



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FAKULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

METODY SNIŽOVÁNÍ HLUKU V KONSTRUKCI OSOBNÍCH VOZIDEL

NOISE REDUCTION METHODS IN AUTOMOTIVE DESIGN

BALAKÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR KUBICA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ALEŠ PROKOP

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Kubica

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:

Metody snižování hluku v konstrukci osobních vozidel

v anglickém jazyce:

Noise Reduction Methods in Automotive Design

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na přehled jednotlivých metod snižování hluku v konstrukci osobních vozidel.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je vypracování rešerše v oblasti metod snižování hluku v konstrukci osobních vozidel.

Práce musí obsahovat:

1. Současný přehled používaných způsobů snižování hluku v konstrukci osobních vozidel.
2. Rozdělení jednotlivých metod dle zvolených kritérií.
3. Porovnání jednotlivých metod dle účinnosti.

Seznam odborné literatury:

Seznam odborné literatury:

1) Elektronické zdroje: databáze ACM Digital Library, Kluwer – Journals, Knovel, Science Direct, SpringerLink

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Prokop

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 18.12.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvoření rešeršní studie týkající se metod snižování hluku v konstrukci osobních vozidel. V úvodu se práce zaměřuje na akustiku a vliv hluku na člověka. Dále se zaměřuje na způsob vytvoření hluku ve vozidle a jeho potlačení. V závěru práce zhodnocuje určité vybrané metody při potlačování hluku osobního vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

hluk, vibrace, osobní vozidlo

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is create a research study about noise reduction methods in automotive design. The introduction of this work deals with acoustic and the influence of noise on people. Furthermore it deals with ways of noise creation in a car and its suppression. In the end of this work there is a valorization of certain methods at noise suppression of a personal vehicle.

KEYWORDS

noise, vibration, personal vehicle



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBICA, P. Metody snižování hluku v konstrukci osobních vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 42 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Prokop.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Aleše Prokopa a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Petr Kubica



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Aleši Prokopovi za rady a připomínky při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Ing. Lukáši Hulovi za rady v oblasti techniky automobilů, panu RNDr. Otakaru Šindlerovi za připomínky v oblasti akustiky a všem, kteří mě při studiu a psaní této práce podporovali.



OBSAH

Úvod	9
1 Akustika	10
1.1 Hluk.....	11
1.1.1 Hladina hlasitosti.....	14
1.2 Vliv hluku na člověka	15
1.3 Příčiny hluku	17
1.3.1 Mechanický hluk	17
1.3.2 Aerodynamický hluk	17
2 Požadavky na odhlučnění automobilu.....	18
3 Zdroje hluku v osobních vozidlech.....	19
3.1 Zdroje hluku mechanického charakteru	19
3.2 Zdroje hluku aerodynamického charakteru	20
4 Potlačení hluku.....	22
4.1 Pasivní potlačení hluku	24
4.1.1 Materiály a typy izolátorů	32
4.2 Aktivní potlačení hluku	33
4.2.1 Princip aktivního potlačení hluku	33
4.2.2 Použití aktivního potlačení hluku v automobilu	34
5 Zhodnocení metod potlačení hluku automobilu	36
5.1 Motor.....	36
5.2 Karoserie	37
Závěr	38
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	42



ÚVOD

Hluk je původní jev na Zemi, který vzniká vlivem přírodních procesů či činností člověka a ostatní živé přírody. Přináší s sebou problémy spojené s negativními účinky na zdraví a psychiku člověka. Hluk patří k nepříjemným formám ovlivňování životního prostředí a člověk svou činností ho úmyslně či neúmyslně zvyšuje. Proto je nutné zavádět taková nejrůznější opatření, aby byl chráněn nejen člověk, ale i příroda od zbytečných rušivých elementů.

Člověk se od pradávna snažil dopravovat z místa A do místa B. Se zvyšující se sofistikovaností dopravních prostředků se zvětšovaly vzdálenosti, které těmito prostředky překonával. Jelikož je v dnešní době automobil jedním z nejdůležitějších dopravních prostředků je třeba mít na mysli, že v něm lidé tráví ne nepodstatnou část svého života. Při pravidelném užívání automobilu může produkováný nadměrný hluk ve vozidle způsobit posádce řadu zdravotních následků.

Vždyť i dělníci při práci u hlučných strojů v civilizovaných zemích nosí chrániče sluchu, a to především ze zdravotních důvodů. Při dlouhodobém cestování v dopravních prostředcích, ve kterých nejsou aplikovány materiály potlačující přenos hluku či technologie potlačující vibrace, dochází ke ztrátě komfortu cestování. U obsluhy strojů dochází ke snížení pracovní výkonnosti a v neposlední řadě i k ohrožení vzniku nebezpečných situací včetně trvalých zdravotních následků.

V případě, že by vozidla měla jen minimální prvky potlačující vibrace a hluk, musela by si posádka vozidla chránit svá sluchová ústrojí individuálním způsobem. Snížila by se tímto nejen přirozená hlasová komunikace mezi cestujícími, ale také mezi jednotlivými prvky v dopravě navzájem. Řidič by byl odkázán pouze na zrakové vnímání a výrazně by se tím snížila bezpečnost v dopravě, např. by neslyšel vozidla záchranného systému.

Tato závěrečná práce uvádí čtenáře do problematiky otázek vibrací a hluku, které se při provozu osobních vozidel vyskytují.



1 AKUSTIKA

Akustika je vědní obor, který se zabývá zvukem od jeho vzniku přes přenos prostorem až po vnímání lidskými smysly. Zvuk definujeme jako mechanické vlnění v plynech, kapalinách a pevných látkách, které vnímá lidské ucho a ten je pak zpracováván v mozku. Zvukový vjem je u člověka vyvolán v pásmu frekvencí od 16 Hz do 20 kHz. Každý člověk má odlišnou míru a intenzitu slyšitelnosti – ta je závislá na věku a prostředí osoby. Zvuky do 16 Hz a nad 20 kHz člověk neslyší, ale vnímá je. Tyto zvuky však mají negativní vliv na jeho zdraví a psychiku. Zvuky od 0,7 Hz do 16 Hz nazýváme infrazvuk (tyto zvuky člověk vnímá hmatem), oproti zvukům nad 20 kHz, které nazýváme ultrazvukem. [14]

Ze zdroje se zvuk šíří jen pružným látkovým prostředím libovolného skupenství. Nejčastěji je to vzduch, v němž se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění. Nejdůležitější charakteristikou prostředí z hlediska šíření zvuku je rychlost zvuku v daném prostředí. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na složení vzduchu (nečistoty, vlhkost), ale nejvíce na teplotě.

Ve vzduchu o teplotě t v Celsiových stupních má zvuk rychlost:

$$v_t = 331,82 + 0,61 \cdot t$$

Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem vzduchu a je stejná pro zvuková vlnění všech frekvencí. V kapalinách a v pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu (popř. jiných plynech). Přibližné hodnoty rychlosti zvuku jsou pro některé látky uvedeny v tabulce č. 1. [14]

Tabulka č. 1 Šíření zvuku v různých materiálech

LÁTKA	RYCHLOST ZVUKU [m/s]
Kaučuk	40
Vzduch (13,4 °C)	340
Korek	500
Voda (25°C)	1500
Bakelit	1590
PVC	2380
Led	3200
Ocel	5000
Hliník	5100
Sklo	5200

[13]



1.1 HLUK

Hluk je nedílnou součástí našeho života. Je součástí životního prostředí a působí negativně na živé organismy. Proto musíme chránit životní prostředí před nežádoucím hlukem. Hluk je jev pracovních procesů všech strojních zařízení – výrobních strojů, dopravních prostředků, různých domácích spotřebičů apod. Hluk nelze zcela vyloučit z pracovního a životního prostředí, lze jej pouze zredukovat na přijatelnou hodnotu. Hlukem je nazýván jakýkoliv nežádoucí, obtěžující a rušivý zvuk. Je obtížné ho jinak definovat, neboť záleží na vztahu člověka k danému zvuku. Pro někoho může být daný zvuk nepříjemný, ale pro jiného příjemným poslechem (např. hudba). [1]

Lidské ucho je schopno registrovat akustický tlak (zvuk) ve značně širokém rozsahu. Pro zdravého člověka je spodní hodnota (prahová hodnota slyšení) akustického tlaku při frekvenci 1000 Hz okolo $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Tato hodnota byla použita jako referenční hodnota, od které byly odvozovány referenční hodnoty dalších akustických veličin. Nejvyšší hodnota akustického tlaku, při které člověk začíná pociťovat bolest sluchového orgánu, je okolo 10^2 Pa (prahová hodnota bolesti). Poměr těchto dvou mezních hodnot je 1 : 5 000 000, což je značně velké rozmezí hodnot. Lidské ucho navíc nereaguje lineárně na zvukový podnět, ale jeho vnímání je úměrné logaritmu tohoto podnětu. Z těchto důvodů se začala používat logaritmická měřítka pro všechny akustické veličiny. [1] Takováto vyjádření akustických veličin se nazývají hladiny akustických veličin a jsou definovány vztahem:

$$L = \log \frac{A}{A_0} = \frac{\text{hodnota porovnávané veličiny}}{\text{hodnota referenční}} \quad (1)$$

Jednotkou hladiny je **bel** (podle Grahama Bella). Vzhledem ke značné šířce této veličiny se používá jednotka desetkrát menší, tedy **decibel [dB]**.

Hladiny jednotlivých akustických veličin jsou definovány:

a) Hladina akustického výkonu

$$L_W = 10 * \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}], \quad (2)$$

kde W je $[W]$ hodnocený akustický výkon.

Při referenční hodnotě

$$W_0 = 10^{-12} \text{ W, je} \quad (3)$$

$$L_W = 10 * \log W + 120 \quad [\text{dB}], \quad (4)$$

kde číslo 10 ve vztazích vyjadřuje převod $[B]$ na $[dB]$.



Jestliže je hladina akustického výkonu měřena v decibelech, pak lze akustický výkon vypočítat ze vztahu

[1]

$$W = W_0 * 10^{0,1L_w} \quad [W] \quad (5)$$

Pro některé akustické zdroje zvuku jsou uvedeny v tabulce č. 2 akustické výkony v lineární i decibelové stupnici:

Tabulka č. 2 Zdroje zvuku

$[W]$	$[dB]$	Zdroje zvuku
10^6	180	Velký raketový motor
10^5	170	Vojenský proudový letecký motor
10^4	160	Čtyřmotorový vrtulový letoun
10^3	150	75-ti členný orchestr, varhany
10^2	140	Malý letecký motor
10^1	130	Velká sbíječka
1	120	Klavír
10^{-1}	110	Automobil na dálnici
10^{-2}	100	Velký ventilátor
10^{-3}	90	Křičící člověk
10^{-4}	80	Domácí spotřebiče
10^{-5}	70	Běžně mluvící člověk
10^{-6}	60	Malý ventilátor
10^{-7}	50	Běžný pouliční hluk, televizor při běžné hlasitosti
10^{-8}	40	Malý šum v bytě, tlumený hovor
10^{-9}	30	Velmi tichý šepot

[1]

b) Hladina akustické intenzity
definice

$$L_I = 10 * \log \frac{I}{I_0} \quad [dB] \quad (6)$$

kde I [W/m^2] je měřená akustická intenzita

Při používané referenční hodnotě $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ je pak

$$L_I = 10 * \log I + 120 \quad [dB] \quad (7)$$

Je nutno připomenout, že nelze zaměňovat hladiny akustického výkonu zdroje (konstantní hodnota) a hladiny akustické intenzity (případně hladiny akustického tlaku), které závisí na vzdálenosti od zdroje.

c) Hladina akustického tlaku
je definována vztahem

$$L_p = 10 * \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 * \log \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (8)$$



a pro prahovou (referenční) hodnotu $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je

$$L_p = 20 \cdot \log p + 94 \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

kde p [Pa] je akustický tlak v daném bodě akustického prostoru.

