

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Zemědělská fakulta

Katedra: Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky

Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství

Studijní obor: Zemědělské inženýrství

Diplomová práce

Vliv režimu práce motoru mobilních energetických prostředků
na hladinu akustického tlaku

Vypracoval: Bc. Ondřej Klečacký

Vedoucí práce: Ing. Marie Šístková, CSc.

2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej KLEČACKÝ**
Osobní číslo: **Z13604**
Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**
Studijní obor: **Zemědělské inženýrství**
Název tématu: **Vliv režimu práce motoru mobilních energetických prostředků na hladinu akustického tlaku**
Zadávací katedra: **Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V literární rešerši práce se zaměřte na:

1. Vývoj konstrukce spalovacího motoru v mobilních energetických prostředcích.
2. Hluk, jeho vznik, šíření a účinky na lidský organizmus.
3. Zdroje hluku u spalovacího motoru energetických prostředků.

V praktické části práce proveďte:

1. Zjištění hladin akustického tlaku L_A (nejméně u tří mobilních energetických prostředků) při různých a nejběžnějších otáčkách motoru (např. volnoběžných, maximálních, pracovních).
2. Měření hlukových hladin L_A v místě obsluhy a současně v určité vzdálenosti od energetického prostředku.
3. Posouzení závislosti hlukových hladin na otáčkách motoru uvnitř i vně prostředku.
4. Zhodnocení hlukové zátěže obsluhy a okolního prostředí (ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{Aeq}) a případné navržení opatření pro její snížení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah pracovní zprávy: 60 - 80 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

Rasch, F.: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise. Doktorská práce, VUT Brno, 2011;

Nový, R.: Hluk a chvění. ČVUT, Praha, 2009;

Smetana, C. a kol. Hluk a vibrace, měření a hodnocení, Praha, Sdělovací technika, 1998.

Günther, B., Hansen, K. H., Veit, I.: Technische Akustik - Ausgewählte Kapitel. Grundlagen, aktuelle Probleme und Messtechnik. 8. auflage, Expert Verlag, Renningen, 2008;

Evropské životní prostředí, Stav a výhled 2010 - shrnutí. Dostupné na:

<http://www.eea.europa.eu//soer/synthesis/translations/evropske-zivotni-prostredi-2013-stav>;

http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/html/motory_a_pohony/pohony_a_motory/prednasky/oficialni_sylaby/3-2-ekologie.pdf.

Vedoucí diplomové práce:

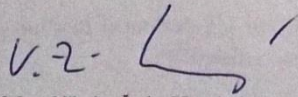
Ing. Marie Šístková, CSc.

Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky

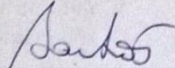
Datum zadání diplomové práce: 14. ledna 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2015

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc., dr. h. c.
děkan

L.S.


doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 20. března 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne: 31.3.2015

.....

Bc. Ondřej Klečacký

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat za cenné rady při zpracování mé diplomové práce a zapůjčení měřících přístrojů Ing. Marii Šístkové, CSc., a Ing. Davidovi Průšovi za informace a umožnění provést ve firmě Rolnické Družstvo Plevis měření hlučnosti mobilních energetických prostředků.

Téma: Vliv režimu práce motoru mobilních energetických prostředků na hladinu akustického tlaku

Abstrakt: Diplomová práce je zaměřena na rozbor hlučnosti mobilních energetických prostředků v závislosti na režimu práce motoru a jeho vyhodnocení. Základ práce tvoří naměření hladin akustického tlaku čtyř prostředků v různých režimech práce motoru dvěma hlukoměry. Jeden hlukoměr uvnitř kabiny, druhý vně kabiny. Výsledky práce ukázaly na vývoj v útlumu hluku u nových pracovních strojů.

Klíčová slova: zvuk, hluk, účinky hluku na člověka, zdroje hluku u spalovacího motoru, vývoj vznětového motoru, měření hladin akustického tlaku

Topic: Impact of motor operation mode of mobile power vehicles on level of acoustic pressure

Abstract: The diploma thesis is focused on analysis of noise level of mobile power vehicles in relation to motor operation mode and its evaluation. The thesis core lies within measurement of acoustic pressure levels at four vehicles in different motor operation modes by two audio-noise meters. One meter was placed within the cabin, the other outside. The results of the work showed a development in reducing noise at modern power vehicles.

Key words: sound, noise, noise impact on a man, noise sources at combustion engine, compression-ignition engine development, acoustic pressure level measurement

Obsah

1. ÚVOD	12
2. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	13
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	14
3.1 Zvuk	14
3.1.1 Akustické vlnění (definice zvuku).....	14
3.1.2 Vlastnosti zvuku	15
3.1.2.1 Výška	15
3.1.2.2 Barva	15
3.1.2.3 Hlasitost	15
3.2 Základní pojmy v akustice	18
3.2.1 Akustický tlak	18
3.2.2 Akustický výkon	18
3.2.3 Akustická intenzita.....	19
3.2.4 Vlnová délka.....	20
3.2.5 Akustická rychlost	20
3.2.6 Rychlost šíření zvuku.....	20
3.2.7 Frekvence.....	21
3.2.8 Decibelové stupnice.....	21
3.2.8.1 Hladina akustického výkonu.....	21
3.2.8.2 Hladina akustického tlaku	21
3.2.8.3 Hladina akustické intenzity	23
3.3 Hluk	24
3.3.1 Definice hluku	24
3.3.2 Šíření hluku	24
3.3.2.1 Ve volném prostoru	24
3.3.2.2 V uzavřeném prostoru.....	25
3.3.3 Účinky hluku na lidský organismus	25
3.3.4 Legislativa	27
3.4 Vývoj konstrukce spalovacího motoru v mobilních energetických prostředcích	28
3.4.1 Rozdělení pístových spalovacích motorů.....	28
3.4.2 Historie, charakteristika, paliva a vývoj vznětového motoru.....	29

