkonnosti na pracovištích. Reakce organismu na daný hluk je ovlivněna několika dalšími faktory, kterými jsou např. tónovost, dynamika, spektrum, rychlost a velikost změny, časová historie, informační obsah a neméně podstatný je faktor očekávání daného hluku. Pokud není člověk připraven na náhlý nežádoucí hluk, mohou u něj nastat různé negativní zdravotní komplikace. [2] [12]

3 ZDROJE HLUKU A VIBRACÍ U VZDUCHOTECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ

Při navrhování vzduchotechnického zařízení jsou kladeny základní požadavky na splnění potřebných klimatických podmínek. V dnešní době není většinou problém se splněním těchto podmínek. Problém nastává v nadměrné hlučnosti vzduchotechnických zařízení. Nejčastějšími zdroji hluku ve vzduchotechnice jsou vibrující části mechanismů a nestacionárně proudící vzduch, který prochází vzduchotechnickými elementy. Tento proudící vzduch vytváří tzv. aerodynamický hluk. Při posuzování daného hluku je velice důležité znát původ, hladinu akustického výkonu a směr jeho šíření. [13]

Mezi zdroje hluku patří vzduchotechnická zařízení, kde se tvoří akustická energie, např. ventilátory, oběhová čerpadla, chladicí kompresory, kondenzátory, fancoily (ventilátorová jednotka s jedním nebo dvěma výměníky), výměníky tepla (chladiče, ohřívače), zvlhčovače a filtry, v kterých dochází k tlakovým ztrátám a vzniku turbulentního proudění. V této práci není dostatečný prostor na rozebírání všech těchto komponentů, a proto se zabývám jen nejhlučnějšími z nich, kterými jsou ventilátory. [6] [37]



Obr. 5 Vzduchotechnická jednotka [7]

Další významnou skupinou jsou komponenty vzduchotechnického potrubí jako např. různé klapky, kolena, rozbočky, výústky a dýzy tvořící aerodynamický hluk. Vzduchovody jsou řešeny nejen z hlediska tvorby hluku, ale i šíření hluku a vibrací. [6]



Obr. 6 Potrubní elementy [14] [15] [16] [17]

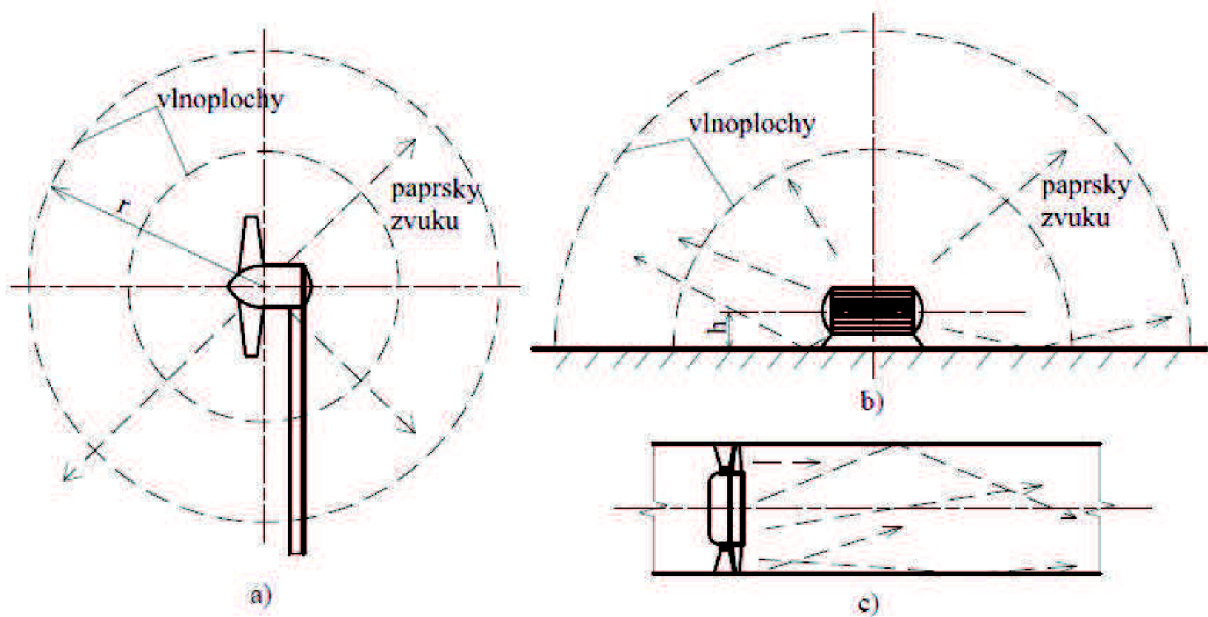
3.1 ZDROJE HLUKU A JEJICH VYZAŘOVÁNÍ

Při zjišťování velikosti a závažnosti hluku je pro další opatření v podobě snižování hlučnosti velice důležité znát směry vyzařování hluku od zdroje. Zvuk se šíří nerovnoměrně do všech směrů od zdroje zvuku. Pro zjednodušení se zdroje rozdělují na tři základní modely vyzařování. [31] [32]

Všesměrový zdroj je základním modelem zdroje hluku, který se v technické praxi běžně nevyskytuje. Všesměrový je nazýván podle jeho úhlu působení. Jedná se např. o některé ventilátory (obr. 7a). [32] [41]

Zdroj, který se v praxi nejvíce vyskytuje, vyzařuje energii pod prostorovým úhlem $\Omega = 2\pi$. Zářič je umístěn na pevném podkladu, od kterého se energie odráží a tím se mění akustické vlastnosti a směry zvukových paprsků. Pevným podkladem se má na mysli např. betonový základ, stůl, podlaha nebo zemský povrch, na který je stroj umístěn (obr. 7b). Stroj o velkých rozměrech nemusí vyzařovat ve všech místech povrchu stejnou energii a tím se mění centrum vyzařování. Proto se vlnoplochy zdroje s velkým rozměrem přibližují kulovým plochám až na větší vzdálenosti. [32] [41]

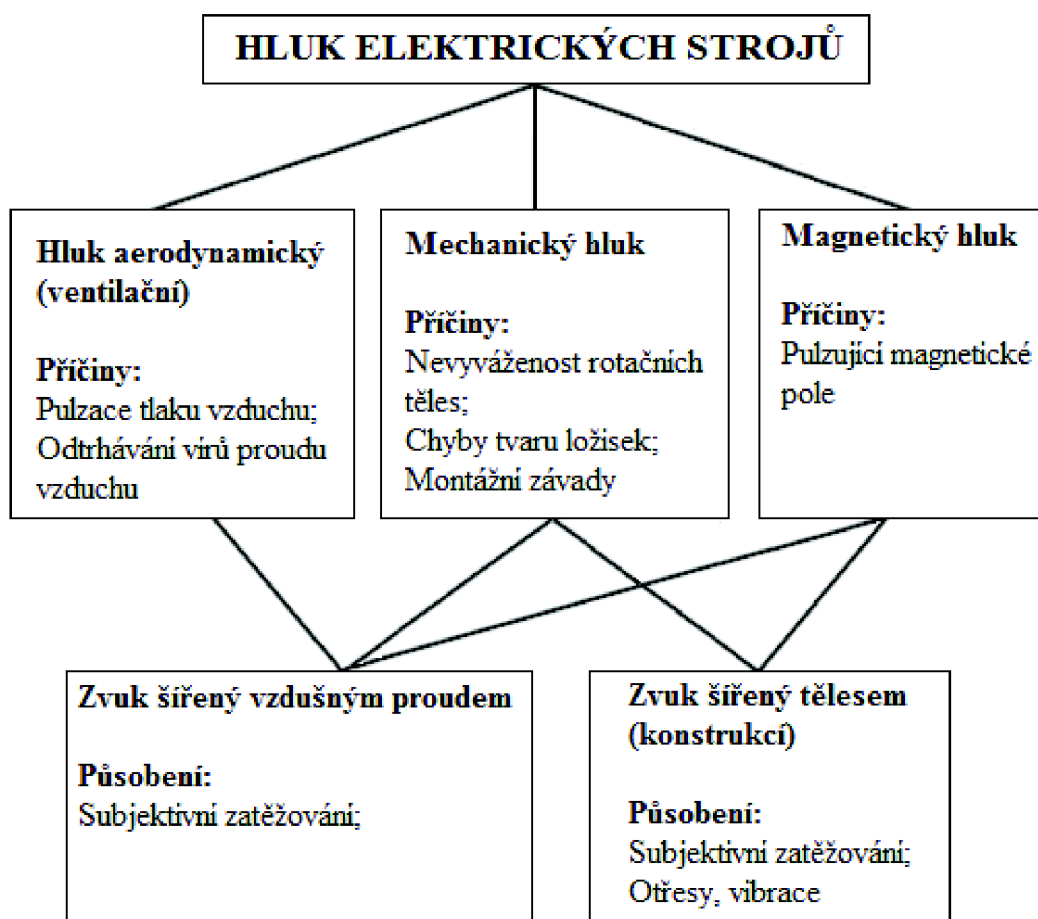
V této práci je velmi důležité i šíření hluku zvukovodem (obr. 7c). Vzduchotechnickým potrubím postupuje akustická energie na poměrně velké vzdálenosti a vlivem překážek se může i zvětšovat. [32] [41]



Obr. 7 Vyzařování hluku od zdroje: a) všesměrový, b) nad odrážecí rovinou, c) hluk ve zvukovodu, upraveno z [32]

3.2 HLUK OD STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Chceme-li u strojů dosáhnout co nejmenšího hluku, musíme se začít zajímat o akustickou energii již při navrhování daných strojů. Ve strojích a strojních zařízeních může být větší počet zdrojů. Jako zdroj hluku je považováno místo, kde se vytváří akustická energie. Hluk od ventilátorů a jiných elektricky napájených strojů se rozděluje do tří skupin podle obr. 5. [32]