Zde každému 10-ti násobnému zvýšení akustického tlaku se hladina akustického tlaku zvýší o 20 dB.

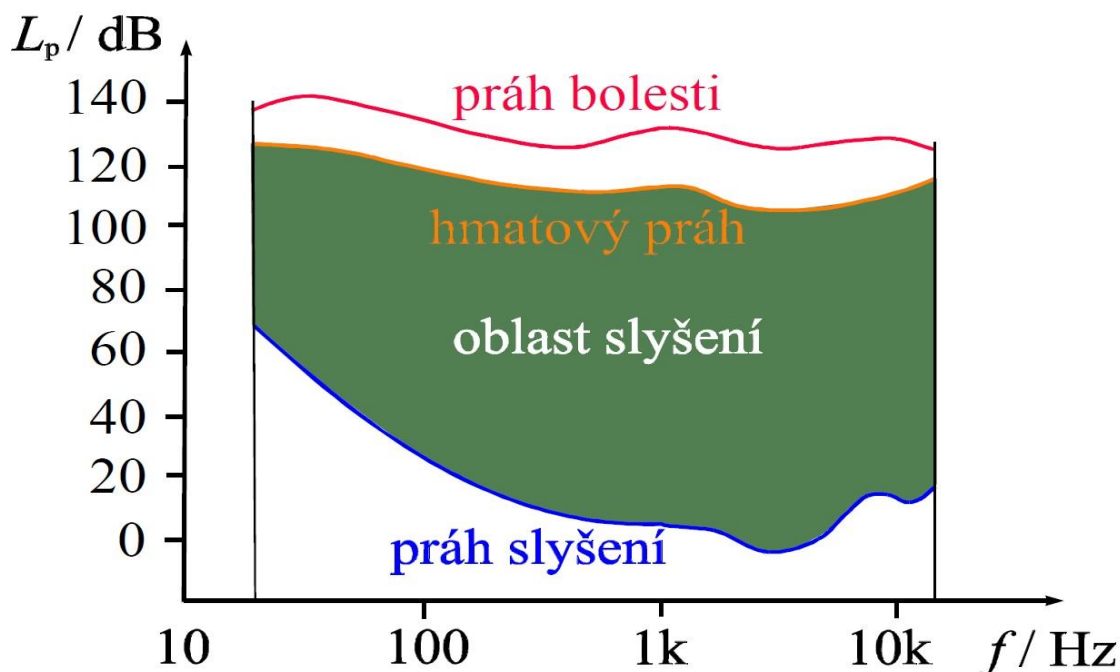
Jestliže známe hladinu akustického tlaku L_p [dB], lze vyhodnotit zpětně akustický tlak ze vztahu

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

d) Hladina hlasitosti L_N (Ph)

Zvuk má hladinu hlasitosti například 20 Ph, pokud zní stejně hlasitě, jako signál o kmitočtu 1 kHz, který vytvoří hladinu akustického tlaku 20 dB.

[1]



Obrázek 1 Hranice slyšitelnosti zvuku člověka [15]

Subjektivní vjem zvuku lidmi je závislý na mnoha činitelích. Jedním z nich je nestejná citlivost lidského sluchu na různé kmitočty.

Přesto je nutno jednoduše a jednočíselně charakterizovat hlukovou expozici lidí na pracovištích, v bytech, školách a jiných oblastech životního prostředí. Je proto nutno přiblížit měřené akustické veličiny vlastnostem lidského sluchu.

Této skutečnosti lze dosáhnout zavedením elektronických zvukoměrných zařízení, jejichž citlivost je podobná kmitočtové závislosti lidského ucha. Proto byly do měřících řetězců zvukoměrů zařazeny tzv. váhové filtry, respektující tento uvedený požadavek.

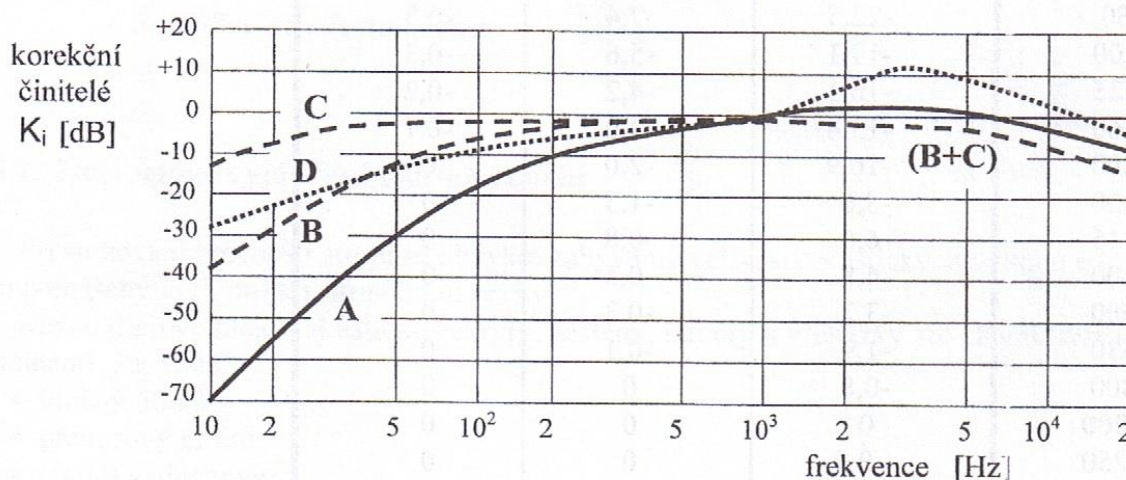
[1]



Používá se více typů váhových filtrů:

- **Váhový filtr A** – nahrazuje křivky stejné hlasitosti podobnými křivkami pro oblast akustického tlaku v nízkých hladinách. Tento filtr se používá nejčastěji, protože je nejbližší k vnímání hluku člověkem. Podle vyhlášky ČSN ISO 1996-1 (od prosince 1992) je hladina zvuku definována jako hladina akustického tlaku frekvenčně vážena filtrem A a je označena L_{pA} [dB].
- **Váhové filtry B a C** – nahrazují křivky stejné hlasitosti podobnými křivkami pro oblast akustického tlaku pro střední a vysoké hladiny
- **Lineární filtr** – data jsou bez úpravy

[1]



Obrázek 2 Útlumové charakteristiky kmitočtových filtrů [1]

1.1.1 HLADINA HLASITOSTI

Hladina hlasitosti pro tón frekvence 1 kHz je rovna hladině akustického tlaku, tedy:

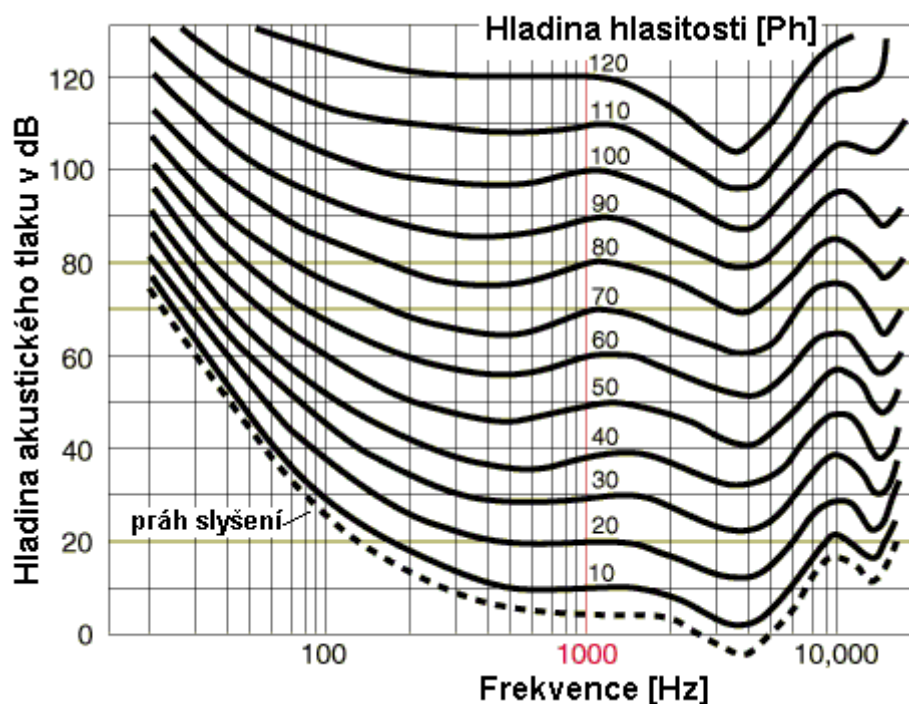
$$L_N = L_p \quad (11)$$

kde: L_N – hladina hlasitosti a L_p – hladina akustického tlaku

Referenční zvuk nazýváme zvuk o frekvenci 1 kHz splňující podmínku (11). Porovnáním s referenčním zvukem můžeme stanovit hladinu hlasitosti pro ostatní kmitočty. Otologicky (otologie – nauka o ušním lékařství) zdravý člověk musí zvuk o jiné frekvenci než 1 kHz slyšet stejně jako referenční hodnotu zvuku. Docílíme toho tak, že intenzitu zvuku při zkoumané frekvenci buď zesílíme, nebo zeslabíme podle citlivosti lidského sluchového orgánu. Poté dostaneme vyjádření vztahů mezi hladinou intenzity zvuku a hladinou hlasitosti. Tomuto grafickému vyjádření říkáme Barkhausenovy křivky



stejné hlasitosti (obr. 3). Hladina hlasitosti je konstantní podél Barkhausenovy křivky. Tyto křivky také znázorňují citlivost lidského sluchového orgánu. [15]



Obrázek 3 Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti [14]

1.2 VLIV HLUKU NA ČLOVĚKA

Stále zvyšující se hluk má negativní vliv na lidský organismus a způsobuje řadu zdravotních obtíží. V samotném začátku vývoje člověka mu sloužil sluch jako varovný signál, proto lidský organismus reaguje na hluk tím způsobem, že spouští celou řadu obranných mechanismů.

Dochází například ke:

- zvýšení krevního tlaku
- zrychlení tepu
- stažení periferních cév
- zvýšení hladiny adrenalinu
- ztrátám hořčíku

[5]

Hluk na člověka působí negativně a způsobuje mu řadu psychických potíží, jako je např. únava, deprese, rozmrzelost, agresivita, neochota, zhoršení paměti, ztráta pozornosti a celkové snížení výkonnosti.