3.4.2.1	Historie - vznik.....	29
3.4.2.2	Princip činnosti čtyřdobého vznětového motoru.....	29
3.4.2.3	Požadavky na motor používaný v zemědělských mobilních zařízeních.....	30
3.4.2.4	Paliva	30
3.4.2.4.1	Motorová nafta	30
3.4.2.4.2	Bionafta	31
3.4.2.4.3	Zemní plyn	32
3.4.2.5	Vstřikování motorové nafty (bionafty).....	33
3.4.2.5.1	Nepřímé vstřikování	33
3.4.2.5.2	Přímé vstřikování.....	34
3.4.2.6	Vývoj vstřikovacího systému vznětových motorů	35
3.4.2.6.1	Řadové vstřikovací čerpadlo.....	35
3.4.2.6.2	Rotační vstřikovací čerpadlo s axiálním pístem.....	38
3.4.2.6.3	Rotační vstřikovací čerpadlo s radiálními písty	40
3.4.2.6.4	Vstřikovací trysky otevírané tlakem paliva	41
3.4.2.6.5	Vstřikovací sdružené jednotky (čerpadlo tryska – PD)	42
3.4.2.6.6	Vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem (common rail – CR)	44
3.4.2.7	Vlivy působící na výkon motoru, přepřínování	49
3.5	Zdroje hluku u spalovacího motoru energetických prostředků	53
3.6	Možnosti snížení hluku spalovacího motoru.....	55
3.6.1	Aplikované v/na motoru	55
3.6.2	Aplikované vně motoru (v mobilním energetickém prostředí).....	56
4.	METODIKA	57
4.1	Firma.....	57
4.1.1	Lokalita, charakteristika podniku	57
4.1.2	Historie podniku.....	57
4.2	Měřící technika	58
4.2.1	Hlukoměry:	58
4.2.2	Kalibrátor	58
4.2.3	Dálkoměr:	58
4.2.4	Meteorologická stanice:	59
4.2.5	Pomocná technika	59
4.3	Měřené prostředky	60
4.3.1	Smykem řízený nakladač Bobcat S175.....	60

4.3.2	Kolový traktor Claas 420 Arion	60
4.3.3	Kolový traktor Zetor 8011	61
4.3.4	Pick-up Mitsubishi L200	61
4.4	Postup měření	62
4.4.1	Prostředí měření	62
4.4.2	Instalace meteorologické stanice	62
4.4.3	Kalibrace hlukoměrů	62
4.4.4	Metodika měření	62
4.4.5	Měření	63
5.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	64
5.1	Zpracování naměřených hodnot.....	64
5.2	Použité vzorce	64
5.3	Výsledné hodnoty a jejich vyhodnocení	65
5.3.1	Smykem řízený nakladač Bobcat S175.....	65
5.3.1.1	Meteorologické podmínky	65
5.3.1.2	Hluk při volnoběžných otáčkách	66
5.3.1.3	Hluk při zvýšených otáčkách (2650 ot*s ⁻¹)	67
5.3.1.4	Hluk při jízdě zkoušce	68
5.3.2	Kolový traktor Claas 420 Arion	69
5.3.2.1	Meteorologické podmínky	69
5.3.2.2	Hluk při volnoběžných otáčkách	70
5.3.2.3	Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s ⁻¹)	71
5.3.2.4	Hluk při jízdě zkoušce	72
5.3.3	Kolový traktor Zetor 8011	73
5.3.3.1	Meteorologické podmínky	73
5.3.3.2	Hluk při volnoběžných otáčkách	74
5.3.3.3	Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s ⁻¹)	75
5.3.3.4	Hluk při jízdě zkoušce	76
5.3.4	Pick-up Mitsubishi L200	77
5.3.4.1	Meteorologické podmínky	77
5.3.4.2	Hluk při volnoběžných otáčkách	78
5.3.4.3	Hluk při zvýšených otáčkách (3000 ot*s ⁻¹)	79
5.3.4.4	Hluk při jízdě zkoušce	80
5.3.5	Porovnání hodnot	81

6. DISKUZE	85
6.1 Návrh opatření pro snížení hlukové zátěže	88
6.1.1 Osobní ochranné pomůcky	88
6.1.2 Dodatečné odhlučnění	88
6.1.3 Koupě nového stroje	89
6.1.4 Vyhodnocení	89
7. ZÁVĚR	90
8. PŘÍLOHY	91
9. POUŽITÁ LITERATURA	93

1. Úvod

S rozvojem techniky na začátku 20. století docházelo k nahrazování lidské a zvířecí síly silou produkovanou motory. Z dnešního pohledu to byly motory značně hlučné, a tak při vývoji byl nemalý požadavek kladen i na snížení jejich hlučnosti. Nadměrný hluk je skoro synonymem pro 21. století a setkáváme se s ním prakticky všude, i na venkově. V této diplomové práci si kladu za cíl změřit míru hlučnosti (hladinu akustického tlaku) v různých režimech práce motoru u zemědělských strojů, zhodnotit hlukovou zátěž obsluhy a případně navrhnout opatření pro její snížení.