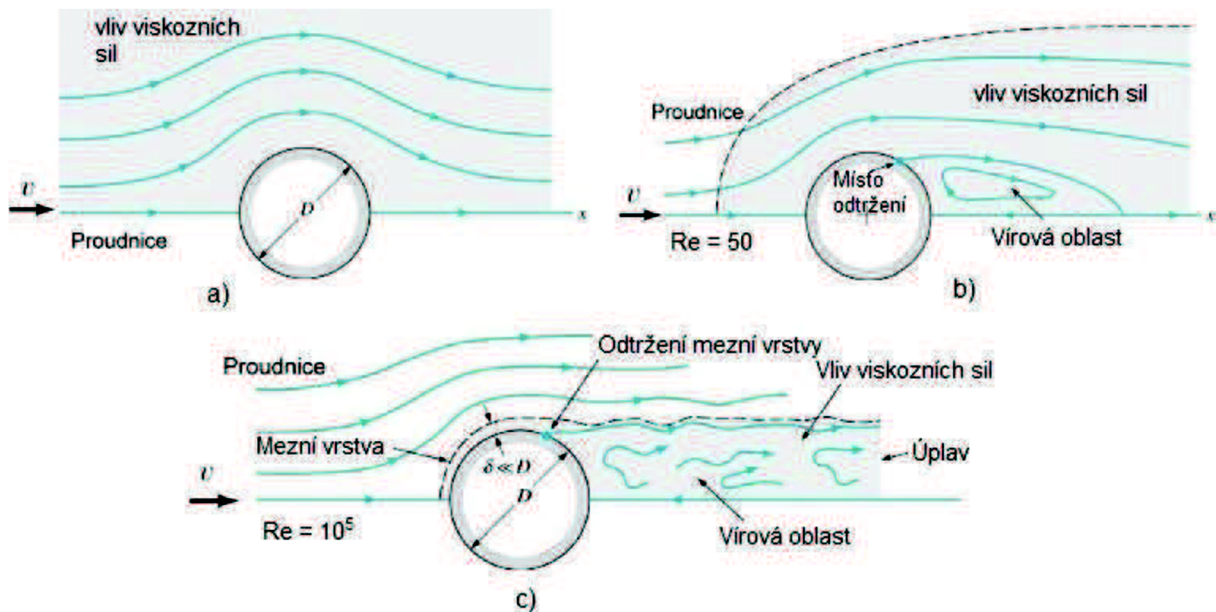


Obr. 8 Rozdělení hluku elektrických strojů, upraveno z [1]

3.2.1 AERODYNAMICKÝ HLUK

Ve vzduchotechnice je aerodynamický hluk výrazně největší složkou hluku a je nazýván jako ventilační. Stroje jako např. ventilátory nebo klimatizační zařízení jsou navrhovány tak, aby vzduch uvedly do pohybu a přemístily na jiné místo. Ve stroji a zvukovodu dochází často k turbulentnímu proudění vlivem velké rychlosti proudění vzduchu, které vede ke vzniku aerodynamického hluku. Aerodynamický hluk lze definovat jako zvuk působící proudem vzduchu nebo plynu na okolní prostředí. U turbulentního proudění nastává pulzace neboli kolísání statického tlaku. Nachází-li se pulzace ve slyšitelném frekvenčním pásmu, může do okolí vytvářet hluk. Existuje mnoho důvodů vyvolávajících tento nepříznivý zvuk. Jedním z nich je obtékání těles vířivým a nestacionárním proudem vzduchu ve vzduchovodu. Mezi tyto tělesa tvořící vírové stezky

za tělesem patří např. lopatky ventilátorů, regulační klapky, mřížky, různé filtry apod. Další příčinou je proudění podél předmětů, kde v mezní vrstvě vznikají vířivé proudy. Velký problém řešení aerodynamického hluku je také v přechodu pulzujícího a turbulentního proudění různými otvory nebo dýzami do prostředí s klidným vzduchem. Neméně důležitý hluk je tzv. sirénový, který vzniká často ve ventilátorech nepravidelným nebo přerušovaným prouděním a může být doprovázen drobnými částicemi poletujícími v proudě vzduchu. [5] [6]



Obr. 9 Obtékání těles a) laminární proudění, b) laminární s vířivou oblastí, c) turbulentní proudění, upraveno z [18]

3.2.2 MECHANICKÝ HLUK

Akustická energie je předávána do okolí vlivem kmitání těles. Kmitání je přenášeno konstrukcí stroje z jednotlivých zdrojů, kde působí budící síly tvořící kmity. Z počátečních zdrojů se mechanické kmity šíří do větších tvarových ploch na povrch tělesa, odkud vyzařují energii do okolí nebo se šíří do připojených konstrukcí a základů, kterými se rozšiřují do sousedních, mnohdy i vzdálených prostorů. Z toho vyplývá, že u mechanického hluku velice záleží na tvaru povrchu a velikosti tělesa. [5]

3.2.3 MAGNETICKÝ HLUK

Magnetický hluk vzniká dvojným způsobem a je rozpoznatelný tak, že při vypojení z elektrické sítě a chodu na volnoběh přestaneme daný hluk slyšet. Jeden ze způsobů je magnetostrickce, což je změna velikosti materiálu při zmagnetizování. Druhý je silové působení feromagnetických hmot v časově proměnných polích. [5]

3.3 VENTILÁTORY

Ventilátory jsou nejvydatnějším tvůrcem hluku ve vzduchotechnice, proto na ně v této práci klademe největší důraz. Ventilátor je lopatkový rotační stroj používaný k dopravě vzduchu do maximálního tlaku 10 kPa. V technice prostředí se s ním setkáme snad v každém větracím a klimatizačním zařízení a mezi jeho důležitá měřítka patří objemové množství vzduchu, celkový dopravní tlak a příkon. Závislost dopravního tlaku na průtoku vzduchu určuje výkonovou charakteristiku ventilátoru. [6] [19]

3.3.1 ROZDĚLENÍ VENTILÁTORŮ [56]

A) Dle průtoku vzduchu oběžným kolem

- Axiální (osové)
- Radiální
- Diagonální
- Diametrální
- Tangenciální

B) Dle pohonu

- Elektromotor
- Tlakový vzduch

C) Dle dopravního tlaku

- Nízkotlaké do 1 kPa
- Středotlaké 1–3 kPa
- Vysokotlaké nad 3 kPa

D) Dle spojení ventilátoru s elektromotorem

- Napřímo
- Na spojku
- Na řemen (nejčastěji používané)
- S převodovou skříní (pro chladicí věže)

E) Podle počtu stupňů

- Jednostupňové (klasické)
- Vícetupňové (soustava několika sériově řazených jednostupňových ventilátorů)



Obr. 10 Ukázky ventilátorů
[20] [21] [22]

3.3.2 HLUK A VIBRACE OD VENTILÁTORU

Zásadní složkou hluku ve ventilátoru je aerodynamický hluk, který vzniká prouděním plynného média, nejčastěji vzduchem ve ventilátorovém kole a spirální skříní. Rychlost proudění vzduchu se ve ventilátoru obvykle váže na obvodovou rychlost velkého průměru oběžného kola, kterou značíme u . Toto proudění je vysoce turbulentní. Akustický výkon je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti. Tento hluk se šíří hlavně na větší vzdálenosti sacím a výtlačným potrubím vzduchovodu. Sacím potrubím se hluk podle funkce převážně dostává do venkovních prostorů a výtlačným je rozváděn po budově do větraných místností. Tento klíčový hluk má charakter spojitého širokopásmového spektra. Může být občas přehlušen nebo doplněn sirénovým hlukem, který charakterizuje diskrétní spektrum. Ventilátory produkují hluk v celém frekvenčním pásmu. [6] [28]

Tab. 2 Charakteristiky hluku vybraných ventilátorů, upraveno z [28]

Zdroj	Akustický výkon [W]	Hladina akustického výkonu [dB]
Velký radiální ventilátor, 800 000 m ³ /h	100	140
Axiální ventilátor, 100 000 m ³ /h	10	130
Radiální ventilátor, 25 000 m ³ /h	0,1	110
Axiální ventilátor, 2500 m ³ /h	0,001	90

Příčiny aerodynamického hluku: [6] [32]

- kolísání dopravního množství
- tvoření vírů za lopatkami
- turbulentní proudění v mezní vrstvě
- vnořování oběžných nebo statorových lopatek do turbulentního proudění.

Do základů, stavebních konstrukcí, vzduchotechnických zařízení a okolí je vyzařována akustická energie v podobě mechanického hluku nebo vibrací, se kterými se také počítá do celkového hluku. U pomaloběžných ventilátorů s nízkými otáčkami a tlakem se může stát, že převládne mechanický hluk nad aerodynamickým. [28] [37]

Příčiny mechanického hluku: [6] [32]

- nevyváženost otáčivých částí stroje
- valivá ložiska
- špatné mechanické provedení
- elektromotory
- převody
- spojky apod.

Příčiny mechanického hluku jsou většinou stejné pro axiální i radiální ventilátor. Další velmi malý přírůstek k celkovému akustickému hluku má na svědomí magnetický hluk. [32]

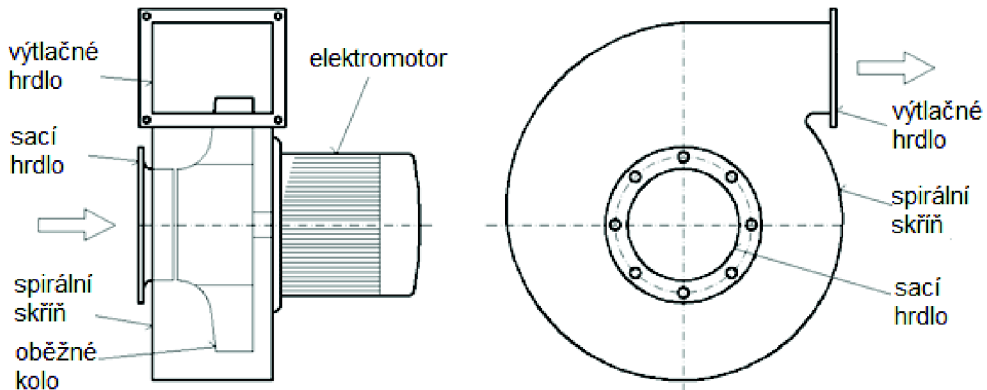
Akustický výkon je nejdůležitější charakteristikou zdrojů zvuku. Umožňuje jejich hodnocení v technické akustice, hodnocení z hlediska vlivu na člověka a umožňuje také porovnávání zdrojů mezi sebou. Pro celkový akustický výkon lze použít vztah: [6]

$$P = K \frac{\rho_0}{c_0^3} u^6 D^2 \quad (11)$$

3.3.3 RADIÁLNÍ VENTILÁTOR

Radiální ventilátory jsou rozdělovány podle zahnutí lopatek v oběžném kole na dopředu zahnuté, radiálně a dozadu zahnuté. Ve vzduchotechnice jsou nejrozšířenější nízkotlaké ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami. Ventilátor s dozadu zahnutými

lopatkami je nejtíší. Naopak nejhlučnější je s radiálně zahnutými lopatkami. Ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami tvoří průměrný hluk odpovídající rozmezí předchozích dvou. [6] [23] [24]