Při dlouhodobém vystavení se hluku může pak u člověka dojít k poškození srdce včetně zvýšeného rizika infarktu, snížení imunity, chronické únavě, nespavosti

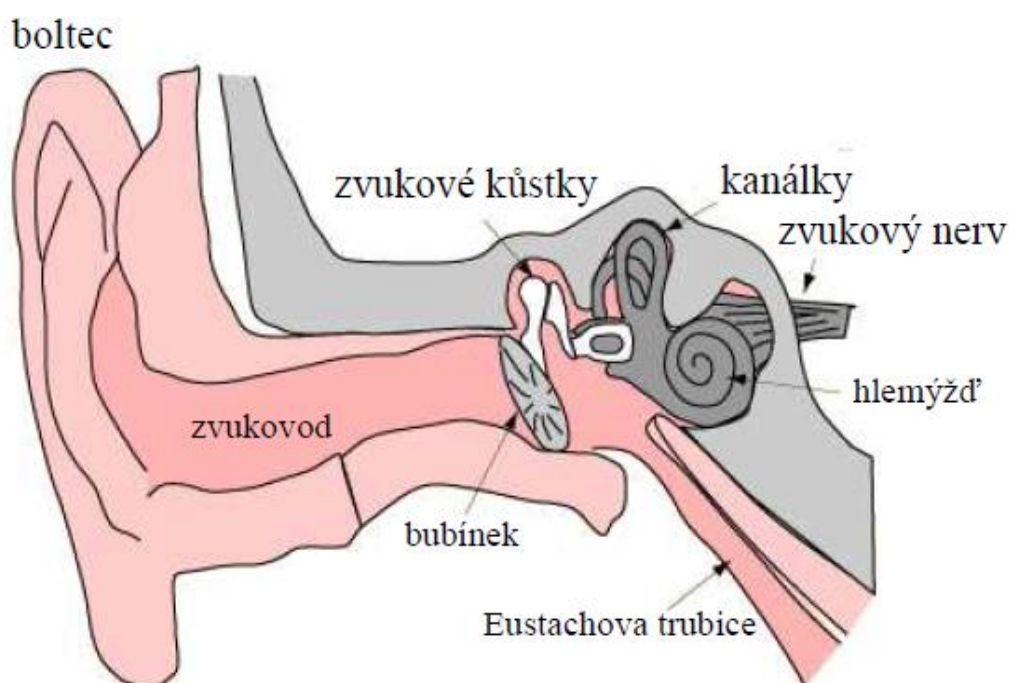


a vysokému krevnímu tlaku. Lékařské a statistické studie dokazují, že zvýšený počet civilizačních chorob je přímo úměrný s hluchostí daného prostředí.

Sluch funguje i při spánku a zvýšená hluchnost prostředí pak snižuje jeho kvalitu a hloubku. Dlouhodobě se to pak projevuje již zmíněnou trvalou únavou.

Pokud si sluch člověk dostatečně nechrání, může u něho dojít k jeho trvalému poškození. Toto může nastat buď při krátkodobém vystavení se hluku přesahující 130 dB, nebo častému a dlouhodobému vystavování se hluku nad 85 dB (poslech hlasité hudby).

K poškození sluchu může také dojít u lidí žijících u hlavních silnic, kde se hladina hluku pohybuje kolem 70 dB. Toto poškození může být nevratné. Za hlavní příčinu hlukové ztráty není již v současné době považováno stárnutí, ale hluková zátěž.



Obrázek 4 Vnitřní ucho člověka [15]

V zájmu každého jedince je chránit si svůj sluch před nadměrným hlukem. O snížení hlukové zátěže na únosnou míru je na základě zákona povinen starat se i stát – Zákon č. 258/2000, o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů (§ 30 – 34).

Hluk a lidé v číslech:

- až 40 % evropské populace je vystaveno hluku, který způsobuje škody na zdraví
- 100.000.000 obyvatel EU zasahuje hluk přes 65 dB



- škody způsobené hlukem v EU se odhadují na 13 až 28 miliard euro
 - v Praze je nadlimitním hlukem zasaženo přes 90.000 obyvatel, tedy 7,6 %
 - asi 200.000 obyvatel Berlína bydlí v částech, kde jsou překročeny limity hluku
 - v Dánsku je ročně hospitalizováno 800 – 2200 osob z důvodu nadměrného hluku z dopravy
- [5]

1.3 PRÍČINY HLUKU

Většina reálných akustických zdrojů vyzařuje akustickou energii do okolního prostředí. Hluk můžeme rozdělit dle vzniku do dvou kategorií: mechanický a aerodynamický.

1.3.1 MECHANICKÝ HLUK

Kmitající povrch tělesa způsobí akustický rozruch nejčastěji plynného prostředí a svoji mechanickou energii odevzdá akustickému prostředí. Akustická energie se pak prostřednictvím akustických vln dále šíří do celého akustického prostředí. Akustická energie souvisí s rozměry kmitajícího tělesa, tvarem jeho povrchu a stavem jeho kmitání (frekvencí, amplitudou). [1]

1.3.2 AERODYNAMICKÝ HLUK

Aerodynamický hluk je možno charakterizovat jako zvuk vznikající v důsledku působení proudu vzduchu na okolní obklopující prostředí. Příčinou vzniku hluku není kmitání povrchů těles, ale pohyb vzduchu, ve kterém dochází k prudké změně tlaku vzduchu při proudění např. kolem pevných překážek. Tento tlakový rozruch je pak příčinou vzniku tlakových, tedy akustických vln s jistým frekvenčním spektrem. Zvuk vyzařovaný do prostoru při proudění plynů a kapalin nebo obtékání těles je velice nežádoucím jevem. [1]

Jsou dva základní případy generace aerodynamického hluku:

- volná turbulence (např. výtok z trysky)
- turbulence při obtékání těles



Obrázek 5 Turbulence při obtékání těles [12]



2 POŽADAVKY NA ODHLUČNĚNÍ AUTOMOBILU

POŽADAVKY OD VEDENÍ SPOLEČNOSTI

Vedení společnosti dnes musí především dbát na ochranu zdraví a bezpečnosti práce svých zaměstnanců. Nadále musí splňovat kritéria v oblasti dobré protihlukové ochrany. Pro vedení společnosti je také důležitým faktorem cena výrobku.

Každé osobní vozidlo má jiné určení s odlišnou cenou. Asi nemůžeme očekávat od rodinného vozidla do 200 tis. Kč – sedan nižší třídy, že bude mít stejné odhlučnění jako vozidlo za 1,5 mil. Kč – luxusní sedan. U takto drahých automobilů pak výrobce dbá na kvalitní odhlučnění vozidla. U těchto automobilů se můžeme setkat jak s pasivním odhlučněním vozu (různé tlumící materiály), ale v dnešní době také s aktivním potlačením hluku. Dále pak zde máme vozidla ke sportovním účelům. Výrobce může jít dvěma cestami. První cesta je vyrobit sportovní vozidlo s dobrým odhlučněním interiéru (jsou to například vozy s označením GT – gran turismo), které jsou určeny pro majitele, kteří mají rádi rychlá, ale také tichá vozidla. Druhá cesta je vyrobit vozidlo, které nebude mít skoro žádné tlumící materiály kvůli hmotnosti vozu, ale proto může mít motor s menším výkonem (nižší emise CO₂) a mít srovnatelné zrychlení jako vozidlo, které je dobře utlumené od okolního hluku.

Vnitřní hluk v automobilu je spjatý s hlukem, který můžeme pozorovat vně vozidla. Automobil produkuje nežádoucí hluk, který je potřeba regulovat. Od roku 1970 existují normy pro výrobce automobilů v oblasti hluku vně vozidla. V tabulce č. 3 jsou uvedeny limitní hodnoty vnějšího hluku podle typu automobilu a roku od kdy tyto normy vešly v platnost.

Tabulka č. 3 Limity hluku vybraných silničních vozidel podle EHK 51 [6]

Motorové vozidlo	Limitní hodnota vnějšího hluku dB (A)				
	1970	1977	1994	2000	2007
Osobní	82	80	77	75	74
Nákladní nad 3,5 t, nad 75 kW	89	88	83	78	78
Nákladní nad 3,5 t nad 150 kW	91	88	84	80	80

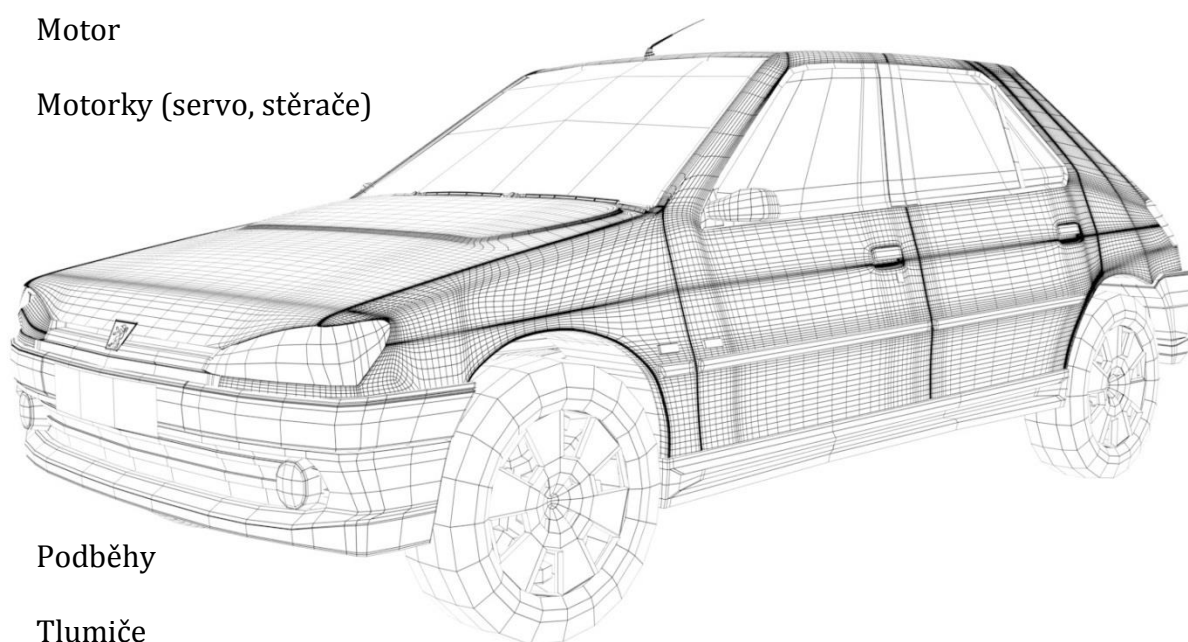


3 ZDROJE HLUKU V OSOBNÍCH VOZIDLECH

Zdroje hluku v automobilu rozdělujeme mezi dva základní parametry - mechanický a aerodynamický. Tyto nežádoucí zvuky můžeme v dnešní době dobře eliminovat. V případě mechanického charakteru se používají hlavně pasivní pohlcovače hluku (tlumící materiály, antivibrační podložky apod.). V případě aerodynamického charakteru je to otázka odporu vzduchu obtékajícího automobil. Dnes se u automobilů můžeme setkat také s aktivním potlačením nežádoucího hluku. Toto řešení pomáhá snížit hluk převážně při konstantní frekvenci zvuku.

3.1 ZDROJE HLUKU MECHANICKÉHO CHARAKTERU

Zdroje hluku mechanického charakteru jsou všechny zvuky, kromě vzduchu proudícího kolem auta. Při pomalé jízdě je hlavním zdrojem hluku motor. Mezi další zdroje patří podběhy, tlumiče a pneumatiky. Nesmíme ale zapomenout na výfukové potrubí, které snižuje hluk z motoru. Kdyby motor neměl efektivní výfukové potrubí potom by byla hladina hluku vycházející z výfukových kanálů až nesnesitelná.