2. Cíl diplomové práce

V literární rešerši se zaměřit na vývoj konstrukce spalovacího motoru v mobilních energetických prostředcích, hluk a jeho vznik, šíření a účinky na lidský organizmus a zdroje hluku u spalovacího motoru energetických prostředků.

V praktické části zjistit hladiny akustického tlaku u mobilních energetických prostředků používaných v zemědělství. Hladiny akustického tlaku zjistit v několika režimech práce motoru a zároveň provádět měření na dvou místech současně, a to v kabině a vně prostředku. Dále posoudit závislosti hlukových hladin na otáčkách motoru uvnitř a vně prostředku a zhodnotit hlukovou zátěž obsluhy a okolního prostředí, případně navrhnout opatření pro snížení hlukové hladiny.

3. Literární rešerše

3.1 Zvuk

3.1.1 Akustické vlnění (definice zvuku)

Podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí cca $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Její rychlost ve vodě je podstatně vyšší, přibližně $1440 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Frekvenční rozsah akustického vlnění, kterým se zabývá technická akustika, odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. Jinak akustika se zabývá mechanickými kmity v širším frekvenčním pásmu. Hovoří se potom o třech pásmech: o infrazvuku, slyšitelném pásmu a ultrazvuku.¹

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Vlnění od zdroje postupuje ve vlnoplochách ve směru zvukového paprsku tzv. rychlostí zvuku. Vlnoplochy jsou plochy v prostoru se stejnými akustickými veličinami. Zvukový paprsek je vždy kolmý na příslušné vlnoplochy. Částice prostředí se s postupující akustickou vlnou zhušťují a zředňují. Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh a zásadně se nepohybují se šířící se vlnou. Podle toho, zda částice kmitají ve směru vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na:

- podélné
- příčné.

U plynů a kapalin se vyskytuje pouze vlnění podélné, neboť tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů pevných se vyskytuje vlnění podélné i příčné, protože tyto materiály vykazují pružnost nejenom v tahu a tlaku, ale i ve smyku. Kombinací těchto deformací vzniká i kmitání ohybové.²

¹ Nový, Richard: Hluk a chvění, 1. vydání, Praha: ČVUT, 2009. 21 s. ISBN: 978-80-01-04347-9

² Mišun, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. 10 s. ISBN: 80-214-1262-3

3.1.2 Vlastnosti zvuku

Vlastnostmi zvuku jsou barva, výška a hlasitost.

3.1.2.1 Výška

Výška zvuku je dána jeho frekvencí, čím vyšší je frekvence, tím je vyšší výška. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje jejich frekvence absolutní výšku tónu. Absolutní výška tónu se měří přístroji pro měření zvukových frekvencí, za obvyklých podmínek ji nelze určit sluchem. Pro subjektivní hodnocení zvuku je důležitější relativní výška tónu, což je podíl frekvence daného tónu vůči frekvenci referenčního tónu. V technické praxi se jako základní (referenční) tón udává 1000 Hz (1 kHz).³

3.1.2.2 Barva

Skutečnost, že každý tón má pro naše ucho zcela charakteristický zvuk, způsobuje obsah vyšších harmonických tónů ve složeném tónu. Tuto vlastnost zvuků označujeme jako barvu tónu. Je určena nejen počtem vyšších harmonických tónů obsažených ve složeném tónu, ale také jejich amplitudami. Právě barva tónu umožňuje sluchem odlišit dva složené tóny, které mohou mít stejnou absolutní výšku a které jsou vydávány dvěma různými zdroji zvuku. Rozdílná barva zvuku různých zdrojů zvuku je dána různým způsobem vzniku zvuku v různých rezonátorech, které se liší tvarem, velikostí a materiálem.⁴

3.1.2.3 Hlasitost

Pro subjektivní vjem se používá pojem hlasitost, která je s fyzikálními veličinami pouze v určité – často i nepřesné – korelaci.⁵

Při stejné hodnotě akustického tlaku, avšak měnící se frekvenci, je subjektivně vnímaná hlasitost rozdílná. Pro přiblížení měřitelné veličiny subjektivnímu vjemu hlasitosti bez závislosti na frekvenci se užívá smluvních váhových křivek, které respektují frekvenční charakteristiku lidského sluchu.