Obr. 11 Schéma radiálního ventilátoru, upraveno z [23]

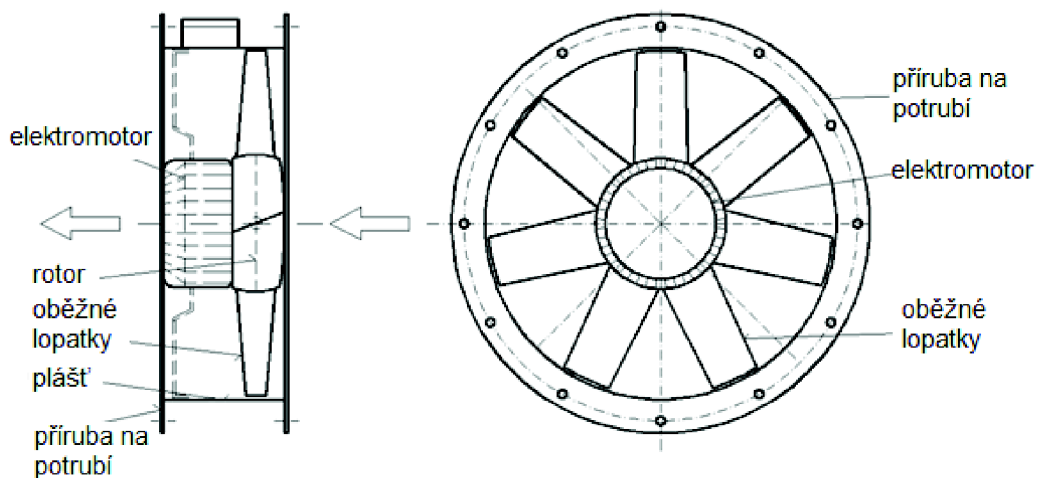
Sirénový hluk v radiálním ventilátoru vzniká vlivem proudění vzduchu na obvodu oběžného kola, kde je nevyrovnaný rotující rychlostní profil. Ten je pozvolna vyrovnáván se zvětšující se vzdáleností od oběžného kola. Při styku nevyrovnaného rychlostního profilu s tzv. jazykem ventilátoru dochází k tlakovým pulzům, které se projevují vyzářováním akustické energie. [34]



Obr. 12 Tvorba hluku, upraveno z [52]

3.3.4 AXIÁLNÍ VENTILÁTOR

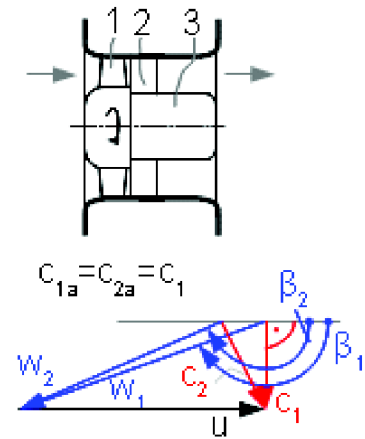
Axiální ventilátory se člení na rovnotlaké a přetlakové. Přetlakové se vyznačují menším statickým tlakem před kolem než za ním. Rovnotlaké zvyšují jenom rychlost média. Používají se tam, kde je zapotřebí dopravit velké objemové množství vzduchu s nízkými nároky na dopravní tlak. Montují se přímo na potrubí. Axiální ventilátory jsou obecně daleko hlučnější než radiální. [6] [19] [23]



Obr. 13 Schéma axiálního ventilátoru, upraveno z [23]

Axiální ventilátory rozdělíme podle hlučnosti na 3 skupiny. Nejméně hluku vydávají lopátkové ventilátory. Hlučnější jsou potrubní a nejvíce hlučné jsou ventilátory vrtulové. Hluk, který vydává axiální ventilátor, patří do oblasti spektra středních a vysokých frekvencí. [24] [38]

Sirénový hluk v axiálním ventilátoru vzniká vlivem nerovnoměrného rozložení rychlostí proudění za lopatkami. Za každou vstupní lopatkou je tvořen úplav, kde je absolutní velikost rychlosti c_l nižší než před lopatkou. Relativní rychlost w_l se vypočítá vektorovým součtem obvodové rychlosti u a absolutní rychlosti c_l . Na vstupu do oběžného kola se mění relativní rychlost a tím vzniká ráz. Velký podíl na zvyšování sirénového hluku má také nábojový poměr ν , který je z experimentálního sledování optimální v rozmezí 4–6 v závislosti na druhu ventilátoru. Je to poměr mezi průměrem a rychlostí. Např. při $\nu = 8$ se může hladina akustického tlaku zvětšit až o 12 dB. Na sirénový hluk má vliv také počet lopatek. [32] [38]



Obr. 14 Rychlostní trojúhelník axiálního ventilátoru, upraveno z [57]

3.4 ELEMENTY POTRUBNÍ SÍTĚ

3.4.1 HLUK V PŘÍMÝCH VZDUCHOVODECH

V přímých vzduchovodech vlivem turbulentního proudění vzniká hluk se střední frekvencí pohybující se v rozmezí 31,5–1000 Hz. Podle rovnice 12 zjistíme, že při zdvojnásobení rychlosti se celková hladina akustického výkonu zvýší přibližně o 15 dB, což ve srovnání např. s ventilátory nebo jinými elementy není příliš podstatné. [6] [25] [28]

$$L_w = 10 + 50 \log w + 10 \log S \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

3.4.2 HLUK KONCOVÝCH ELEMENTŮ

Vzduchovody jsou zakončovány vyústkami a dýzami různých tvarů a provedení. Hluk je tvořen turbulentním prouděním, které vzniká při aerodynamickém obtékání vzduchu lopátkových mříží, talířových, textilních a podlahových vyústek, anemostatů, dýz a jiných překážek upravujících rychlost a směr vzduchu ze vzduchovodu do upravovaných prostorů. Při obtékání těchto elementů vzniká turbulentní proudění, které má za následek vznik hluku o vysoké frekvenci od 1000 Hz do 4000 Hz. Tento hluk se již nedá tlumit, a proto je důležité dbát na splnění nejen funkčních podmínek, ale také akustických. Koncovými elementy se velice často reguluje dopravované množství vzduchu, což je nevhodná metoda z hlediska tvorby hluku. Např. škrčením čelní vyústkou z plně otevřené na 25 % průtoku se zvýší hluk přibližně o 25 dB. Pro jednodušší měření zde využíváme hladinu akustického výkonu s váhovým filtrem A. [6] [28]

3.4.3 HLUK VZNIKAJÍCÍ V KOLENECH, ODBOČKÁCH A OBLOUČÍCH

Oblouky, které mají $r > 3 \times d$, nevykazují zvýšení hluku oproti rovnému vzduchovodu. Za pravouhlými koleny s ostrou vnitřní hranou se tvoří turbulentní proudění vlivem úplavu, které jsou tvořeny odtržením proudnice od stěny. Kolena s rostoucím zaoblením se stávají přijatelnějšími z hlediska aerodynamického hluku a vykazují menší tlakové ztráty. Pro snížení

tlakových ztrát se do pravouhých kolen v případě technické nutnosti instalují vodící klapky. [6]

3.4.4 HLUK VZNIKAJÍCÍ V KLAPKÁCH

Klapky mohou být jednoduché nebo vícelisté a hlavní důvod jejich výskytu ve vzduchotechnickém potrubí je zvýšení tlakové ztráty, která vede k regulování průtoku vzduchu. Za klapkami jsou tvořeny vířivé proudy neboli turbulentní proudění, z čehož vzniká aerodynamický hluk. Stejně jako u vyústek je za klapkami tvořen hluk s vysokou frekvencí. [6] [28]

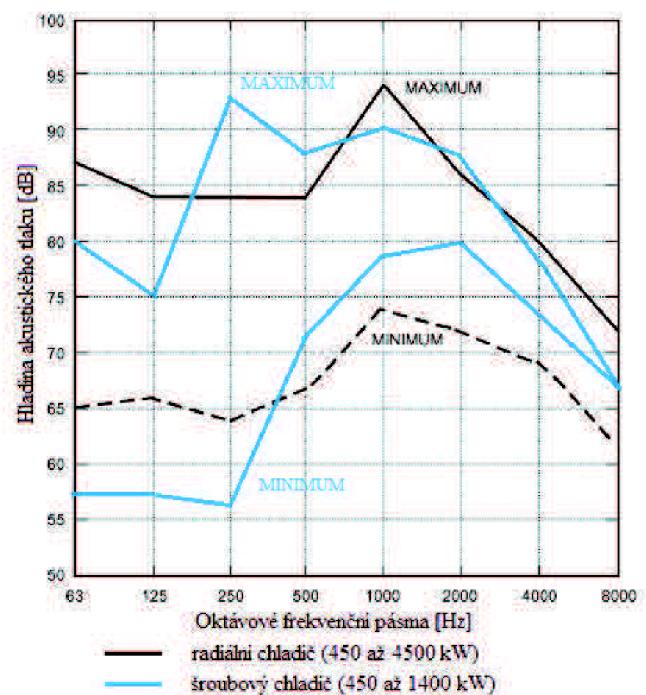
3.5 ZDROJE CHLADU

Chladiče a vzduchem chlazené kondenzátory mají komponenty, jako jsou kompresory, motory, převody a ventilátory, které mohou produkovat významné množství širokopásmového i tónového hluku. Širokopásmový hluk bývá obvykle způsoben tokem chladiva, vody nebo vzduchu, zatímco tónový hluk vzniká rotací součástí v převodovkách, motorech, kompresorech a ventilátorech (ve ventilačně chladičím zařízení). Hluk chladičů a kondenzátorů je významný v oblasti oktávních pásem od 63 Hz do 4000 Hz a záleží především na typu použitého kompresoru. [37]

Chladiče chlazené vzduchem tvoří hluk důsledkem turbulentního proudění vzduchu na kondenzačním ventilátoru a kompresoru. Další problém je stejně jako u klasických ventilátorů v šíření vibrací do konstrukce budovy. [28]