Obrázek 6 Zdroje hluku automobilu [7]



Hluk z motoru převažuje při nižších rychlostech vozidel cca do 40 km/h u osobních automobilů a s rychlostí vozu se téměř nemění. Výrazně vyšší hlukové emise jsou u vozidel, která jsou poháněna dieslovým motorem. V každém případě jsou akustické emise závislé na okamžitých otáčkách motoru než na rychlosti vozu. Můžeme říci, že hluk od motoru (jak od zážehového motoru, tak od vznětového motoru) závisí na okamžitých otáčkách motoru. Při nízkých otáčkách jsou akustické emise nízké, naopak při vysokých otáčkách je hladina hluku vyšší. [3]

Hluk vznikající na povrchu vozovky je závislý na struktuře vozovky a vzorku pneumatik. V rozsahu cca 60 – 200 km/h (ve většině případů) je dominantní hluk valení, který vzniká interakcí nerovností na povrchu kola a vozovky. “Protihlukový” povrch vozovky může snížit hluk vznikající na vozovce až o polovinu oproti běžnému asfaltovému povrchu. Optimální snížení hluku je pak dosaženo použitím tichých pneumatik na protihlukové vozovce. Dvouvrstvý porézní povrch vozovky (může být vyroben z recyklovaných pneumatik) může dosáhnout snížení o 12 dB oproti běžnému povrchu. Efekt snížení hluku na tichém povrchu se projeví především na komunikaci, po níž jezdí vozidla rychlostí nad 50 km/h. Při nižších rychlostech převládá hluk motoru vozidla. [4]

3.2 ZDROJE HLUKU AERODYNAMICKÉHO CHARAKTERU

Už dle názvu charakteru hluku můžeme říci, že tento hluk vzniká proudem vzduchu narážejícího na automobil. Automobilky se snaží svá auta vytvářet co nejvíce aerodynamicky čistými. Hlavním důvodem je ale snížení spotřeby paliva vozu, ale tento fakt se také příjemně projevuje u hluku uvnitř vozu. Vytváření aerodynamického hluku na vozidle může být způsobeno:

- odstávajícími součástmi automobilu mimo celek vozu (zrcátka, stěrače, anténa)
- nezakrytím podvozku vozu
- těsněním dveří a oken
- předním oknem automobilu

Hluk vznikající narážením vzduchu na karoserii automobilu se ve vozidle projevuje od cca 80 km/h, čím rychleji poté vozidlo jede, tím větší je aerodynamický hluk ve vozidle. Prvním sériově vyráběným automobilem s aerodynamickým tvarem byla Tatra 77. Ve své době se zasloužila o naprostou senzaci. Automobil představený 5. března 1934 způsobil revoluci v konstrukci karoserií. Do té doby měly automobily jen „hranaté“ tvary karoserie. Viz obrázek 7.



Obrázek 7 Rolls-Royce Springfield Phantom I - Tatra 77 [17, 18]

Dnešní vozy se snaží mít koeficient součinitele vzdušného odporu $c_x < 0,3$. Tato skutečnost se příjemně projevuje nejen ve spotřebě paliva vozu (snížení produkovaných CO_2), ale také na snížení hluku uvnitř a vně vozu. Součinitel vzdušného odporu vzduchu se počítá k vzdušnému odporu, který automobil brzdí. Celkový vzdušný odpor se vypočítá ze vztahu:

$$O_v = \frac{1}{2} * \rho * S_x * c_x * v_r^2 \quad [\text{N}] \quad (12)$$

kde:

ρ – měrná hmotnost vzduchu

S_x – čelní plocha vozidla

c_x – součinitel vzdušného odporu

v_r – výsledná rychlost proudění vzduchu kolem vozidla

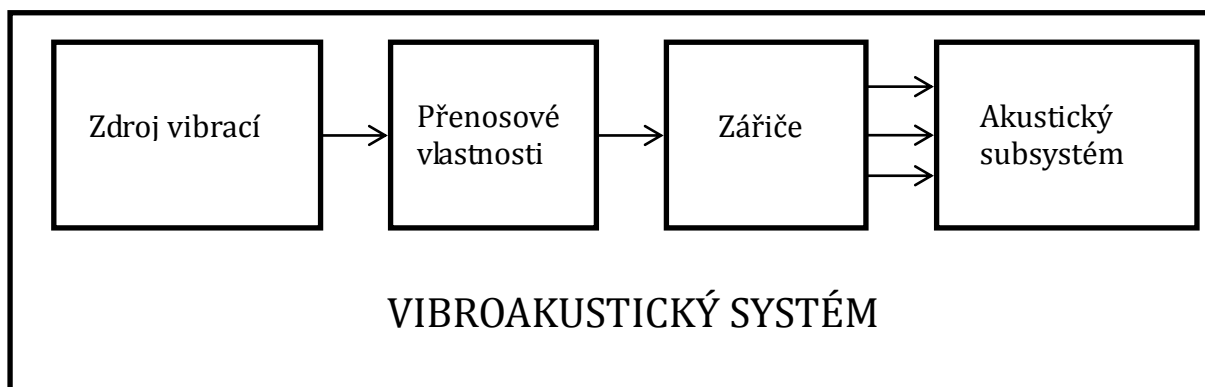
Tabulka č. 4 Aerodynamický odpor automobilů [21]

Model vozu (rok výroby)	Koeficient aerodynamického odporu c_x
Tatra 77 (1934)	0,21
Mercedes Benz CLA (2013)	0,22
Audi A2 (2000)	0,25
Toyota Prius (2007)	0,26
BMW řady 3 (2000)	0,27
Škoda Octavia II (2005)	0,29



4 POTLAČENÍ HLUKU

Problematika snižování hluku a vibrací je náročnou technickou disciplínou. Technik musí sledovat hlučnost stroje jako celek. Řetězec událostí, které u stroje probíhají, musí řešit od zdroje, až po akustické prostředí s obsluhou stroje. Řetězec se skládá ze čtyř bloků, přičemž každý z těchto bloků může výrazně ovlivnit hladinu hluku. Proto je nutné věnovat pozornost každému z těchto čtyř bloků. [1]



Obrázek 8 Vznik a šíření vibrací a hluku [1]

První tři bloky jsou součástí stroje, čtvrtý blok je součástí akustického subsystému. Všechny tyto bloky pak tvoří společný vibroakustický systém.

Podle zásahu do jednotlivých bloků dle obrázku 8 se metody snižování vibrací a hlavně hluku dělí na metody:

- primární
- sekundární

Mezi primární metody potlačení hluku patří úpravy a snižování budících silových účinků, kde přenosové vlastnosti struktury strojů se zlepšují a kde dochází k úpravám zářičů hluku. Při výrobě strojů, musíme dbát především na výrobu jejich jednotlivých součástí. Je důležité zaměřit se na výběr vhodného materiálu, přesnost, opracování, technologickou montáž, vyvažování, výběr vhodných tlumících vložek apod. Můžeme také použít pružné uložení stroje, abychom dosáhli snížení přenosu vibrací ze stroje do podloží a naopak. Hluk je důležité také potlačovat již při výrobě stroje jinými méně hlučnými procesy (např. náhrada nýtování za šroubové spojení).

[1]

Kde nemůžeme použít žádnou primární metodu, tam použijeme metodu sekundární.

K sekundárním řadíme:

- vibrační a hlukové izolace zdrojů hluku od chráněného prostoru
- ustavení hlučných strojů v daném objektu tak, aby hlučnost byla minimální

[1]



U zvuk pohlcujících materiálů musíme sledovat tyto aspekty:

- důležité fyzikální vlastnosti a parametry, které způsobí pohlcení zvuků
- zvukové provedení akustických pohlcovačů užívaných za účelem redukování určitého hluku

[1]

EFEKT TLUMENÍ

Dynamické odezvy a charakteristiky akustických přenosů struktur jsou určeny v podstatě třemi parametry:

- vlastními frekvencemi
- tvary kmitů
- modálním tlumením

[1]

Tlumení způsobuje nevratnou změnu energie v systému. Tlumením chceme docílit přeměny mechanické energie od vibrujících podnětů, na energii tepelnou.

Nejvýraznějšího efektu při rezonanci objektu se dosahuje přes strukturální tlumení. Mimo rezonanční frekvence tlumení u mechanických objektů příliš neuplatňujeme. Pro buzení budící silou dodáváme do objektu energii, přičemž amplituda kmitavého pohybu narůstá, až k hodnotě, kde se energie ztratná rovná s energií dodávanou. Každý materiál má odlišnou dynamickou odezvu na rezonanční frekvenci. Proto se tlumení u různých materiálů mění ve značném rozsahu.

Výkon kmitajícího systému:

$$P_{vst} = P_{dis} = 2 * \pi * f * \eta * E_{celk} \quad (13)$$

kde:

P_{vst} – vstupní výkon

P_{dis} – disipativní výkon

E_{celk} – celková energie systému

f - frekvence kmitání

Zvýšení vnitřního tlumení materiálu má za následek:

- rychlejší zánik volných kmitů (rychlejší dozívání)
- rychlejší úbytek volně se šířících strukturálních vln v konstrukci ve vzdálenosti od zdroje vibrací – tím se zmenšuje plocha účinně vyzařující akustickou energii
- snížení amplitud vibrací v rezonanci
- snížení vyzařované akustické energie i mimo struktury rezonance



- snížení hodnoty nárůstu vibrací a tím i hluku při přechodu rezonančních oblastí
- snížení amplitud u samobuzených kmitů

[1]

4.1 PASIVNÍ POTLAČENÍ HLUKU

Protihlukové (tlumící) materiály jsou široce používané v automobilovém průmyslu. Jejich primární akustická vlastnost je přeměna akustické energie na teplo a je dána závislostí na kmitočtu činitele zvukové pohltivosti. Schopnost tělesa pohlcovat hluk charakterizujeme pomocí hodnoty činitele zvukové pohltivosti α , který je definován jako poměr energie I_2 , pohlcené k určité ploše, k energii I_0 , která na tuto plochu dopadá.

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad [-] \quad (14)$$

kde:

- I_2 – intenzita zvuku vlny odražené
- I_0 – akustický výkon dopadající na plochu

[2]

Přeměny akustické energie na jiné druhy energií mohou být:

- přeměny v důsledku tření
- přeměny v důsledku kolísání akustického tlaku
- přeměny v důsledku nepružných deformací těles (hystereze)

[1]

Porézní materiály patří mezi materiály, které výrazně tlumí okolní hluk. Vyskytují se ve tvaru rohoží, koberců, povlaků, apod. nebo různě vylisovaných prvků z minerálních, organických nebo kokosových vláken či drceného textilu. Mezi nejčastěji používané materiály patří materiály s otevřenými buňkami z pěnového polyuretanu. Tento materiál využívá póry o rozměrech do 1 mm, které jsou mnohem menší, než je délka zvuku vlny proudící přes daný materiál.