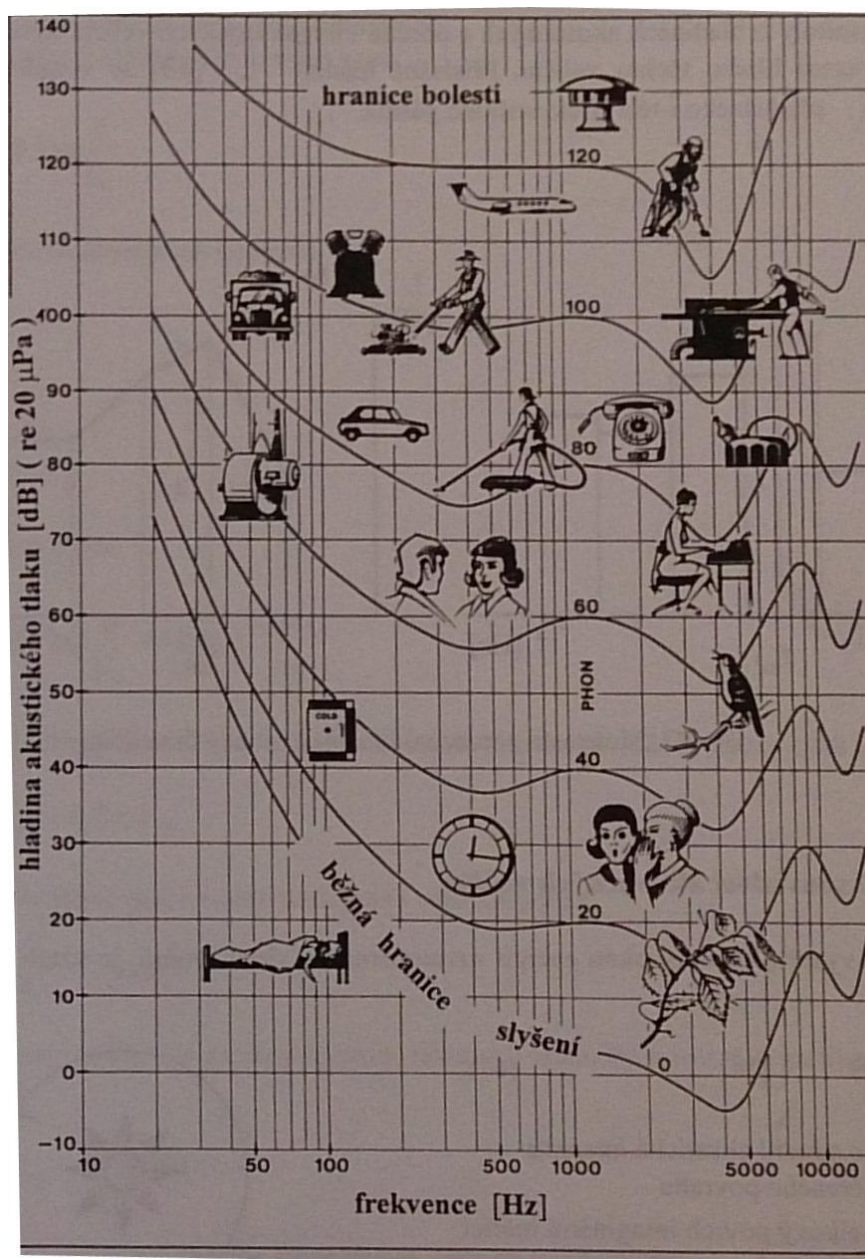
³ Anonym: Zvuk [online]. 15-03-2015 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk#Barva_zvuku>.

⁴ Reichl, Jaroslav, Všeticka, Martin: Barva tónu [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/195-barva-tonu>>.

⁵ Smetana, Ctirad: Hluk a vibrace, měření a hodnocení, 1. vydání, Praha: Sdělovací technika, 1998. 49 s. ISBN: 80-901936-2-5

Mezinárodně byly definovány čtyři takové křivky, označované A, B, C, D, nejpoužívanější a nejvíce vyžadovaná je váhová křivka A.⁶

Nejnižší křivka (0 dB) je prahová křivka slyšitelnosti a odpovídá přibližně nejslabším zvukům ještě postřehnutelných sluchovým orgánem. U hladin asi 125 dB se hovoří o prahu bolestivosti, neboť se vjem zvuku mění v pocit bolesti.⁷



Obrázek 1 Křivky hladin stejné hlasitosti (Mišun, 1998)

⁶ Anonym: Zvuk [online]. 15-03-2015 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk#Barva_zvuku>.

⁷ Smetana, Ctirad: Hluk a vibrace, měření a hodnocení, 1. vydání, Praha: Sdělovací technika, 1998. 51 s. ISBN: 80-901936-2-5

Normalizované křivky platí při těchto podmínkách:

- zvukový zdroj je umístěn čelně proti posluchači,
- zvukové vlny přicházejí k posluchači ve volném akustickém poli v rovinných vlnách,
- akustický tlak je měřen v místě poslechu bez přítomnosti posluchače,
- poslech je binaurální (oběma ušima),
- posluchač je ve věku 18 až 25 let a má normální sluch.