Absorpční chladiče samy produkují relativně málo hluku, ale průtok páry v příslušných čerpadlech a ventilech způsobuje významný vysokofrekvenční hluk. [37]

U vnitřních, vodou chlazených chladičů je dominantním zdrojem hluku kompresor. Průměrné hodnoty akustického tlaku jsou v blízkosti chladiče citlivé na kapacitu chladičí jednotky. Např. se zvýšením kapacity na desetinásobek stoupne hladina akustického tlaku o 2–3 dB. I když se fyzické rozměry chladičů liší, hladiny akustického tlaku mohou být srovnatelné. [37]



Obr. 15 Maxima a minima L_p vybraných chladičů, upraveno z [28]

4 SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ U VZDUCHOTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ

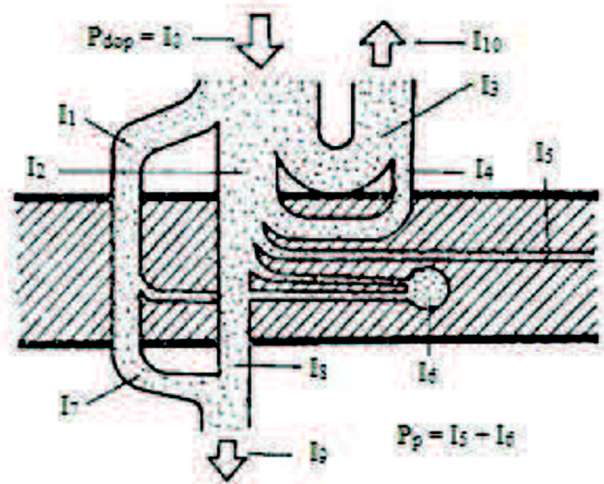
4.1 MECHANISMUS POHLCOVÁNÍ ZVUKU

Pohlcování zvuku je fyzikální jev, při kterém dochází k přeměně akustické energie v energii jinou, nejčastěji tepelnou. Podle použití rozdělujeme pohltivé látky na dvě skupiny. Jednou z nich jsou látky a konstrukce pohlcující zvukové vlny dopadající na jejich povrch. V této skupině je nevýznamné pronikání energie látkou a její šíření do dalšího prostoru. Ve druhé skupině jsou látky a konstrukce zvukoizolační. Je důležité znát jejich útlum při šíření danou látkou nebo konstrukcí. [3] [4] [32]

Při dopadání zvukové vlny na povrch stěny se akustický výkon rozdělí na několik částí, které jsou nejlépe vyjádřeny na obr. 9. Činitelem zvukové pohltivosti α vyjadřujeme pohltivé vlastnosti materiálu podle vztahu: [4]

$$\alpha = \frac{P_p}{P_{dop}} \quad (13)$$

- I_0 - dopadající zvuk
- I_1 – zvuk procházející póry stěny
- I_2 – zvuk procházející stěnou
- I_3 – odražený zvuk
- I_4 – zvuk vyzářený stěnou zpět
- I_5 – zvuk šířící se stěnou
- I_6 – zvuk ztracený změnou v teplo
- I_7 – zvuk prošlý póry stěny
- I_8 – zvuk vyzářený chvěním stěny
- I_9 – celkový prošlý zvuk
- I_{10} – vrácený zvuk



Obr. 16 Rozdělení akustického výkonu, upraveno z [29]

Pro zvýšení zvukové pohltivosti jsou používány speciální absorpční, pórovité a vláknité materiály. [4]

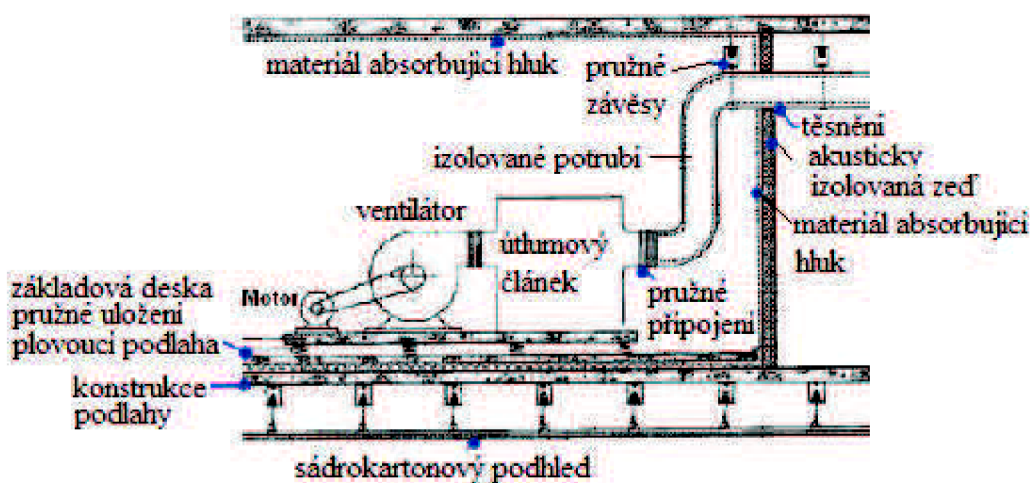
4.2 NEPRŮZVUČNOST KONSTRUKCE

Neprůzvučnost konstrukce je schopnost stěny snížit procházející zvukovou energii. Neprůzvučné konstrukce bývají z těžkého, tvrdého a hladkého materiálu a odrážejí zvukovou energii zpět do uzavřeného prostoru. Veškeré zvukové izolace mají vysokou neprůzvučnost. [3]

4.3 STROJOVNA VZDUCHOTECHNIKY

Vhodné umístění vzduchotechnické místnosti je nejlepší protihlukové opatření a je velice důležité ho řešit již při návrhu celého objektu. Strojovna by neměla být umístěna

vedle nebo příliš blízko akusticky chráněných místností nebo na střeše nad nimi. Přílehlé prostory jako jsou chodby, šatny, skladovací prostory a jiné místnosti, kde není nutnost úplného odhlučnění, mohou poskytovat účinnou ochranu před šířením hluku do chráněných místností. Častou chybou při umístění strojovny vzduchotechniky je umístit ji do jádra budovy mezi schodiště, výtahovou šachtu a místnost s telekomunikační skříní, protože jen jedna zeď je volná pro sání a výtlak vzduchovodu. Tím se zvyšuje rychlost proudění vzduchu a ventilátory musejí překonávat větší statický tlak, což vede ke zvýšení hlučnosti. Velice často jsou strojovny umísťovány do suterénů, kde většinou nehrozí, že by vedle byly chráněné místnosti. Zdi, podlahy a dveře musí být kvalitně odhlučněny a odizolovány, aby se hluk a vibrace nešířily konstrukcí nebo vzduchem dále po budově. Proto se používají pohltivé materiály. [28] [37]



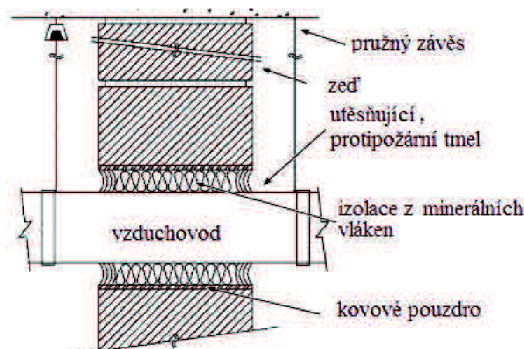
Obr. 17 Izolace strojovny vzduchotechniky, upraveno z [28]

Zdi vzduchotechnické místnosti bývají kvůli vysokým požadavkům na snížení hluku postaveny ze sádkartonu na kovových nebo dřevěných čepch. Je-li potřeba tlumení nízkofrekvenčního hluku, musí být zajištěna dostatečná tloušťka a masivnost konstrukce. To většinou vyžaduje více vrstev sádkartonových desek na obou stranách zdi a v dutinách vyplň v podobě plstěné izolace. [28] [37]

Dveře by měly být co nejmasivnější, utěsněné po celém obvodu, bez otvorů a samouzavírací. [37] [40]

Potrubí a jiné otvory musí být utěsněny izolací z minerálních vláken viz obr. 17. Na vzduchovody a stroje jsou nanášeny antivibrační nátěry z důvodu zabránění přenosu vibrací do okolních prostorů. [28] [37]

Poloha tlumiče je velice podstatná pro jeho efektivnost. Tlumiče hluku by se zásadně neměly umísťovat do strojoven vzduchotechniky, ale těsně za ně. Varianta umístění tlumiče v přechodu zdi není špatná, ale je nepraktická. [28]



Obr. 18 Izolace potrubí, upraveno z [37]

4.4 TLUMENÍ HLUKU A VIBRACÍ U VENTILÁTORŮ

Hluk od ventilátorů je ovlivněn volbou typu ventilátoru, jeho konstrukčním provedením, technickými parametry nebo návržením celého vzduchotechnického systému. Dále záleží na rychlosti proudění, průtoku vzduchu a tlaku. [28] [32]

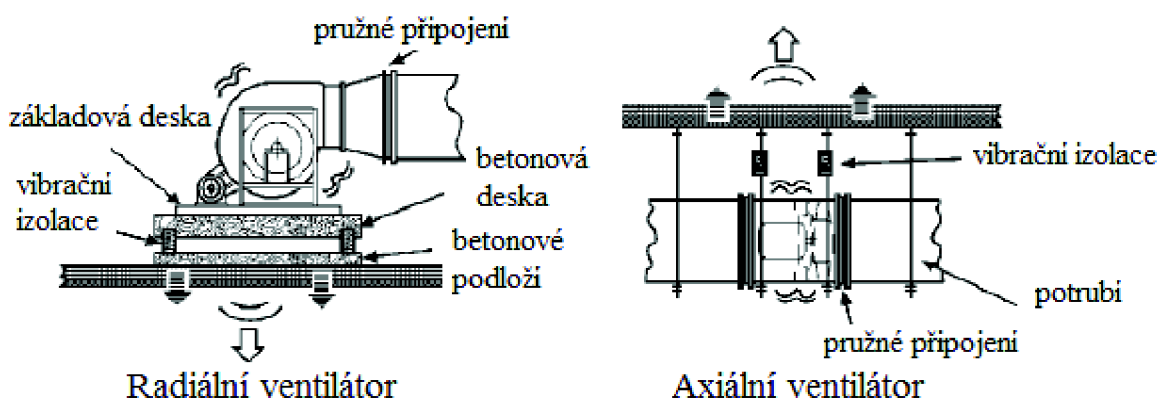
4.4.1 SNIŽOVÁNÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ, TLAKU, OTÁČEK A PRŮTOKU VZDUCHU