U všech těchto materiálů jsou důležitými parametry:

- komplexní charakteristická impedance $Z_a = X_a + j * Y_a$ (15)

- konstanta šíření zvuku $\Gamma_a = \Gamma_R + j * \Gamma_I$ (16)

[1]

Při dopadu akustické vlny na vláknité materiály se molekuly vzduchu pohybují a oscilují ve štěrbinách a spárách porézního materiálu s frekvencí šířící se akustické vlny. Tyto oscilace způsobují tření vzduchových molekul a částic o vlákna materiálu a tím dochází ke zmenšení jejich kinetické energie. V důsledku nepravidelností pórů dochází ke změně směru šíření a ke smršťování a expanzi toku vlnění a tím dochází ke



snížení hybnosti molekul vzduchu ve směru tohoto vlnění. Tyto dva jevy způsobují nejvýraznější ztráty energie kmitajících částic vzduchu o vysokých frekvencích. [1]



Obrázek 9 Materiál pohlcující zvuk

Mezi základní fyzikální charakteristiky porézních materiálů patří:

- pórovitost (poréznost)
- průměr vláken (má většinou náhodou hodnotu)
- faktor struktury
- odpor proti proudění
-

Pórovitost je definována vztahem

$$h = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} = \frac{V_P}{V_C} = \frac{\text{objem pórů}}{\text{celkový objem}} \quad (17)$$

kde:

- ρ_A [kg/m³] – hustota porézního materiálu
- ρ_M [kg/m³] – hustota vláknitého materiálu; pro skelná vlákna a minerální vlnu je $\rho_M = 2450$ kg/m³

Pórovitost materiálů bývá v rozmezí 0,6 – 0,95.

[1]

Aby materiál efektivně pohlcoval hluk, musí být póry navzájem spojeny. Tento faktor zamezí šíření zvuku do dalších prostorů.



Faktor struktury je efekt pórů a dutin, které jsou kolmé na šíření zvukových vln a je určen měřením.

Odpor proti proudění je definován:

$$R_1 = -\frac{1}{v} * \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{t * S}{V} * \frac{\Delta p}{\Delta x} [N * s / m^4] \quad (18)$$

kde:

- Δp – statický rozdíl tlaků napříč homogenní vrstvou tloušťky Δx
- v – rychlost proudění materiálem
- V – objem vzduchu proudící skrz testovaný vzorek během času t
- S – plocha vzorku (na jedné straně)

[1]

U rozsáhlých rovinných ploch, zkoumáme vlastní absorpci zvuku tak, aby byl vyloučen odraz a lom u hran plochy.

Ke snížení přenosu a šíření vibrací ve vozidlech se využívají pružné vložky různých tvarů a provedení. Zde je využíván zákon odrazu vlnění na rozhraní stykových ploch mechanickým fázovým posunem. Čím větší je rozdíl mechanického fázového posunu v daném místě vozidla, tím nastává větší odraz chvění a vlnění. Snižujeme tím tedy přenos vln a vibrací přes tuto stykovou vrstvu.

Útlum pružné vložky vyhodnocujeme pro dané reflexní vlnění jako:

- vlnění podélné
- vlnění ohybové

[1]

ANTIVIBRAČNÍ NÁTĚRY

Běžné konstrukční materiály vykazují velmi nízké hodnoty materiálového tlumení. Útlum chvění a hluku se u těchto materiálů často zvyšuje přiložením jiných materiálů o vysokém vnitřním tlumení – tzv. vícevrstvé materiály. Tyto přídatné materiály se často používají ve formě hlavně tzv. antivibračních nátěrů.

Antivibrační materiály se vyrábějí převážně z různých umělých hmot. Jejich poměrně vysoké součinitele vnitřního tlumení a dále odlišné hodnoty mechanických impedací, oproti tradičním materiálům, poskytují možnost výrazného snížení amplitud a tím i vyzařované akustické energie.

[1]

U automobilů se používají antivibrační nátěry převážně k odhlučnění podběhů vozidla. Tyto nátěry redukuje nejen hluk od valíků se pneumatik při jízdě, ale také od nepříjemných zvuků při nárazu kamínků na podběh vozidla, který se přenáší do kabiny vozu. Antivibrační nátěry mají největší účinnost útlumu hluku při frekvencích do 200 Hz.



Nátěry se prodávají ve formě tekuté gumy a dají se aplikovat i na nejhůře dostupná místa u vozu. Tyto nátěry také dlouhodobě chrání před korozi podvozku vozidla.

ABSORPČNÍ TLUMIČE HLUKU POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ

Absorpční tlumiče jsou široce používány ke snižování hluku v potrubí, ve kterém proudí plyn. Hluk bývá obvykle širokopásmový a požadavkem je, aby docházelo k minimální tlakové ztrátě proudícího média při průchodu tlumičem. Obvykle jsou tyto tlumiče používány v sacích a výfukových potrubních systémech a vzdušných kanálech ventilátorů.

Absorpční tlumiče zeslabují hluk transformací akustické energie v tepelnou, způsobenou třením kmitajících částic plynu v mezerách a dutinách pórovitých materiálů vkládaných do potrubí.

Existuje mnoho typů absorpčních tlumičů hluku s různou geometrií, avšak nejčastější konfigurace obsahuje soustavu rovnoběžných příček zvuk pohlcujících materiálů (kulisové tlumiče). Dále existují tlumiče kruhového a obdélníkového průřezu.

Základní parametry absorpčních tlumičů jsou:

- vložený útlum D [dB]
- hydraulické ztráty Δp [Pa] proudícího média
- hluk generovaný proudícím médiem
- rozměry, cena a životnost

[1]

Většinou jsou tyto požadavky vzájemně protichůdné a tak je proto nutno vycházet z jistého kompromisu mezi nimi.

Vložený útlum absorpčního tlumiče je dán vztahem:

$$D = 10 * \log \frac{W_0}{W_M} \quad [dB] \quad (19)$$

kde W_0 , W_M jsou akustické výkony vyzařované z potrubí bez a s použitým tlumičem.

Akustický výkon konstrukce vyzařovaný s tlumičem je dán vztahem:

$$W_M = W_0 * 10^{-0,1 * (\Delta L_{vst} + \Delta L_l + \Delta L_{výst})} + W_{GP} \quad (20)$$

kde:

- ΔL_{vst} , $\Delta L_{výst}$ – vstupní a výstupní ztráty tlumiče
- ΔL_l – útlum tlumiče délky l
- W_{GP} – akustický výkon generován proudícím plynem v tlumiči

Při nízké rychlosti proudění plynu v potrubí lze zanedbat hluk vnikající proudícím médiem.

[1]



VIBROIZOLACE

Hluk způsobený vibracemi, může být eliminován nebo výrazně redukován separováním zdrojů vibrací přes pružná uložení – vibroizolací. Příslušný pružný element se nazývá vibroizolátor nebo izolátor vibrací či kmitů.

V praxi se preferuje vibroizolace konkrétního zdroje vibrací, nebo alespoň místa, které je co možná nejbližší u zdroje vibrací. V těchto případech pak nedochází ke vzniku a šíření strukturálního vlnění do dalších částí automobilu a tím se zamezuje možnost vzniku hluku v dalších částech vozu. Vibroizolací zamezujeme vzniku dalších sil přenášených z jedné struktury automobilu na jinou.

[1]



Obrázek 10 Silentblok vozu Subaru Impreza WRX STi [20]

V automobilu používáme vibroizolaci převážně k uchycení pohonné jednotky (motor) ke karoserii. Takto řešenou vibroizolaci nazýváme aktivní vibroizolací, při níž je izolován zdroj vibrací a je tak zabráněno přenosu chvění na okolní konstrukci. Pasivní vibroizolace je řešení, při němž je chráněno citlivé zařízení nebo jiné zařízení od vibrací přenášených okolní konstrukcí.

Zásady aktivní izolace kmitů:

- zmenšit budící síly na minimum (vyvažovat setrvačné síly)
- uložení je třeba navrhnout tak, aby nedocházelo k rezonančním jevům
- je nutno od izolovaného stroje pružně oddělovat všechny další spoje (výfukový systém, elektroinstalace apod.)
- sestavu je nutno ladit frekvenčně nízko vzhledem k budícím frekvencím
- tlumení zavádíme, pokud je provozní frekvence blízká vlastní frekvenci

[1]

Silentbloky se dnes využívají u různých typů strojů. Nenacházejí se jen v automobilech, ale najdeme je také u motorek, letadel, obráběcích strojů a všude tam kde je potřeba tlumit vibrace a hluk. Slovo silentblok je odvozeno z anglických slov silent – tichý, a block – zajistit. Silentbloky mají tedy zajistit především snížení vibrací a hluku.

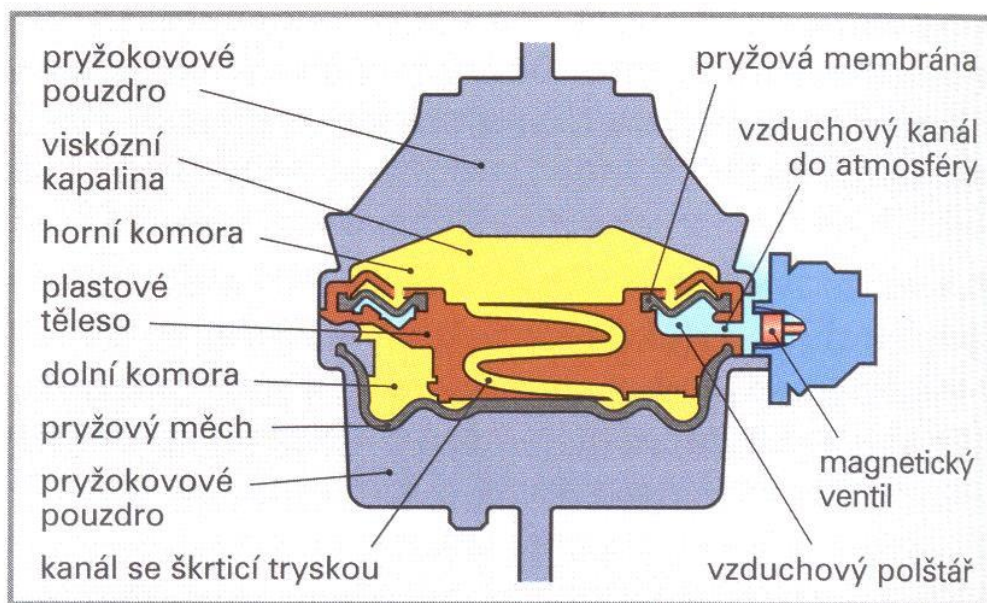
Silentbloky se převážně používají k uložení motoru do karoserie, ale také např. k pružnému uložení podvozku. Tyto díly ovšem pracují ve velice obtížných podmínkách bez jakékoliv údržby. Při provozu automobilu je motor hlavním zdrojem vibrací s určitou vlastní frekvencí. Pneumatiky vozidla rozkmitávají zavěšení nápravy díky výmolům na silnici. Podvozek vozidla je rozkmitán díky této skutečnosti a vznikají tak další vibrace, ale o jiné frekvenci. Při současném působení dvou a více zdrojů vibrací s různými frekvencemi dochází k tzv. interferenci, čili k zesílení vibrací. Tyto vibrace poté vyvolají namáhání působící negativně na materiál silentbloků.