Prahová citlivost pro frekvenci 1000 Hz je rovna 4,2 dB proti vztažné hodnotě $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, tj. dříve stanovené prahové hodnotě. Doporučuje se proto rozlišovat mezi hodnotou prahovou (4,2 dB) a hodnotou vztažnou p_0 (0 dB).⁸

S rostoucím věkem se sluch zhoršuje, práh slyšitelnosti stoupá k vyšším akustickým intenzitám. Lidé nad 50 let neslyší zvuk nad 8 až 10 kHz. Prahy poznatelnosti:

- nejmenší pozorovatelná změna počítku přímým porovnáním je 1 dB (citlivé osoby),
- právě pozorovatelná změna hlasitosti je 3 dB,
- jednoznačně pozorovatelná změna hlasitosti je 5 dB,
- jako dvojnásobně vjemově hlasitý signál je posuzován nárůst hladiny akustického tlaku o asi 10 dB.⁹

⁸ Smetana, Ctirad: Měření hluku a chvění, Praha: SNTL, 1974. 56-57 s.

⁹ Smetana, Ctirad: Hluk a vibrace, měření a hodnocení, 1. vydání, Praha: Sdělovací technika, 1998. 51-53 s. ISBN: 80-901936-2-5

3.2 Základní pojmy v akustice

3.2.1 Akustický tlak

Zhušťování a zředování kmitajících částic prostředí odpovídá zvýšení či snížení tlaku v plynech a kapalinách. To znamená, že celkový tlak v daném prostředí se při šíření vlnění mění, tedy kolísá okolo původního statického nebo barometrického tlaku v ovzduší. Za akustický tlak p [Pa] je považována odchylka celkového tlaku (vzduchu nebo kapaliny) od tlaku statického při vlnění v daném prostředí. Akustický tlak je superponován na barometrický tlak p_b . Akustický tlak při vlnění o frekvenci f a fázovém posuvu φ má tvar harmonické funkce.

$$p_c = p_b + p(t) \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

$$\text{Kde: } p(t) = p_o * \cos(\omega t + \varphi) = p_o * \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (2)$$

Kde: p_o [Pa] – amplituda akustického tlaku,
 φ [°] – fázový posun, f [Hz] – frekvence.

Efektivní hodnota akustického tlaku je:¹⁰

$$p_{ef} = \frac{p_o}{\sqrt{2}} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

3.2.2 Akustický výkon

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Množství akustické energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, nazýváme akustickým výkonem W [W]. Akustický výkon je definován vztahem:

$$W = \vec{F} * \vec{v} = F * v = p * v * S \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Kde: p [Pa] – akustický tlak,
 v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost kmitání částic,
 S [m^2] – plocha.

Tento vztah platí pro rovinnou akustickou vlnu, kde jsou ve fázi akustický tlak a akustická rychlost. Každý zdroj hluku je definován akustickým výkonem jakožto

¹⁰ Mišun, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. 14-15 s. ISBN: 80-214-1262-3

základním parametrem akustického výstupu. Je to výhodnější než definice akustickým tlakem, protože akustický tlak závisí na mnoha vnějších faktorech (vzdálenost od zdroje, teplotní gradient, rychlostní gradient atd.).¹¹

3.2.3 Akustická intenzita

Akustická intenzita je přímo vztažena k akustickému výkonu. Je to vektorová veličina popisující množství a směr toku akustické energie v daném místě prostředí. Vektor akustické intenzity je časově průměrovaný součin okamžitého akustického tlaku $p(t)$ a odpovídající okamžité rychlosti $v(t)$ kmitajících částic v prostředí v témže místě:

$$I = p(t) * v(t) \quad [\text{W} * \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

nebo ve směru r pak je:

$$I_r = \overline{p(t) * v_r(t)} \quad [\text{W} * \text{m}^{-2}] \quad (6)$$

Kde v_r je rychlost kmitání částic ve směru r .

Důležitou vlastností akustické intenzity je její směrovost, která určuje směr šíření akustického vlnění. Kolmo na směr vlnění je akustická intenzita rovna nule. Tuto vlastnost nemá akustický tlak, který je skalární veličinou. Akustické zdroje mohou být uvažovány jako bodové zdroje, pokud jejich rozměry jsou malé v porovnání k jejich vzdálenosti od příjemce nebo měřícího bodu. U bodového zdroje se akustická energie šíří rovnoměrně do všech směrů, takže s narůstající vzdáleností od zdroje se rozprostírá do stále větší prostorové plochy. Pokud neuvažujeme ztráty vlněním, pak výstupní výkon zdroje prochází sférickou plochou poloměru r . Akustická intenzita této plochy pak je:

$$I_1 = \frac{P}{4 * \pi * r^2} \quad [\text{W} * \text{m}^{-2}] \quad (7)$$

Akustická intenzita je inverzně úměrná čtverci vzdálenosti mezi zdrojem a příjemcem, tj. zeslabí se o 6 dB při každém dalším dvojnásobku vzdálenosti.¹²

¹¹ Mišun, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. 15 s. ISBN: 80-214-1262-3

¹² Mišun, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. 15-17 s. ISBN: 80-214-1262-3

3.2.4 Vlnová délka

Délka vlny λ [m] je vzdálenost mezi nejbližšími dvěma body bodové řady, u nichž je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Jinak lze říci, že je to vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jednoho kmitu T . Délka vlny je důležitým akustickým parametrem, který umožňuje modelování v akustice. Mezi délkou vlny, frekvencí a rychlostí šíření zvuku platí následující vztah:¹³

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

Kde: c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost šíření zvuku,
 λ [m] – vlnová délka,
 f [s^{-1}] – frekvence.