Primárním kritériem pro návrh ventilátoru nejsou akustické charakteristiky, ale schopnost dopravy požadovaného množství vzduchu při požadovaném tlaku. Návrh ventilátoru by měl být směřován na co nejmenší hodnotu celkového tlaku. Klesne-li celkový tlak např. o 30 %, sníží se obvodová rychlost u o 17 % a hladina akustického výkonu klesne přibližně o 5 dB. Při snížení rychlosti na 50 % klesne hladina akustického tlaku o 15–18 dB. Snížení obvodové rychlosti je přímo úměrné se snížením otáček, což vede k poklesu aerodynamického i mechanického hluku. Pokud snížíme průtok vzduchu o polovinu, sníží se hladina hluku přibližně o 3 dB. [28] [32]

Velké snížení rychlosti nemusí být vždy optimální. Rozměrnější ventilátory sice pracují s nižšími otáčkami hřídele, ale produkují hluk nacházející se v nižším oktávovém pásmu (63, 125 a 250 Hz). Hluk nižších frekvencí je náročnější odstranit. [28]

4.4.2 PRUŽNÉ ULOŽENÍ VENTILÁTORU

Chvění od strojů je velice nepříjemné. Patří do nízkofrekvenční oblasti a můžeme mu předejít vhodným návrhem pružné izolace. Izolace proti chvění je definována jako vložení poměrně pružného prvku mezi těleso a konstrukci. V technice prostředí se vyskytují dva druhy izolace chvění. Aktivní, což je snaha zabránit přenosu vibrací od stroje na jeho základ. Druhým je pasivní metoda, která usiluje o omezení šíření chvění ze základu do samotného stroje na něm namontovaném. [6] [28] [39]



Obr. 19 Pružné uložení axiálního a radiálního ventilátoru, upraveno z [28]

Kromě omezení šíření chvění do konstrukce budovy je také velice důležité zamezit šíření vibrací do potrubní sítě. Toho se docílí instalací pružného připojení (dilatační vložky) mezi potrubí a ventilátor. [28] [37]

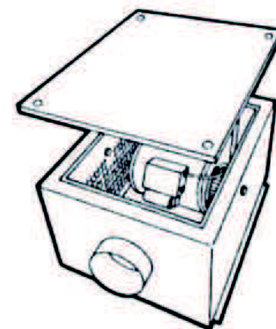
V minulosti se stroje ukládaly pomocí korku, který má nevýhody v nasákavosti, opotřebení a nefunguje při nižších frekvencích než je 40 Hz. V současné době se používají

ocelové nebo pryžové pružiny. Výhodou ocelových pružin je dosažení libovolných tuhostí a velice malé vnitřní tlumení. Nevýhodou je snadné přenášení vysokých zvukových frekvencí. Nevýhodou pryžových pružin je jejich malá odolnost proti chemikáliím, slunečnímu svitu a olejům. Proto je výhodné kombinovat ocelové pružiny s pryžovými vložkami. [3] [6] [43]

Jedním z nepoužívanějších pružných uložení je ukládání na silentbloky. Jsou to pryžokovové antivibrační prvky určené k hlukové izolaci, aktivní i pasivní izolaci kmitů, tlumení nárazů, přenosu sil, ochrannému uložení apod. [53]

4.4.3 IZOLACE VENTILÁTORŮ POMOCÍ KRYTŮ

Protihlukový kryt bývá poslední konstrukční úprava pro snížení hluku stroje. Kryt musí být navrhován tak, aby měl vysokou neprůzvučnost v souladu s konstrukčním provedením a ekonomickou stránkou věci. Konstrukční provedení krytu musí brát ohled na kvalitní provoz a údržbu stroje. Většina krytů je lehce demontovatelných. Velké kryty mají paradoxně lepší neprůzvučnost než malé. Útlum krytu je nazýván jako vložený útlum a je to rozdíl hladin akustického výkonu stroje s krytem a bez něj. O kvalitě krytu rozhodují různé větrací otvory a spáry, které mají špatné zvukoizolační vlastnosti. Štěrbiny a spáry jsou dotěsněny pomocí tmelů a na otvory jsou nasazovány vybrané tlumiče hluku. Používá se široká škála absorpčních materiálů a typů krytů. Nákladnějším, ale kvalitním je zdvojený kryt s pohltivým materiálem na vnitřní straně. [3] [32] [40]



Obr. 20 Zvukoizolační kryt [44]

4.4.4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ RADIÁLNÍHO VENTILÁTORU

Omezení sirénového hluku můžeme dosáhnout zvětšením mezery mezi oběžným kolem a spirální skříní. Mezera mezi vnějším průměrem oběžného kola a tzv. jazykem je doporučována minimálně $0,1 \times D$. Umožňuje vyrovnání rychlostního profilu za obvodem oběžného kola. V porovnání s malou mezerou klesne hladina akustického výkonu až o 15 dB. Nevýhodou je mírné snížení účinnosti a výkonu, které bývá přibližně 2–5 %. [32] [34]

Další konstrukční úprava snižující hluk spočívá v úpravě tvaru jazyka pomocí různých zešikmení. To nesmí být přehnaně velké a musí být ve vhodném poměru k rozteči lopatek a vlnové délce. [32] [34]

4.4.5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ AXIÁLNÍHO VENTILÁTORU

Pro dosažení co nejmenšího aerodynamického hluku v axiálním ventilátoru je z hlediska omezení sirénového hluku velmi důležité navržení vhodného nábojového poměru v . Dosažením optimálního nábojového poměru se z praktického hlediska výrazně sníží hladina akustického tlaku. Má to i své nevýhody, které se projevují zvětšenými rozměry ventilátoru, poklesem účinností a výkonem. [38]

Úplavy za lopatkami je možné omezit např. nastavením vhodné vzdálenosti mezi statorovými a rotorovými lopatkami. Zešikmením náběžné hrany oběžných lopatek proti výstupní hraně rotorových lopatek se projevuje podstatným snížením hladiny akustického tlaku, které může být až do 10 dB. [32] [38]

Sirénový hluk lze omezit vhodným poměrem počtu rotorových z_R a statorových z_S lopatek. Za ideální poměry jsou považovány $z_R : z_S = 2 : 3$ nebo $z_R : z_S = 3 : 4$. [32]

4.5 SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ VE VZDUCHOVODECH

Snižování hluku ve vzduchovodech je rozdělováno na umělý a přirozený útlum. Pro umělé snížení hluku se do potrubí instalují různé tlumiče hluku nebo se potrubí obkládá pohltivými materiály. Vzhledem k eliminaci vibrací je nezbytné kvalitní pružné uložení potrubí. Další velice důležité hledisko pro snižování hluku je vhodné navrzení vzduchotechnických elementů v potrubní síti. Útlum v potrubní síti je definován jako rozdíl akustického výkonu na vstupu a výstupu a je vyjádřen v dB. Hluk se v potrubí šíří v přírodním i odvodním potrubí a nezáleží na směru proudu vzduchu. [33]

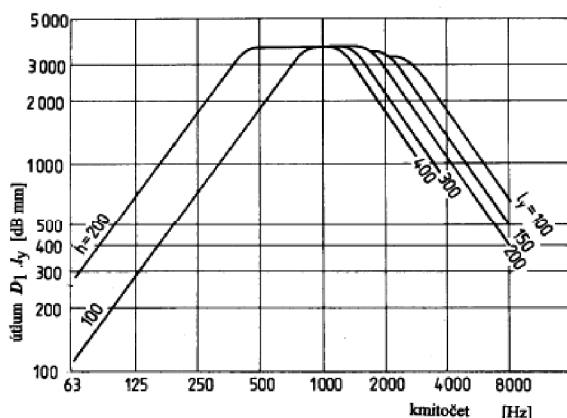
4.5.1 ABSORPČNÍ TLUMIČE V POTRUBÍ

Ve vzduchotechnice se používají širokopásmové absorpční tlumiče. Tyto vzduchotechnické prvky jsou v podstatě podobné jako přímé vzduchovody, které mívají větší průřez a jsou obloženy pohltivými materiály. Pohltivý materiál je v tlumiči uspořádán tak, aby zvuková energie přišla do styku s daným materiálem na maximální možné ploše. Při návrhu tlumiče je nutné brát zřetel nejenom na útlum, ale i na jeho rozměry a tlakovou ztrátu. Optimální rychlost v tlumiči se podle zkušeností z praxe pohybuje okolo 4–6 m/s. Tlumič hluku je překážkou v proudění vzduchu a při nadměrné rychlosti proudění může být sám zdrojem hluku. Vlastní hluk tlumiče určuje minimální hladinu akustického tlaku, která může být naměřena za tlumičem. [13] [34] [40] [49]

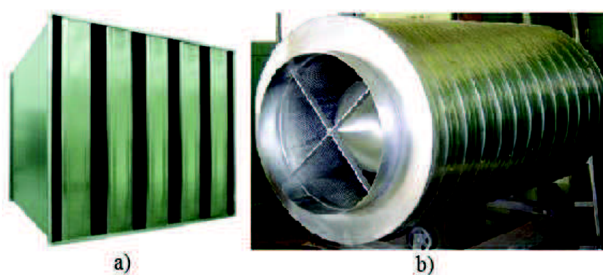
Rozdělení tlumičů dle konstrukce:

Kulisové tlumiče (vlozkové) – do potrubí jsou vkládány vložky (kulisy), které snižují hluk v oblasti vysokých kmitočtů v závislosti na vzdálenosti mezi kulisami. V oblasti nízkých kmitočtů je součinitel pohltivosti závislý na tloušťce h jednotlivých kulis. Doporučená tloušťka je: [13] [34]

$$h = \frac{1}{10\lambda_{max}} \quad (14)$$



Obr. 21 Útlum zvuku v kulisovém tlumiči [6]



Obr. 22 Kulisový tlumič a) čtverhranný, b) kruhový, upraveno z [30] [42]