[1, 9]

SILENTBLOKY A ULOŽENÍ MOTORU

Uložení motoru snižuje přenos vibrací motoru do karoserie vozidla. Silentblok snižuje také přenos vibrací, které vznikají během jízdy z nerovností silnic, na motor. Silentblok musí také zachycovat síly, které vznikají krouticím momentem. V dnešní době se proto používají pružná pouzdra s hydraulickým tlumením (obrázek 11). [9]

„Při běhu naprázdno působí tlak, který se vytváří vibracemi motoru v kapalině horní komory, pouze na pryžovou membránu. Ta se deformuje a tlumí vibrace. Vzduch z komor uniká otevřeným elektromagnetickým ventilem. Za jízdy je elektromagnetický ventil uzavřen a tlak kapaliny působí přes škrtecí trysku ve spojovacím kanálu v dolní komoře na pryžový měch, který se deformuje a omezuje tak vibrace.“ [9]

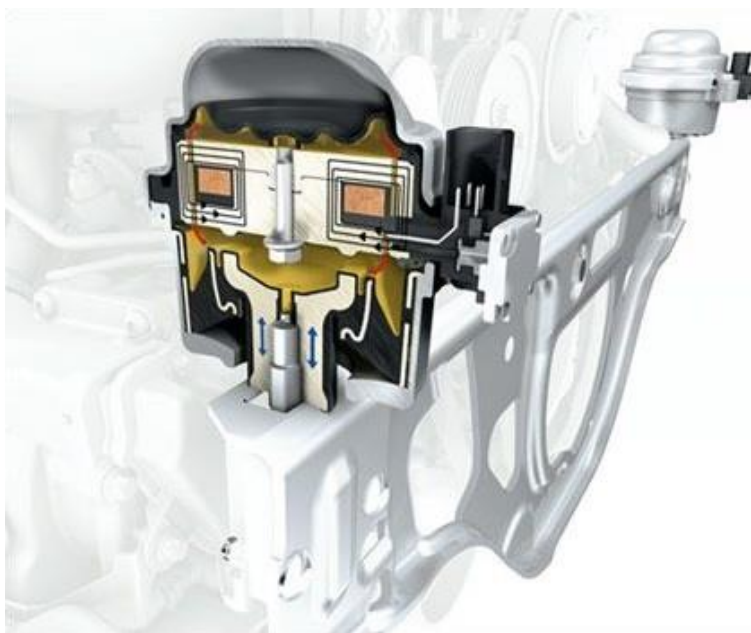


Obrázek 11 Silentblok s hydraulickým tlumením [9]



Materiál, který se nejčastěji používá k výrobě silentbloků je gumová směs obsahující přírodní materiály. Tyto směsi mají velmi dobré tlumící vlastnosti, protože jsou pružné. Hlavním nedostatkem pryžových silentbloků jsou měnící se vlastnosti po dobu jejich používání. Po určitém čase se jejich účinnost při tlumení rázů snižuje, jelikož se po čase stávají více poddajnými a nedokáží zachytit síly v plném rozsahu. Silentbloky využívají směs o tvrdosti od 50 do 80 Shore. U sportovních vozidel se používají tvrdé směsi. [9]

Vývoj nových technologií umožňuje použití stále lepších materiálů na tyto namáhané součásti vozidla. Začínají se objevovat silentbloky z trvalejších materiálů - polyuretanu. Tento materiál je ale pořád o třetinu tvrdší než guma, proto se používá převážně u sportovně laděných automobilů. Jeho pozitivní vlastnost tkví především v jeho tuhosti, má ale také větší časovou stálost než guma. Tyto vlastnosti mají kladný vliv na jízdní vlastnosti automobilu. Polyuretanové silentbloky se většinou dodávají jako sekundární vybavení pro dodatečnou montáž při úpravě automobilu. [9]



Obrázek 12 Dynamické uložení motoru v automobilu Porsche 911 (991) [19]

Motor je prostřednictvím dvou hlavních silentbloků uchycen ke karoserii. První Newtonův zákon říká, že těleso zůstává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, není-li nuceno změnit stav vnějšími silami. Jestliže automobil pojede do zatáčky, tak karoserie bude následovat směr udávaný řidičem (volantem). Motor však zpočátku nikoli. Výsledkem odstředivých sil přiblíží zadní části vozu k vnějšímu okraji vozovky. Aktivní uložení motoru tento efekt minimalizuje. Dynamické uložení motoru umožňuje upravovat tuhost silentbloků pomocí čidel, které snímají příčné a podélné zrychlení a také natočení volantu. Princip změny tuhosti silentbloků spočívá v jejich naplnění magnetickou kapalinou. Ta mění svou viskozitu v závislosti působení magnetického pole



(obr. 11 a 12). S vyšší hustotou kapaliny v silentblocích nastává větší tuhost silentbloků. Jejich měkčí charakteristika naopak zvyšuje komfort. Díky tomuto řešení může být motor pevně spojen s karoserií. Systém je určen pro minimalizaci vibrací a rázů celého pohonného ústrojí do karoserie. [8]

ULOŽENÍ ZADNÍ NÁPRAVY

Zadní náprava automobilu přenáší rázy kol od vozovky do karoserie. Tyto vibrace a hluk s tím spojený, se snaží každá automobilka eliminovat vlastní cestou.

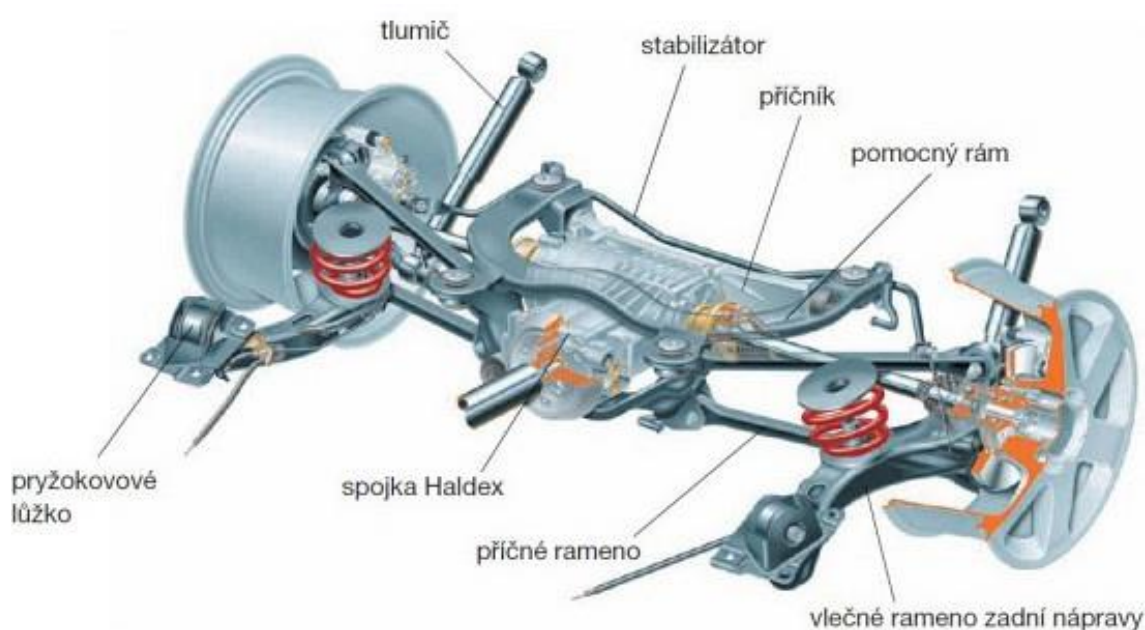
Automobilky používají převážně dva typy zadních náprav:

- Tuhá zadní náprava vlečná



Obrázek 13 Vlečná zadní náprava [16]

- Víceprvková náprava



Obrázek 14 Víceprvková zadní náprava [16]



Každá z těchto náprav má řadu výhod a nevýhod. Tuhá zadní náprava vlečná vítězí oproti víceprvkové nápravě cenou, jednoduchostí a úsporou místa. Naopak víceprvková náprava vítězí ve stabilitě vozu a také hluku. Z obrázků je patrné uchycení tlumičů a pružin ke karoserii. U víceprvkové nápravy vidíme uchycení ke karoserii pod určitým úhlem. Rázy vznikající od vozovky tak poté rozdělují do více směrů karoserie a tím pomáhá k tišším přejezdům nerovností na silnici.

Nelze však říci, že víceprvková náprava je vždy tišší než tuhá zadní náprava vlečná. Firma Citroen má mnohaleté zkušenosti s pneumaticky odpruženými podvozky. Jejich systém zahrnuje řídicí jednotku, odpružení, jednotku přívodu vzduchu, dva pneumatické polštáře a dva snímače výšky. Pokud snímače zaznamenají změnu světlé výšky vozu, vyšlou signál do řídicí jednotky, který dává podnět pro kompresor, aby tuto odchylku upravit a vrátil vůz do správné výšky.

Toto odpružení přináší vyšší komfort, neboť zlepšuje tlumení a odpružení a optimalizuje odfiltrování nerovností vozovky. Systém tedy zamezuje přenášení nepříjemných vibrací a hluku do vozu.

Srovnání těchto dvou náprav v otázce hluku a přenosu vibrací do vozidla je velmi diskutabilní. Srovnat bychom mohli tedy jen základní provedení náprav. Zde by zvítězila víceprvková náprava, neboť přes jednoduchou zadní nápravu s vlečnými rameny, uchycenými přímo do karoserie, se přenáší větší rázy než je tak u nezávisle zavěšené víceprvkové nápravy, neboť víceprvková náprava je uchycena přes tlumič a pružinu nezávisle ke karoserii. Navíc tato náprava používá v základu více tlumících prvků.

Výběr z těchto dvou typů náprav je tedy vždy otázkou financí a jak chce danou nápravu výrobce ještě vylepšit tlumícími prvky.

4.1.1 MATERIÁLY A TYPY IZOLÁTORŮ

K pružnému uložení strojů a přístrojů se používají různé pružné členy lišící se jak materiálem, tak geometrií izolátoru. Nejčastěji používané komerční izolátory bývají zpravidla kovové nebo pružné elementy z pryže a různých elastomerických vláken. Kovové izolátory bývají ve tvaru šroubových spirál nebo různě tvarované (listové pero).

Izolátory jsou konstruovány na namáhání na tah, smyk nebo kombinaci těchto namáhání.

Výhodou ocelových pružin je jejich snadná vyměnitelnost, odolnost proti olejům a chemikáliím. Dále umíme poměrně přesně stanovit tuhost potřebnou pro požadované frekvenční ladění celého vibroakustického systému.

U pryžových izolátorů je velká výhoda na straně namáhání na smyk, protože pryž má charakteristiku kapaliny (nestlačitelnost). Výhoda je také při tlumení vzniklým třením částic při deformaci pružného elementu. Naopak jeho nevýhodou je malá odolnost proti chemikáliím a nízká životnost.

Vzduchové vaky se používají jako pružný element namáhaný na tlak. Pružnost takového elementu je závislá na tlaku vzduchu uvnitř vaku. Tyto pružné elementy mívají kratší výšku oproti kovovým pružinám stejné tuhosti. Jejich výhoda spočívá v možnosti



měnit jejich délku během provozu vozidla. Navíc lze s tímto prvkem dosáhnout frekvenčního ladění od 1 Hz – tedy od nízké hodnoty. Jejich nevýhoda spočívá v malé boční stabilitě, proto vyžadují boční vedení.