3.2.5 Akustická rychlost

Je to rychlost, kterou se šíří částice v prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Je to vektor. Pro rovinnou vlnu platí vztah:

$$v = \frac{p}{\rho \cdot c} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

Kde: ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – hustota prostředí,
 c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost šíření zvuku v daném prostředí,
 p [Pa] – tlak.¹⁴

3.2.6 Rychlost šíření zvuku

Je to rychlost, kam dospěje zvuk od zdroje za 1 sekundu. Pro rychlost šíření zvuku platí vztah:

$$c = \lambda \cdot f \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Kde: c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost šíření zvuku,
 λ [m] – vlnová délka,
 f [s^{-1}] – frekvence.¹⁵

¹³ Nový, Richard: Hluk a chvění, 1. vydání, Praha: ČVUT, 2009. 28 s. ISBN: 978-80-01-04347-9

¹⁴ Jaksch, Ivan: Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky, Liberec: TUL, 2010. 3 s.

¹⁵ Jaksch, Ivan: Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky, Liberec: TUL, 2010. 3 s.

3.2.7 Frekvence

Frekvence udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek. Pro frekvenci platí vztah:

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

Kde: f [Hz] – frekvence,
 T [s] – čas.¹⁶

3.2.8 Decibelové stupnice

3.2.8.1 Hladina akustického výkonu

Protože se veličiny probrané v předchozích kapitolách v praxi mění o několik mnoho řádů, pro snazší vyjádření závislostí se používají logaritmické stupnice. Z uvedených důvodů byl v technické akustice zaveden pojem „hladin“ jednotlivých akustických veličin, jejichž jednotkou je decibel [dB]. Hladina akustického výkonu L_w je definována vztahem:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Kde: W_0 [W] – referenční akustický výkon, $W_0 = 10^{-12}$ W,
 W [W] – sledovaný akustický výkon.

Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu o 10 dB. Je nezbytné uvádět u hladin akustického výkonu frekvenci, resp. rozsah frekvencí, ke kterým daná hodnota přísluší.¹⁷

3.2.8.2 Hladina akustického tlaku

Lidské ucho je schopno zachytit zvukový signál, který odpovídá dvaceti miliontinám základní jednotky 1 Pa, což je akustický tlak 20 μ Pa. Tato hodnota vyvolává vychýlení membrány lidského sluchového orgánu o hodnotu menší než je průměr jednoho jediného atomu. Na druhé straně lidské ucho zvládne hodnoty více než 10^6 krát větší. Proto by bylo vyjadřování hodnot velice nepřehledné stejně jako u akustického výkonu, takže i pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina,

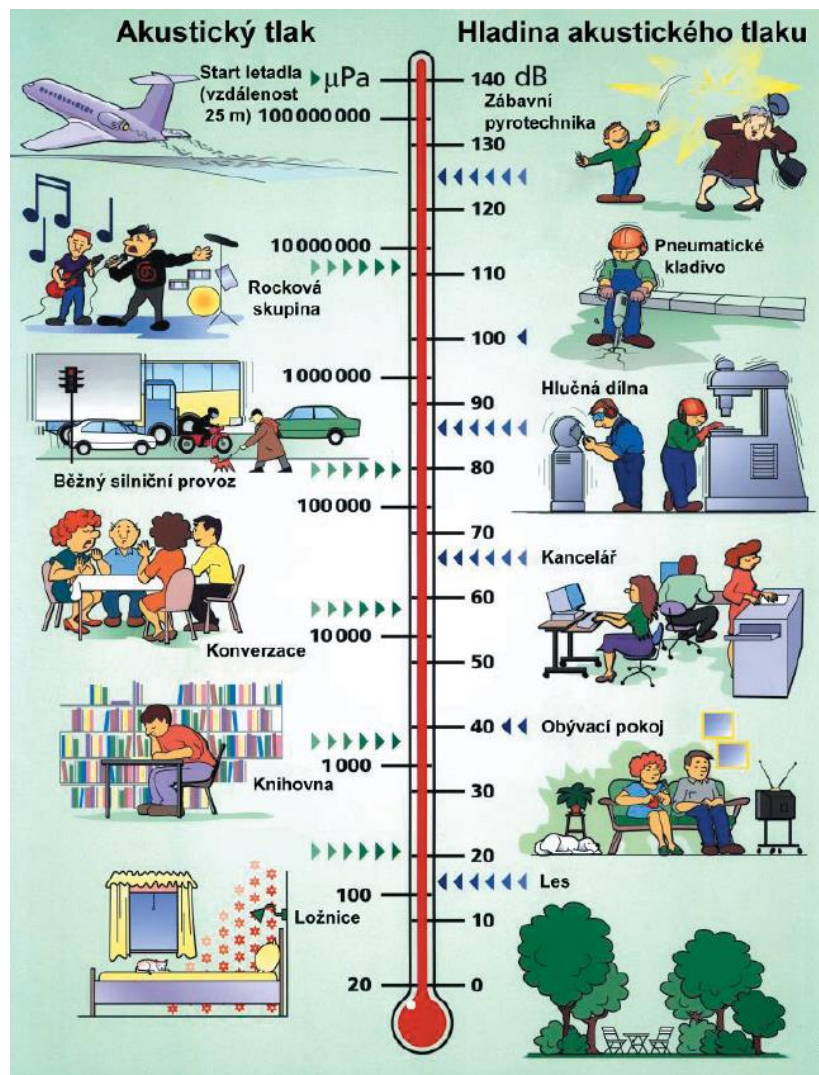
¹⁶ Anonym: Frekvence [online]. 2015-01-30 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Frekvence>>