Buňkové tlumiče – jsou sestavené z buněk, jejichž obsahem je pohltivý materiál krytý netkanou textilií. Výhodou oproti kulisovému tlumiči je příznivější útlum v nižších frekvencích, který je dán vlivem akustického sčítání dvou sousedících buněk. Jsou cenově nejdostupnější. [13] [30]

Kruhové tlumiče – pohltivý materiál je rozložen po stěnách potrubí a vnitřní průměr je chráněn děrovaným plechem. Tlumiče přesahující průměr 500 mm jsou opatřeny vnitřním jádrem se stejným složením jako materiál a plech na stěnách. [13]

Ohebné kruhové tlumiče – běžné ohebné potrubí se zdvojeným pláštěm, mezi kterými je absorpční materiál. Chránící vnitřní průměr je děrovaný plech. Používá se pro připojení koncových prvků a rozvodů od menších ventilátorů. [13]

4.5.2 PŘIROZENÝ ÚTLUM V POTRUBÍ

Útlum v přímém potrubí – hluk šířící se potrubím rozkmitá stěny, skrz které je vyzařována akustická energie a tím vzniká útlum v potrubí. Útlum se pohybuje pouze v desetínách dB/m a proto je podstatný pouze u rozsáhlé potrubní sítě. [6] [34]

Útlum v kolenech a obloucích – útlum v kolenech a obloucích je způsobený reflexí. Tyto vzduchotechnické elementy působí jako akustická diskontinuita. Vlivem odražené energie zpět ke zdroji dochází v koleně k většímu útlumu než v oblouku. Kolena a oblouky mohou mít v sobě zabudovány vodící plechy, s kterými dochází k menšímu útlumu než bez nich. Nastává zde malý útlum v nízkých frekvencích. [6] [34]

Útlum při rozšíření potrubí – v místě náhlého rozšíření dochází k odražení akustické energie nazpět ke zdroji, z čehož vzniká částečné stojaté vlnění. V rozšířené části vzduchovodu klesá hladina akustického výkonu. Důležité je, že rozšíření na rozdíl od kolen tlumí více nízkofrekvenční akustické vlny než vysokofrekvenční. [6] [34]

Útlum v rozbočkách – útlum v rozbočkách je dvojího typu a je potřeba zahrnout oba faktory. Jeden je útlum změnou směru (reflexí) a druhý je rozdělení energie v poměru k průřezu jednotlivých větví. [6] [34]

Útlum koncovým odrazem – je obdoba útlumu rozšířením potrubí a dochází zde k odrazu akustické energie zpět ke zdroji. [6] [34]

4.5.3 ULOŽENÍ VZDUCHOVODU

Vibrace stěn vzduchovodů přecházejí přes závěsy a uložení potrubí do stavebních konstrukcí (stěny, stropy) a nepříznivě se šíří po budově. Aby se zamezilo šíření těchto nízkých frekvencí, používají se k připevnění potrubí flexibilní držáky a závěsy s akustickou izolací.

[28] [35]

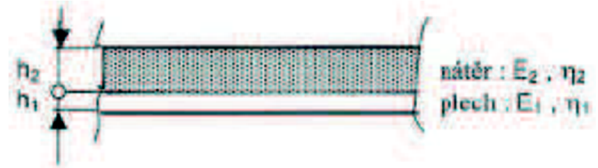


Obr. 23 Příklady antivibračních závěsů, upraveno z [35] [36]

4.5.4 ANTIVIBRAČNÍ NÁTĚR

Antivibrační nátěry jsou pasivní metodou tlumení vibrací. Jsou vyráběny z různých druhů umělých hmot a používají se k tlumení chvění tenkých plechů a desek do tloušťky

3 mm. Nátěry mají různé hodnoty mechanických impedancí oproti tradičním materiálům a jejich činitelé vnitřního tlumení bývají dost vysoké. Činitel vnitřního tlumení pro jednovrstvý nátěr lze vypočítat ze vztahu: [31]



Obr. 24 Antivibrační nátěr [31]

$$\eta = \eta_2 \frac{E_2}{E_1} g \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (14)$$

Optimální tloušťka nátěru tenkých plechů je přibližně v poměru $(h_2/h_1) = 4-5$. Parametrem hodnotícím kvalitu nátěru je součinitel $\eta_2 \times E_2$. Je možné použít i dvouvrstvé nátěry a je vhodné kombinovat antivibrační vlastnosti s antikorozními. [3] [31] [32]

4.5.5 SNIŽENÍ HLUKU KONCOVÝCH PRVKŮ

Koncové prvky by měly být navrhovány na splnění požadovaných hlukových kritérií, splnění celkové pohody prostředí a vhodnou estetiku, protože jsou většinou instalovány na viditelných místech. Estetická stránka věci by neměla škodit efektivitě prvku. Ve vzduchovodech, kde jsou těsně před koncovými elementy ostrá kolena, klapky nebo prudké přechody, vzniká turbulentní proudění a hluk generovaný zařízením může být podstatně vyšší než udává výrobce koncového prvku. Proto se projektanti snaží omezit navrhování těchto elementů těsně před vyústky. Natáčením mřížky vyústky, přivíráním anemostatů a jiným regulováním (přivíráním) koncových elementů usměrníme rychlost, průtok a směr, ale zároveň stoupá hluk. Další možnost snížení hluku od vyústek je snížit rychlost proudění vzduchu. U koncových elementů je velice podstatný jejich tvar. Pro dosažení co nejmenšího hluku musejí mít vyústky aerodynamický tvar, aby proudícímu médiu příliš neprekážely v průchodu a zároveň, aby správně nasměrovaly proud vzduchu a splnily rychlost proudění. Hluk vytvořený vyústkou se již nedá snížit. [28] [37]

4.6 SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ U CHLADÍCÍCH ZAŘÍZENÍ

Pokud celková hladina akustického tlaku přesáhne hodnotu 100 dB, je nutné postavit akustickou zástěnu co nejbližší ke stroji, aby co nejvíce přerušovala cestu hluku do okolí. Jestliže jsou v okolí kladeny přísnější požadavky na hluk, je dobré postavit bariéru ze všech stran. [28]

Z důvodu tlumení vibrací jsou chladiče pružně připevněny jako jiné stroje, např. ventilátory. Jsou ukládány na pružiny, pryžové součásti, silentbloky a na plovoucí podlahy. [28]

U chladičů chlazených vodou docílíme snížení hluku poskytnutím akustické podložky



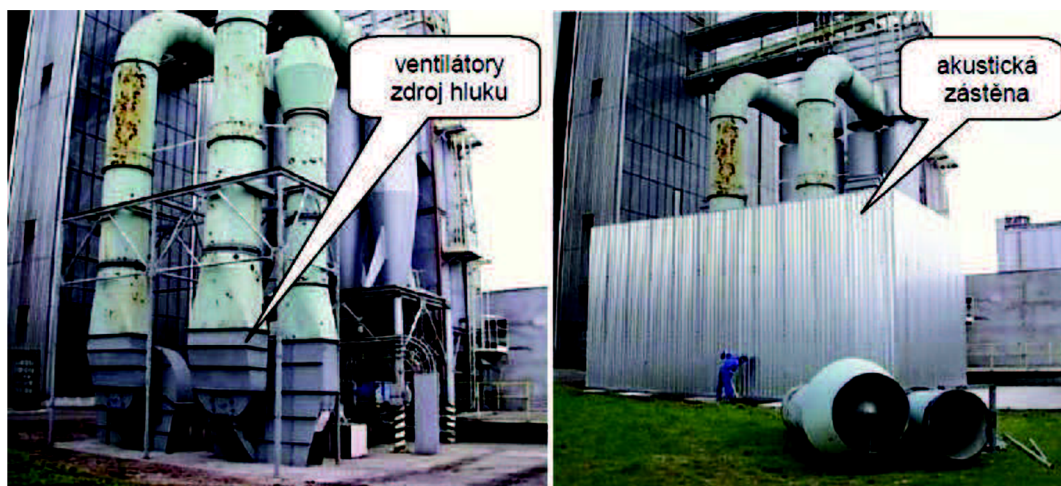
Obr. 25 Chladič chlazený vzduchem se zástěnou [46]

na vodní hladinu a tím snížíme hluk od rozstříkávání. Dalšího snížení můžeme docílit nainstalováním izolačního krytu na výstup výtlačného ventilátoru. [28]

Při nedostatku dopravního tlaku na ventilátorech chlazení je velice výhodné používat přímé stínění výtlačku zástěnou (tzv. výtlačnou kaskádou). [45]

4.7 TLUMENÍ HLUKU AKUSTICKOU ZÁSTĚNOU

Akustické zástěny oddělují hlučný stroj od méně hlučných míst a tím sníží šíření přímých akustických vln do chráněného prostoru. Zástěny jsou opatřeny z vnitřní strany vložkou z pohltivého materiálu, který je zakryt děrovaným plechem. Z vnější strany je trapézový plech. Zástěny jsou určeny k použití ve vnitřních i venkovních prostorech. Ve vzduchotechnice se ve velké míře používají na střechách budovy. Útlum hluku je závislý na frekvenční charakteristice zdroje hluku, velikosti efektivního převýšení zástěny a obecně od její velikosti. Mezi zástěnou by měla být co nejmenší mezera. Hustota povrchu zástěny musí být minimálně 10 kg/m^2 . V ideálním případě by měla být šířka zástěny $5\times$ větší než její výška. [28] [40] [45]



Obr. 26 Akustická zástěna tlumící hluk ventilátorů [45]

5 NORMY A RELEVANTNÍ LITERATURA

5.1 SBÍRKA ZÁKONŮ Č. 272/2011

V České republice jsou požadavky na hluk a vibrace podrobně stanoveny nařízením vlády „o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.“ Toto nařízení z počátku definuje jednotlivé základní pojmy hluku a vibrací a poté určuje jejich hygienické limity na pracovištích, chráněných vnitřních prostorech a chráněných venkovních prostorech. Popisuje také postupy metod měření. [26]

Tab. 3 Korekce limitů hluku - Příloha 2, upraveno z [26]

Druh chráněného vnitřního prostoru	Doba pobytu	Korekce [dB]	Limit [dB/A] NV 272/2011
Nemocniční pokoje	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	0	40
	22.00 a 6.00 hodinou	-15	25
Lékařské ošetřovny, ordinace	po dobu používání	-5	35
Obytné místnosti	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	0	40
	22.00 a 6.00 hodinou	-10	30
Hotelové pokoje	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	+10	50
	22.00 a 6.00 hodinou	0	40
Přednáškové síně, učebny a pobytové místnosti škol, jeslí, mateřských škol a školských zařízení		+5	45