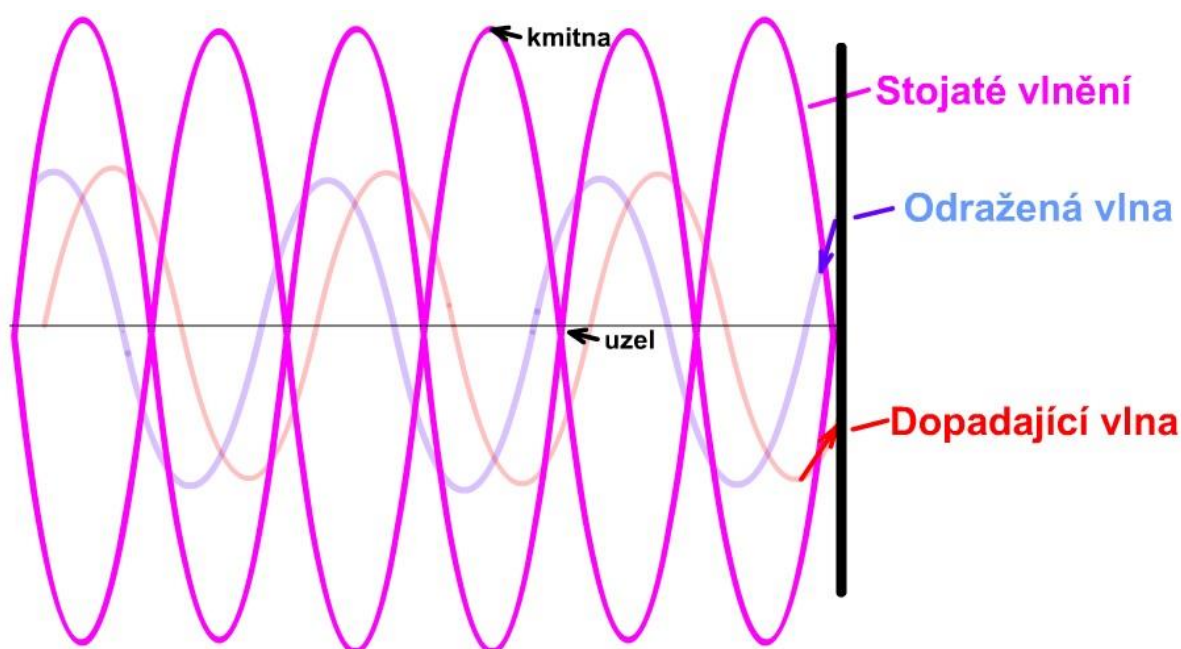
[1]

4.2 AKTIVNÍ POTLAČENÍ HLUKU

Na začátku 80. let debutovala značka Bose auto-audio ve vozech Cadillac a Corvette. V dnešní době si automobilky uvědomují, že zájemce o nový automobil si rád připlatí tisíce pro prvotřídní zvuk ve vozidle a spolupracují tak s firmami, které se specializují na audio soustavy. Zákazník si může vybrat z firem jako jsou: Bowers & Wilkins, Bang & Olufsen, Mark Levinson, Harman Kardon, a dalších.

4.2.1 PRINCIP AKTIVNÍHO POTLAČENÍ HLUKU

Aktivní potlačení hluku funguje na bázi zvukových vln se stejnou amplitudou, ale s obrácenou fází. Zvuk, který chceme odfiltrovat má určitou frekvenci a amplitudu. Princip aktivního potlačení okolního hluku spočívá ve vytvoření protivlny, která má vlastnosti vlny potlačující. Tedy vlna se stejnou amplitudou a frekvencí, ale v obrácené fázi. Vzduch, který je nejčastějším nosičem zvuku, bude rozvlněn jen minimálně, protože akustický tlak, který chceme odfiltrovat, je potlačen protivlnou vycházející z reproduktorů.



Obrázek 15 Vytvoření stojaté vlny [14]

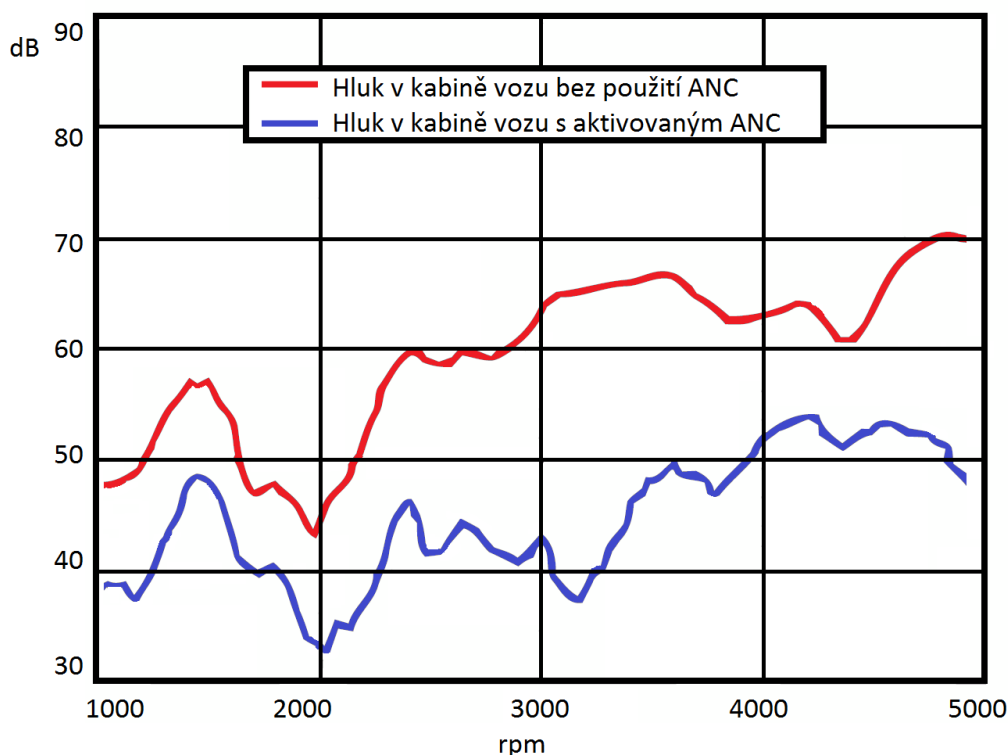


Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že potřebujeme vytvořit takovou protivlnu, aby stojaté vlnění bylo co nejmenší. Čili součet dvou amplitud byl roven nule.

Z hlediska bezpečnosti provozu vozidel na pozemních komunikacích, je zakázáno redukovat frekvenční pásma vozidel záchranných složek.

4.2.2 POUŽITÍ AKTIVNÍHO POTLAČENÍ HLUKU V AUTOMOBILU

Technologii aktivního potlačení hluku (Active Noise Cancellation - ANC) dokázala firma Bose uvést na trh koncem 80-tých let. Nyní tuto technologii společně s General Motors nabízejí ve svých automobilech. Myšlenka tohoto systému spočívá v umístění mikrofónů v kabině vozu a umožňuje odfiltrovat tak nechtěné zvuky pomocí reproduktorů uvnitř vozu. [10]



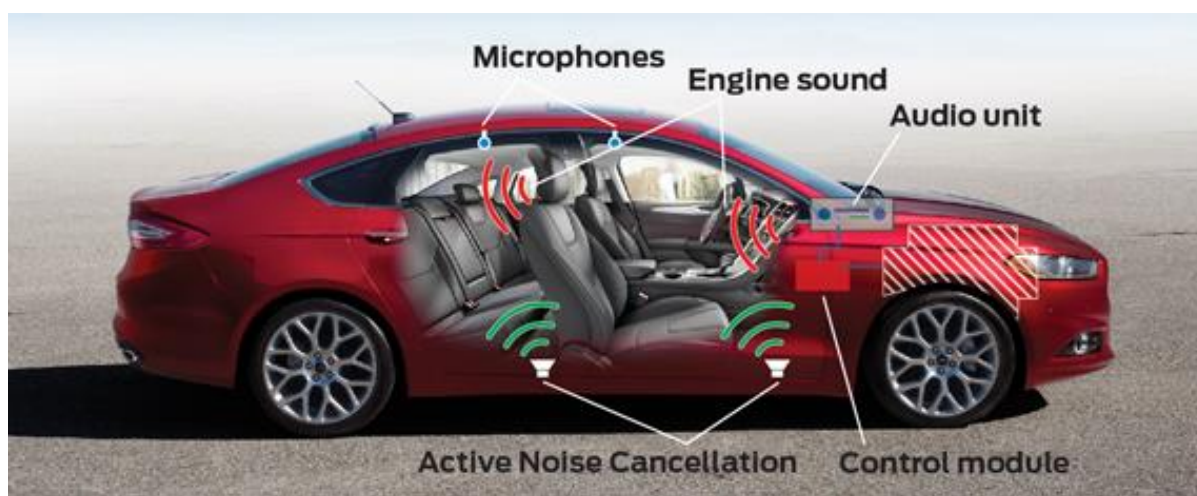
Obrázek 16 Aktivní potlačení hluku ve voze [10]

Na obrázku 16 můžeme vidět rozdíl hluku ve vozidle při zapnutém (modrá křivka) a vypnutém (červená křivka) systému aktivního potlačení hluku (ANC) v rozmezí 1000 – 5000 ot/min (rpm). Můžeme vidět rozdíl až 15 dB.

Tato technologie nemusí sloužit pouze ke snížení hluku ve vozidle, ale vede nepřímou cestou ke snižování paliva ve vozidle. Inženýři od Fordu mohou ladit motor v mnohem efektivnějším rozsahu otáček, čímž umožňují snižovat spotřebu paliva.

Nevýhoda tohoto ladění vede k pronikání nepříjemných zvuků do kabiny vozidla. Díky technologii aktivního potlačení hluku však mohou inženýři tyto nepříjemné frekvence zredukovat a zajistit tak komfort v kabině. Motor v nižších otáčkách spotřebovává méně paliva, čímž ale produkuje více nízkofrekvenčních tónů, které jsou nepříjemné pro posádku vozu.

Tři vysoce citlivé mikrofony jsou umístěné ve vnitřním čalounění stropu vozu - dva nad první řadou sedadel a jeden nad zadní lavicí. Tyto mikrofony slouží k detekci a k měření hluku motoru v kabině. Signál z mikrofونů je zaslán v reálném čase do řídicího systému audiosoustavy a modul okamžitě generuje opačné vlnění a zasílá jej do reproduktorů uvnitř vozu. [11]



Obrázek 17 Aplikace technologie aktivního potlačení hluku ve vozidle Ford Fusion Hybrid [11]

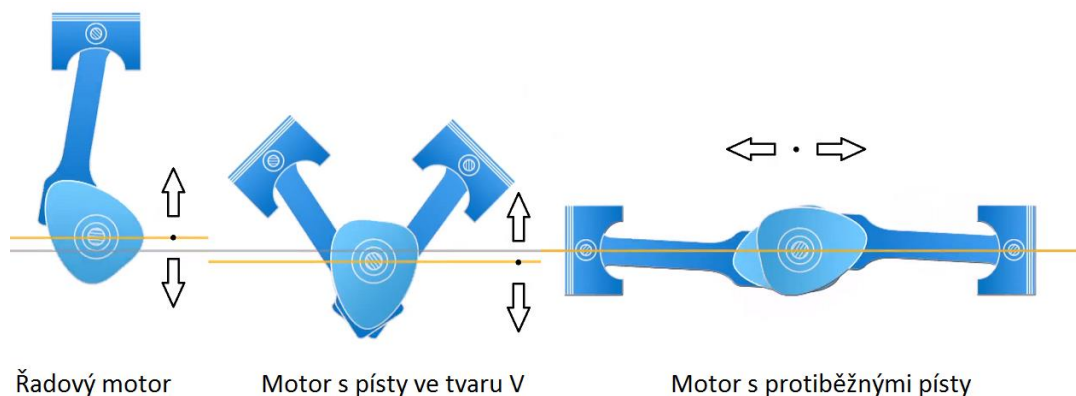
5 ZHODNOCENÍ METOD POTLAČENÍ HLUKU AUTOMOBILU

5.1 MOTOR

Nejdůležitějším prvkem při útlumu automobilu je motor. Každý motor má své výhody i nevýhody. Vezměme v úvahu dva nejpoužívanější motory – benzínový a dieselový. Toto rozdělení u potlačení hluku nám však nestačí. Motory v běžných osobních vozidlech mají dnes 2, 3, 4, 5, 6 a 8 válců.