¹⁷ Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 21 s.

kteřou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu, nebo pásmu kmitočtů. Jinak nemá pouhý údaj hladiny akustického tlaku význam, neboť nevyovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose. Hladina akustického tlaku L_p [dB] je definována vztahem:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

Kde: p [Pa] – sledovaný akustický tlak (efektivní hodnota),
 p_0 [Pa] – referenční akustický tlak.



Obrázek 2 Závislost mezi akustickým tlakem a hladinou akustického tlaku (Bruel a Kjaer, 2005)

Tato logaritmická stupnice má jako výchozí bod prahovou hodnotu (referenční) akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, čemuž odpovídá v decibelové stupnici 0 dB. Každému zdesateronásobení akustického tlaku v [Pa] odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB. K výhodám logaritmické stupnice s jednotkami v [dB]

patří také to, že lépe vystihuje subjektivní sluchový vjem relativní hlasitosti než lineární stupnice s jednotkami v [Pa].¹⁸

Výpočet ekvivalentní hladiny akustického tlaku je dle vztahu:

$$L_{aeqT} = 10 \log \frac{[\sum(t_i * 10^{0,1L_{Ai}})]}{T} \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

Kde: L_{aeqT} [dB] – ekvivalentní hladina akustického tlaku,

L_{Ai} – naměřená A hladina akustického tlaku,

t_i – délka i-tého intervalu působení hladiny L_{Ai} ,

T – suma délek t_i .¹⁹

3.2.8.3 Hladina akustické intenzity

Hladina akustické intenzity je definována vztahem:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

Kde: I [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] – intenzita zvuku sledovaného akustického signálu,

I_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] – referenční hodnota intenzity zvuku.

Pro frekvenční šíři pásma 1 Hz je hodnota konstantní. Pro širší kmitočtové pásmo musí být obsaženo větší množství akustické energie, protože platí zákon o zachování energie. Intenzitu zvuku v pásmu o šíři Δf je možno vyjádřit vztahem:

$$I = I_1 * \Delta f \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16)$$

Kde: I_1 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] – intenzita zvuku pro šíři pásma 1 Hz,

Δf [Hz] – šíře frekvenčního pásma.²⁰

¹⁸ Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 21-22 s.

¹⁹ Nový, Richard: Hluk a chvění, 1. vydání, Praha: ČVUT, 2009. 93 s. ISBN: 978-80-01-04347-9

²⁰ Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 22-23 s.

3.3 Hluk

3.3.1 Definice hluku

Jako hluk se dá označit jakýkoliv zvuk, který je nežádoucí. Přesná formulace, jak hluk fyzikálně definovat není, protože záleží na vztahu člověka k danému zvuku. To znamená, že co je pro jednoho člověka už hluk, pro druhého to může být důležitý zdroj informací.²¹ Protože hluk je zvuk, jeho vznik je stejný, což bylo popsáno v kapitole 3.1.1.

3.3.2 Šíření hluku

3.3.2.1 Ve volném prostoru

Při řešení snižování hluku je důležitý pokles intenzity hluku v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Pokud se uvažuje bodový zdroj a pozorovatel je ve vzdálenosti větší než je vlnová délka kontrolovaného signálu, potom platí vztah:

$$W = I * S \quad [W] \quad (17)$$

Kde: W [W] – výkon,
 I [$W \cdot m^{-2}$] – intenzita zvuku,
 S [m^2] – plocha.

Jelikož většina praktických zdrojů zvuku vyzařuje nerovnoměrně do všech směrů, vynutila si praxe zavedení nového pojmu: činitel směrovosti Q [-], jehož definice plyne ze vztahu:

$$Q = \frac{I(\vartheta)}{I_m} \quad [-] \quad (18)$$

Kde: $I(\vartheta)$ [$W \cdot m^{-2}$] – intenzita hluku ve směru prostorového úhlu ϑ .

Z uvedených vztahu platí, že se intenzita zvuku mění nepřímo úměrně v závislosti na poměru kvadrátu vzdáleností.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (19)$$

²¹ Nový, Richard: Hluk a chvění, 1. vydání, Praha: ČVUT, 2009. 14 s. ISBN: 978-80-01-04347-9

Ze známé hladiny akustického výkonu L_w se vypočte hladina akustického tlaku vztahem:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

Kde: L_p [dB] – hladina akustického tlaku,
 L_w [dB] – hladina akustického výkonu,
 r [m] – vzdálenost od myšleného středu akustického zářiče,
 Q [-] – směrový činitel pro daný směr.