Tab. 4 Korekce vibrací - Příloha 5, upraveno z [26]

Druh chráněného vnitřního prostoru	Denní doba	Povaha vibrací			
		Přerušované a nepřerušované vibrace		Opakující se otřesy	
		Korekce			
		dB	(1)	dB	(1)
1. Operační sály	den	0	1	0	1
	noc	0	1	0	1
2. Obytné místnosti	den	6	2	24	16
	noc	3	1,41	3	1,41
3. Pokoje pro pacienty v sanatoriích a nemocnicích	den	6	2	24	16
	noc	3	1,41	3	1,41
4. Učebny a pobytové místnosti jeslí, mateřských škol a školských zařízení	den	6	2	24	16
	noc	3	1,41	3	1,41
5. Ostatní chráněné vnitřní prostory staveb	nepřetržitě	12	4	42	128

Nařízení obsahuje přílohy, které udávají nejvyšší přípustné hodnoty hladiny akustického tlaku A pro různé chráněné pracoviště a jiné prostory. Tab. 3 popisuje korekci limitů chráněných prostorů v určité době pobytu a tab. 4 je podobného rázu, avšak pro vibrace. [26]

Toto nařízení se nevztahuje na hlasové projevy lidí a zvířat, hluk běžného užívání bytu, hudební projevy a nechráněné místnosti. Nechráněné místnosti jsou sociální zařízení (např. záchody, koupelny, komory), skladovací a komunikační prostory, haly, archivy, šatny a vestibuly dopravních staveb. [26]

Návrh vzduchotechniky se řídí zákony a je nezbytné dodržet dané normy a maxima. Při nedodržení limitů hrozí postih v souladu s těmito nařízeními. [26]

5.2 SBÍRKA ZÁKONŮ Č. 21/2003

Sbírka zákonů č. 21/2003 je nařízení vlády, „*kterým se stanoví technické požadavky na osobní ochranné prostředky.*“ Osobní ochranné prostředky proti hluku jsou různé sluchátkové chrániče, špunty do uší apod. [27]

5.3 NORMA ČSN EN ISO 5135

Tato norma pojednává o akustických zkouškách koncových elementů a regulačních a uzavíracích součástí ve vzduchotechnice. Je to české znění evropské technické normy a nazývá se „*Akustika – Určení hladin akustického výkonu hluku koncových prvků, koncových jednotek a regulačních a uzavíracích součástí vzduchotechnických zařízení na základě měření v dozvukové místnosti.*“ Tato norma v úvodu popisuje definice, zkušební vybavení a postupy v akustice. V další části je rozebíráno umístění a provoz zkoušeného zařízení. Určuje umístění koncových prvků při hlukových zkouškách a dané zkoušky popisuje. V závěru je popsán postup měření a nezbytný obsah v protokolu. Norma je vhodná pro zařízení, které pracují v ustáleném stavu a jejich objem je menší než 2 % objemu dozvukové místnosti. [47]

5.4 NORMA ČSN 12 0017

Norma „*Metody měření a hodnocení hluku vzduchotechnických zařízení*“ popisuje druhy měření a charakteristiky vzduchotechnických zařízení. V prvních kapitolách představí akustické názvy a definice, měřené veličiny a všeobecně uvede zdroje hluku. Kapitola měřících přístrojů odkazuje na jiné relevantní normy, kterým musí přístroje vyhovovat. Další část je věnována metodám měření a požadavkům na správné měření. V kapitole členění vzduchotechnických výrobků je několik souborů, které vždy popíší, jaké vzduchotechnické prvky dále rozvádějí a poté uvedou určované veličiny a používané metody měření. Na závěr norma popisuje postupy, kterými jsou hodnoceny výsledky měření. [48]

5.5 NORMA ČSN ISO 7235

Česká verze evropské normy se jmenuje „*Akustika – Laboratorní měřicí postupy pro tlumiče hluku v potrubí a vzduchotechnické koncové jednotky – Vložený útlum, vlastní hluk a celková tlaková ztráta.*“ Tato norma určuje hladiny akustického tlaku vlastního hluku vlivem proudění vzduchu v tlumiči. Dále stanovuje vložený útlum tlumičů v potrubí a jejich celkovou tlakovou ztrátu. Určuje také přenosový útlum vzduchotechnických koncových jednotek. Podle této normy se měří veškeré tlumiče hluku a pasivní vzduchotechnická zařízení jako jsou např. kolena, rozbočky a koncové prvky. [49]

5.6 NORMA EN ISO 11546-1

Norma se jmenuje „*Akustika – Určování zvukové izolace krytů.*“ Stanovuje vložený útlum hluku u menších strojů. Neposuzuje jednotlivé krytové panely, ale kryt jako celek. Akustické kryty jsou instalovány za účelem snížení hladiny akustického výkonu nebo hladiny akustického tlaku. [50]

5.7 NORMA EN ISO 14163

Norma se jmenuje „*Akustika – Směrnice pro snižování hluku tlumiči.*“ Tato mezinárodní norma popisuje tlumiče hluku v různých odvětvích. Ze vzduchotechniky tu je pojednáno o tlumičích, které se používají pro tlumení přeslechů a redukci vlastního hluku v zařízeních pro větrání a klimatizaci. Dále tu je popsáno snížení nebo zabránění přenosu hluku ventilačními otvory z vnějšího prostředí s vysokou hlučností do místnosti a snižování hluku ventilátoru na sání a výtlaku. Podle této normy jsou za tlumiče považována zařízení, která snižují přenos zvuku otvorem nebo potrubím za předpokladu, že nebrání médiu jejím průchodem. Jsou tu uvedeny informace o tlumičích, základní názvy, definice a normativní odkazy. Norma obsahuje také informace o požadavcích na konstrukci tlumičů, měření tlumičů a rozděluje jejich typy a popisuje jejich vlastnosti. [54]

5.8 NORMA EN ISO 15667

Tato mezinárodní norma se nazývá „*Akustika – Směrnice pro snižování hluku kryty a kabinami.*“ Popisuje funkční a akustické požadavky krytů a kabin, které musí norma splnit. Pro tuto práci je důležitá část o krytech, kterými jsou odhlučňovány některé vzduchotechnické prvky, jako např. ventilátory, klimatizační jednotky, chladicí zařízení apod. [55]

ZÁVĚR

Bakalářská práce popisuje zdroje hluku a vibrací u vzduchotechnických zařízení a rozebírá možnosti jejich technického snižování. Z důvodu rozsáhlosti problematiky se práce zaměřuje jen na několik nejvýznamnějších zdrojů hluku a vibrací.

Začátek práce je věnován základním informacím o hluku a vibracích, aby i laik byl seznámen s danou problematikou. Dále tu je popsáno jakými účinky působí hluk na lidský organismus a při jakých hodnotách hladiny akustického tlaku A začíná být hluk obtěžující nebo přímo nebezpečný.

Další část práce mapuje zdroje akustické energie z hlediska jejich příčiny, směru a cesty šíření. Z práce vyplývá, že se ve vzduchotechnice jedná o hluk aerodynamického a mechanického původu. Ve vzduchotechnickém oboru je aerodynamický hluk dominantní. Vzniká vlivem turbulentního proudění, což je spojené s vysokou rychlostí proudění a s obtékáním těles. Mechanický hluk vyjadřuje kmitání těles a je způsobený např. nevyvážeností rotačních částí strojů, valivými ložisky, elektromotory, různými převody apod. Tento hluk se šíří ze stroje do konstrukcí budovy i na velké vzdálenosti v podobě vibrací a otřesů nebo je vyzařován přímo do prostoru a je nezbytné jeho tlumení. Po prostudování odborné literatury a pozorování vzduchotechniky v praxi jsem zjistil, že nejvýznamnějším zdrojem aerodynamického i mechanického hluku jsou ventilátory. Navíc jsou obsaženy snad ve všech systémech vzduchotechniky. Pokud uvažujeme stejný dopravní tlak axiálního i radiálního ventilátoru, bývá axiální zpravidla hlučnější. Při výběru ventilátoru jsou rozhodujícími parametry dopravované množství vzduchu a dopravní tlak, proto je při výběru ventilátoru faktor hluku často zanedbávaný. Dalším významným aerodynamickým zdrojem hluku je hluk od koncových elementů, na který je nutné myslet hlavně při jejich návrhu.

Snižování hluku a vibrací je nejdůležitější část práce a popisuje metody snižování hluku u vybraných zdrojů. Ve větších objektech, kde jsou kladeny přísnější požadavky na snižování hluku, bývají vzduchotechnická zařízení umístována do strojoven vzduchotechniky, které musí být vhodně situovány a kvalitně akusticky odizolovány. U ventilátorů dosáhneme největšího redukování hluku snížením otáček. Jednou z nutných metod snižování hluku je umístování absorpčních tlumičů do vzduchovodů. Významného snížení hluku je také dosaženo při použití akustických zástěn. V praxi jsou metody snižování hluku a vibrací kombinovány a je nutné dbát na splnění akustických kritérií se splněním ekonomických aspektů.

Poslední část bakalářské práce obsahuje výběr relevantních zákonů a norem a jejich stručný popis. Snažil jsem se, aby i čtenář bez znalostí zákonů a norem pochopil, jaký vztah mají k danému tématu, a dočetl se základní informace o jejich obsahu.