Při navrhování motorů je důležité co nejvíce potlačit vibrace už při výrobě motoru samotného. V dnešní době kdy přesná CNC zařízení dokáží vyrobít součásti s přesností na setiny až tisíce milimetru tomuto požadavku umíme vyhovět. Tento požadavek je ale také otázkou financí.

Dalším z elementů odstranění vibrací u motorů při jejich konstrukci je jejich vyvážení. U motorů které se těžko vyvažují, používáme vyvažovací hřídele. Tyto hřídele se používají zejména u dieselových motorů a u motorů kde při chodu motoru dochází k nepříjemným vibracím (např. dvouválcové motory). Motory typu boxer (označení H – písty se pohybují proti sobě a jsou uloženy horizontálně v bloku motoru) nepotřebují vyvažovací hřídele, a to ani dieselové motory. Tyto motory mají nízké vibrace díky tomu, že se jejich těžiště nepřesouvá vertikálně vůči klikové hřídeli, ale zůstává na jednom místě při chodu motoru (obr. 18). [22,23]



Obrázek 18 Pohyby pístů jednotlivých motorů [24]

Pro odstranění nežádoucího hluku při chodu motoru se používají výfuková potrubí. Nejvýraznější rozdíl můžeme slyšet u motorů benzínových s atmosférickým sáním. Po přidání svodů, katalyzátorů a tlumičů se hluk motoru několikanásobně zklidní. U moderních dieselových motorů tento rozdíl není tak velký, neboť je požadavek, aby nafta vstříknuta do válce byla rozprášena co nejúčinněji a tak v průběhu jednoho zdvihu je palivo vstříknuto do válce až 5x za zdvih, a tím jsou potlačeny nežádoucí vibrace motoru. Následné výfukové plyny pohání turbokompresory a zde akustická energie dopadá na lopatky turbíny, která se díky přeměně energie roztáčí.



5.2 KAROSERIE

Na karoserii vozidla a její aerodynamice je závislý hluk jak uvnitř tak vně vozidla. Pro snížení hluku uvnitř vozu je také důležitým faktorem snižování odporu vzduchu kolem čelního skla, stěračů, zpětných zrcátek, dveří a oken.

Při provozu elektromobilů je aerodynamický hluk mnohem slyšitelnější než u konvenčních automobilů se spalovacími motory. Při vývoji elektromobilu Nissanu Leaf konstruktéři museli vymyslet jak eliminovat hluk v oblasti zpětných zrcátek. Jelikož motor nevydává téměř žádný hluk, byl hluk od zpětných zrcátek slyšet. Konstruktéři Nissanu museli proto přistoupit ke změně tvaru předních světlometů. Vyboulili tak plast u předních světlometů, aby vzduch obcházející přední světlomet usměrňoval vzduch tak, aby nenarážel do zrcátek vozu.



Obrázek 19 Obtékající vzduch kolem předního světlometu Nissanu Leaf [25]



ZÁVĚR

Účelem této závěrečné bakalářské práce bylo popsat a vysvětlit základní a nejdostupnější metody snižování hluku v konstrukci osobních vozidel. Tato problematika je ovšem tak rozsáhlá, že by zasluhovala samostatné studium jednotlivých konstrukčních prvků vozidla. Automobil jako celek je vždy jen o kompromisech, které následně určují jeho oblíbenost a postavení na prodejním trhu vozidel.

Tato práce je zaměřena na vysvětlení vzniku a šíření hluku a vibrací, vlivu těchto negativních faktorů na člověka a životní prostředí. Lidský organismus nemá proti působení vibrací a hluku výraznější obranné mechanismy. V další části popisuje vznik hluku a vibrací v osobních motorových vozidlech.

Největší pozornost je věnována způsobům potlačování hluku, a to jak klasickému - pasivní formy tlumení, tak dnes již běžně se vyskytující aktivní formě potlačení hluku, založené na principu stojaté vlny. Je zřejmé, že dosud nejrozšířenější prvky útlumu hluku a potlačování vibrací spočívají v klasických a léty osvědčených postupech, s použitím stále novějších a lépe dostupnějších materiálů. Naproti tomu vozidla z luxusnějšího segmentu využívají navíc prvky aktivního potlačení hluku pro větší komfort pasažérů. Ovšem v nynější ekonomicky složité době, kdy je trh přesycen kvalitními, ale méně prodejnými drahými vozidly, se začínají objevovat konstrukčně jednodušší automobily. Jsou více ekonomicky zajímavější pro výrobce i kupujícího, ale jsou naopak méně kvalitně odhlučňené. Jako ukázkou takovýchto postupů lze označit instalaci pneumatik s vyšším profilovým číslem a „měkčeji“ nalaďený podvozek, ale toto vozidlo pak nemusí být tak jednoduché na ovládání v kritičtějších situacích, než dražší vozidlo s lepším podvozkem.

Závěrečná část hodnotí vliv nejzákladnějších prvků tj. samotné aerodynamiky karoserie osobního vozidla a typu použitého motoru. Jelikož automobil je složitý mechanismus, ve kterém ve většině změna jednoho prvku negativně ovlivňuje prvek druhý, záleží vždy na mnoha faktorech, jakým způsobem jednotlivé automobilky přistoupí k minimalizaci přenosu vibrací a hluku do vnitřního i vnějšího prostoru. Vývoj nových technologií pro tuto problematiku je nezastavitelný a bude i nadále směřovat k vyššímu pohodlí a tím i k bezpečnosti v tomto způsobu dopravy.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Mišun, V. Vibrace a hluk. 1. vyd. Brno: FS VUT v Brně a PC-DIR, s.r.o., 1998. ISBN 80-214-1262-3
- [2] NOVÝ, R. Hluk a chvění. České vysoké učení technické, 2000. ISBN 8001022463
- [3] Hluk a emise: Hluk z motorů a pneumatik. [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/hluk-z-motoru-a-pneumatik/>
- [4] Hluk a emise: Hluk vznikající na povrchu komunikace. [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/hluk-vznikajici-na-povrchu-komunikace/>
- [5] Hluk a emise: Vliv hluku na zdraví. [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/vliv-hluku-na-zdravi/>
- [6] Moravec, V. Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola. 1. vydání Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [7] WireFrame: Car. [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <https://arnold.instawiki.com/display/SltoAUG/Wireframe>
- [8] Porsche: Dynamické uložení motoru. [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://auto.porsche.cz/modely/911/911-carrera/v-detailu?gtabindex=3>
- [9] Podvozkové centrum APM Bilstein: Silentbloky. [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.autoprofiteam.cz/article.php?artid=550>
- [10] Bring It, Bose: Noise-Canceling Car Interiors. [online]. [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://editorial.autos.msn.com/blogs/autosblogpost.aspx?post=a5b6fb48-36ac-4c59-abf1-2f2210a7403b>
- [11] Ford Fusion Hybrid: Active Noise Cancellation Helps Deliver Quiet Fuel Efficiency. [online]. [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=37160
- [12] Podpora-techniky.cz: Kouřový aerodynamický tunel [online]. [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.podpora-techniky.cz/page/kourovy-aerodynamicky-tunel/>
- [13] BERAN, Vlastimil. Chvění a hluk. 1. vydání. Plzeň: Západočeská universita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.



- [14] Akustika: vznik a šíření zvuku. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [15] VYBRANÉ STATĚ Z AKUSTIKY. SCHAUER, PAVEL. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf
- [16] Zadní náprava osobního automobilu. [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3457-zadni-naprava-osobniho-automobilu.html>
- [17] Rolls Royce. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://allcarcentral.com/Rolls_Royce_pix-8.html
- [18] Od Präsidenta do síně slávy. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.generacey.cz/ucastni-se-akci-a-soutezi/od-prasidenta-do-sine-slavy>
- [19] Dynamické uložení motoru. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://auto.porsche.cz/modely/911/911-turbo/v-detailu?gtabindex=3>
- [20] Silentblok Subaru Impreza STI. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.speedpro.eu/subaru-impreza-tvrde-silentbloky-motoru-vymennym-zpusobem-p-4907.html>
- [21] Srovnání součinitelů aerodynamického odporu u aut. [online]. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.martin-tlusty.euweb.cz/htm/CarAerodCz.htm>
- [22] L. Pruvost, Q. Leclère, E. Parizet, Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 23, Issue 7, October 2009, Pages 2072-2087, ISSN 0888-3270, 10.1016/j.ymssp.2009.04.001.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327009001265>)
- [23] N. Tandon, B.C. Nakra, D.R. Ubhe, N.K. Killa, Noise control of engine driven portable generator set, Applied Acoustics, Volume 55, Issue 4, December 1998, Pages 307-328, ISSN 0003-682X, 10.1016/S0003-682X(98)00004-8.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X98000048>)
- [24] SUBARU Lab. [online]. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Qz4y8KYALj8>



- [25] Wind tunnel picture of headlight / mirror airflow. [online]. [cit. 2013-04-26].
Dostupné z: http://farm4.static.flickr.com/3312/4623330019_2a751d5498_o.jpg



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c_x	[-]	Součinitel vzdušného odporu
D	[dB]	Vložný útlum absorpčního tlumiče
E_{celk}	[J]	Celková energie systému
f	[Hz]	Frekvence kmitání
h	[-]	Pórovitost
I	[W*m ⁻²]	Akustická intenzita
L	[dB]	Hladina akustických veličin
L_I	[dB]	Hladina akustické intenzity
L_N	[dB]	Hladina hlasitosti
L_P	[dB]	Hladina akustického tlaku
L_W	[dB]	Hladina akustického výkonu
O_v	[N]	Vzdušný odpor
p	[Pa]	Akustický tlak
P_{dis}	[W]	Výkon disipativní
P_{vst}	[W]	Vstupní výkon
R_1	[N*s*m ⁻⁴]	Odpor proti proudění
S	[m ²]	Plocha vzorku (na jedné straně)
S_X	[m ²]	Čelní plocha vozidla
v	[m*s ⁻¹]	Rychlost proudění materiálem
v_r	[m*s ⁻¹]	Výsledná rychlost proudění vzduchu kolem vozidla
v_t	[m*s ⁻¹]	Rychlost zvuku
V	[m ³ *s ⁻¹]	Objem vzduchu proudící skrz testovaný vzorek během času t
W	[W]	akustický výkon
W_{GP}	[W]	Akustický výkon generován proudícím plynem v tlumiči
W_M	[W]	Akustický výkon konstrukce vyzařovaný s tlumiče
Z_a	[-]	Komplexní charakteristická impedance
α	[-]	Zvuková pohltivost
ρ	[kg*m ⁻³]	Měrná hmotnost vzduchu
ρ_A	[kg*m ⁻³]	Hustota porézního materiálu
ρ_M	[kg*m ⁻³]	Hustota vláknitého materiálu
Γ_a	[-]	Konstanta šíření zvuku