Největším přínosem této bakalářské práce pro čtenáře jsou informace o možnostech snižování hluku a vibrací ve vzduchotechnice. Kombinací vhodných metod lze výrazně snížit hluchnost vzduchotechnických zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAŠÍK, Antonín. *Hluk točivých elektrických strojů: vypracoval kolektiv pracovníků útvaru pro výzkum a laboratoře*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1964, 265 s.
- [2] SMETANA, Ctirad, et al. *Hluk a vibrace: Měření a hodnocení*. 1. Vydání. Praha 1: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [4] VAŇKOVÁ, Marie a kolektiv. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí část I*. 1.vyd. Brno: PC-DIR, spol. s.r.o., 1995. 140 s. ISBN 80-214-0695-X.
- [5] VAŇKOVÁ, Marie a kolektiv. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí část II*. 1.vyd. Brno: PC-DIR, spol. s.r.o., 1996. 161 s. ISBN 80-214-0818-9.
- [6] SZÉKYOVÁ, Marta, Karol FERSTL, Richard NOVÝ. *Větrání a klimatizace*. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2006. 359 s. ISBN 80-8076-037-3.
- [7] AZ KLIMA, [online]. [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.azklima.cz/cs/vyroba-produkty/air-com>
- [8] Zvuk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>
- [9] Zákeřnost hluku. *FYZMATIK: píše* [online]. 2009 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/959-zakernost-hluku.html>
- [10] Účinek hluku na lidský organismus. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006-2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/202-ucinek-hluku-na-lidsky-organismus>
- [11] *Analýza a rozbor audio formátů*. Praha, 2012. Dostupné z: http://is.bivs.cz/th/6500/bivs_b/Bakalarska_prace_sytsy.pdf. Bakalářská práce. Bankovní institut vysoká škola, Katedra matematiky, statistiky a informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Bohuslav Růžička, CS c.
- [12] Vliv hluku na zdraví. *Hluk & Emise* [online]. © 2007 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/vliv-hluku-na-zdravi/>
- [13] Akustika a protihluková opatření ve vzduchotechnice. *TZB-info* [online]. © 2001-2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/10319-akustika-a-protihlukova-opatreni-ve-vzduchotechnice>
- [14] KV-P2 1025x125 R3 vyústka průmyslová. *Vzduchotechnika* [online]. © 2010 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnika-eshop.cz/kvp2-1025x125-r3-vyustka-prumyslova-p-4676.html>
- [15] Přechodové spiro koleno. *Klimat* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://klimatshop.sk/cs/kruhove-potrubi/56-prechodove-spiro-koleno.html>
- [16] Rozbočky, redukce. *Krbové ventilátory* [online]. [2010] [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://www.krbove-ventilatory.cz/Rozbocka_redukce_vzduchoveho_rozvodu.html
- [17] Zpětná klapka. *Klimat* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://klimatshop.sk/cs/zpetne-klapky/54-zpetna-klapka.html>
- [18] *Obtěkání těles*. Praha, 2010. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/hydrroteplo/materialy/>



- [19] Ventilátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ventil%C3%A1tor>
- [20] Axiální ventilátor AVET 350H/340E. *Ventilátory KADLEC* [online]. © 2011 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.ventilatory-kadlec.cz/cs/menu/zobrazit/39-avet-350h-340e/>
- [21] Radiální ventilátory. *ATAS* [online]. © 2009-2013 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=31&lng=cz>
- [22] Přístrojové ventilátory. *VZDUCHOTECHNIKA VENTILÁTORŮ* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnika-ventilatory.cz/0,23,pristrojove-ventilatory.html>
- [23] Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 1. část. *TZB-info* [online]. © 2001-2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>
- [24] ME 458 Engineering Noise Control. *Penn State University* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/>
- [25] Ducts - Noise Generation. *The Engineering ToolBox* [online]. [2009] [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/ducts-noise-generation-d_1405.html
- [26] O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In: *Narizení vlády č. 272/2011 Sb.* 24.8.2011.
- [27] Technické požadavky na osobní ochranné prostředky. In: *Narizení vlády č. 21/2003 Sb.* 9.12.2002.
- [28] BHATIA, A. Overview of Noise Control and HVAC Acoustic in Buildings. *Vibrationdata* [online]. [2012] [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/m206content.pdf>
- [29] Nanovlákná v prostorové akustice I. *IMateriály* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://imaterialy.dumabyt.cz/Materialy/Nanovlakna-vprostorove-akustice-I.html>
- [30] Tlumiče hluku. *Greif-akustika, s.r.o.* [online]. Copyright © 2013 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.greif.cz/vyroby/tlumice-hluku.html?detail=1#sekce124>
- [31] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [32] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANSDORF a Milan ŠNĚDRLE. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. Praha: SNTL, 1970. ISBN 04-222-70.
- [33] RUBINOVÁ, Olga a Aleš RUBIN. *Klimatizace a větrání*. Brno: ERA, 2004. ISBN 80-86517-30-6.
- [34] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. 3. přepracované vyd. Praha: BOLIT, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [35] Hangers & Reinforcements. *Ductware* [online]. © 2012 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ductware.com.au/hangers.html>
- [36] Isolation Hangers. *SLAM PROOF* [online]. [2011] [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.slamproof.co.uk/Anti-Vibration-Mounts/Isolation-Hangers>
- [37] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. *ASHRAE HANDBOOK: HVAC Applications* [online]. © 2011 [cit. 2014-05-01]. ISBN 978-1-936504-07-7. Dostupné z: <http://www.ashrae.org>

- [38] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANSDORF a Jiří SEMOTÁN. *Zdravotní, fyzikální a technické problémy ochrany proti hluku: referáty z celostátní konference, kterou uspořádala sekce ZTV ČSVTS ve spolupráci s Akustickou komisí ČSAV v Liblicích v roce 1961*. Praha: Československá vědeckotechnická společnost, 1961, 179 s.
- [39] BERANEK, Leo Leroy, Milan BŘESKÝ, Jiří KAPLAN a Jiří WANKE. *Snižování hluku*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 740 s.
- [40] RANSDORF, Jiří. *Základní zásady pro snižování hluku*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 58 s.
- [41] *Základy techniky snižování hluku: [sborník statí]*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1986, 115 s.
- [42] Kulisové tlumiče pro všechny oblasti systémů klimatizace. *TROX technik* [online]. © 2013 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.trox.cz/cz/products/silencer/splitter_attenuators/index.html
- [43] NOVÝ, Richard a Miroslav KUČERA. *SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ*. Praha, 2009.
- [44] RUBINOVÁ, Olga. *Hluk ve vzduchotechnice, zpětné získávání tepla*. Brno, 2012.
- [45] Akustické zástěny. *Greif-akustika, s.r.o.* [online]. Copyright © 2013 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.greif.cz/vyroby/akusticke-zasteny.html?detail=1>
- [46] Air Cooled Chiller Noise Control. *ENoise Control* [online]. ©2003-2008 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.enoisecontrol.com/Air_Cooled_Chiller_Noise_Control_Case_Study.html
- [47] ČSN EN ISO 5135. *Akustika – Určení hladin akustického výkonu hluku koncových prvků, koncových jednotek a regulačních a uzavíracích součástí vzduchotechnických zařízení na základě měření v dozvukové místnosti*. 1999: Český normalizační institut, Praha.
- [48] ČSN 12 0017. *Metody měření a hodnocení hluku vzduchotechnických zařízení: Všeobecná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1991.
- [49] ČSN EN ISO 7235. *Akustika – Laboratorní měřicí postupy pro tlumiče hluku v potrubí a vzduchotechnické koncové jednotky - Vložený útlum, vlastní hluk a celková tlaková ztráta*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [50] ČSN EN ISO 11546-1. *Akustika – Určování zvukové izolace krytů: Část 1: Měření v laboratorních podmínkách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [51] Environmentální fyzika. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [2013] [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika
- [52] Fan noise reduction. *Industrial Noise & Vibration Centre* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.invc.co.uk/noise/noise-control/fan-noise-reduction/>
- [53] *Rubena: Dampers*. Praha, © 2006. Dostupné z: http://zbozi.arkov.cz/dl/496/Prehledny_katalog_vsech_typu_SILENTBLOKU.pdf.html
- [54] ČSN EN ISO 14163. *Akustika - Směrnice pro snižování hluku tlumiči*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [55] ČSN EN ISO 15667. *Akustika - Směrnice pro snižování hluku kryty a kabinami*. Praha: Český normalizační institut, 2001.



- [56] NOVÝ, Richard. *Ventilátory*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, 104 s. ISBN 978-80-01-03758-4.
- [57] ŠKORPÍK, Jiří. Větrné turbíny a ventilátory, *Transformační technologie*, 2011-06, [last updated 2014-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/vetrne-turbiny-a-ventilatory.html>.

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

- p – akustický tlak [Pa]
 p_0 – amplituda akustického tlaku [Pa]
 ω – úhlová frekvence, úhlový kmitočet [s^{-1}]
 τ – čas [s^{-1}]
 x – odlehlost [m]
 c – rychlost šíření akustické vlny [m/s]
 P – akustický výkon [W]
 S – plocha [m^2]
 v – rychlost kmitání částic [m/s]
 p_{ef} – efektivní akustický tlak [Pa]
 ρ – měrná hmotnost [kg/m^3]
 I – skutečná akustická intenzita [W/m^2]
 I_0 – prahová akustická intenzita $I_0 = 10^{-12}$ [W/m^2]
 L_p – hladina akustického tlaku [dB]
 L_w – hladina akustického výkonu [dB]
 L_I – hladina akustické intenzity [dB]
 a – okamžité zrychlení bodu [m/s^2]
 s – okamžitá výchylka bodu z rovnovážné polohy [m]
 s_0 – amplituda výchylky [m]
 φ – fáze [-]
 t – čas [s]
 L_{pA} – hladina akustického tlaku s váhovým filtrem A [dB]
 L_{pi} – hladina akustického tlaku v příslušném pásmu [dB]
 K_{Ai} – korekce závislá na středním kmitočtu v oktávovém (1/3 oktávovém pásmu) [dB]
 K – konstanta úměrnosti (záleží na druhu ventilátoru) [-]
 ρ_0 – hustota média [kg/m^3]
 c_0 – rychlost šíření zvuku v médiu [m/s]
 D – průměr oběžného kola [m]
 w – rychlost proudění vzduchu [m/s]
 S – průřez potrubí [m^2]
 α – činitel zvukové pohltivosti [-]
 c_l – absolutní rychlost [m/s]
 w_l – relativní rychlost [m/s]
 u – obvodová rychlost [m/s]
 v – nábojový poměr [-]
 α – činitel zvukové pohltivosti [-]
 P_p – pohlcený akustický výkon [W]
 P_{dop} – celkový dopadající akustický výkon [W]
 h – tloušťka kulisy [m]
 λ_{max} – maximální vlnová délka [m]
 η – činitel tlumení celé konstrukce [-]
 η_2 – činitel tlumení antivibračního nátěru [-]
 E_1 – modul pružnosti plechu [N/m^2]
 E_2 – modul pružnosti nátěru [N/m^2]
 $g(h_2/h_1)$ – funkce závislá na poměru tloušťek antivibračního nátěru a plechu
 z_R – počet rotorových lopatek [-]
 z_S – počet statorových lopatek [-]