Z tohoto vztahu platí pokles hodnoty akustického tlaku o 6 dB při zdvojnásobení vzdálenosti od zdroje.²²

3.3.2.2 V uzavřeném prostoru

V uzavřeném prostoru se šíří zvuk všemi směry, ve chvíli kdy narazí na překážku, nedojde nikdy k dokonalému pohlcení, ale část se odrazí zpět do prostoru. Vznikají tak odražené vlny, které se navzájem kříží a překrývají. Hladina akustického tlaku se tak skládá ze dvou částí, jedna je pole přímých vln, druhá pole odražených vln. Hladina akustického tlaku v uzavřeném prostoru se vypočítá ze vztahu:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4*(1-\alpha_m)}{S\alpha_m} \right] \quad [\text{dB}] \quad (21)$$

$\frac{Q}{4\pi r^2}$ – vztah pro přímé vlny,

$\frac{4*(1-\alpha_m)}{S\alpha_m}$ – vztah pro odražené vlny.²³

3.3.3 Účinky hluku na lidský organismus

Vliv hluku na člověka je bezesporu škodlivý, rušivý, nepříjemný a tedy i nežádoucí. Podle časového hlediska lze účinek hluku posuzovat v okamžiku působení hluku jako ztrátu koncentrace, snížení pracovní aktivity atd. nebo jako následky působení vyšších hladin hluku, se kterými osoba přišla do styku v minulosti. Působí-li hluk na člověka dlouhodobě, dochází k posunu sluchového

²² Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 28-29 s.

²³ Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 31-33 s.

prahu již po několika minutách. Sluchový orgán se rychle adaptuje a hluk vnímá s menší hlasitostí. Po 7 až 10 minutách dochází ke sluchové únavě, která odeznívá velmi pomalu, celé hodiny i celý den. Při dlouhodobém pobytu v prostředí s hladinou akustického tlaku nad 85 dB dochází často k trvalému porušení sluchu nazývanému „sluchové trauma“, což je jev častý u hudebníků. K poškození sluchu může dojít i krátkodobými akustickými podněty, např. výbuchem, který může vést k poranění bubínku. Bolest ve sluchovém orgánu se pociťuje při hladině hluku 130 dB, k protržení bubínku dochází při 160 dB. Je prokázáno, že u osob, které byly vystaveny hluku po dobu 20 let, dochází k profesionální nedoslýchavosti, v oblasti vysokých kmitočtů ke snížení sluchového prahu až o 50 dB. Z hlediska současného působení hluku na člověka lze hluk rozlišovat podle délky působení na:

- ustálený, jeho hladina se v čase nemění o více jak 5 dB,
- proměnný, hladina se v čase mění,
- přerušovaný, měnící se náhle,
- impulsní, který je vytvářen řadou jednotlivých impulsů.

Kromě sluchového orgánu může hladina hluku mít vliv i na psychiku a fyziologii člověka (otevírání či zavírání dveří v nočním tichu, nebo průlet komára). Nepříjemné pocity se dostávají i při nezvykle nízkých hladinách hluku (v bezodrazové komoře), až při hladině hluku okolo 30 dB se člověk cítí příjemně.²⁴

Ultrazvuk je zvuk nad slyšitelnou oblastí, tj. 20 kHz až do kmitočtu 20 MHz a více. S těmito frekvencemi se setkávají pracovníci v lékařství, při aplikaci ultrazvuku v terapii a diagnostice nebo při zkouškách materiálu nedestruktivními metodami či čištění, broušení. Biologické účinky jsou často velmi složitě definovatelné, protože vliv ultrazvuku je převážně doprovázen dalšími vlivy (vibracemi a hlukem ve slyšitelném pásmu), které lze nesnadno oddělit. V lékařství jsou stanoveny maximální přípustné hodnoty pro aplikaci ultrazvuku v terapii na $30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ po dobu maximálně 15 minut, v diagnostice $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ po dobu do 500 s. Infrazvuk je zvuk pod slyšitelnou oblastí, tj. od 0,1 Hz do 16 Hz. Vznik infrazvuku je v přírodě spojován s pohybem rozměrných objektů, zemětřesení a erupce sopek. Nebo i hluk leteckých motorů v prostorách mezi bloky domů může vyvolat rezonanci v této

²⁴ Beran, Vlastimil: Chvění a hluk, Plzeň: ZČU v Plzni, 2010. 127 s. ISBN: 978-80-7043-916-6

oblasti. Kromě bolení hlavy způsobují vyšší hladiny hluku (140 až 160 dB) zvýšení únavy, pocit bolesti v uchu, poruchy spánku až sklon k sebevraždám. Infrazvuk je téměř nemožno utlumit a zatím nebylo zjištěno, které části těla jsou na něj citlivé. Uvádí se, že by to mohla být lícní kost a oblast nad krajinou břišní.²⁵

Hluk na pracovišti se počítá pro osmihodinovou pracovní dobu, pro kterou je za základ považována hladina 85 dB_A, která se podle povahy vykonávané práce koriguje, převážně směrem k nižším hladinám, viz tabulka 1.²⁶

Tabulka 1 Výpočet hluku a infrazvuku na pracovišti (Beran, 2010)

Druh činnosti	Nároky	Korekce [dB]
1. Práce koncepční s převahou tvořivého myšlení		- 40
2. Duševní práce velmi náročná a zodpovědná	mimořádné běžné	-35 -30
3. Duševní práce vyžadující značnou pozornost a soustředění	mimořádné běžné	-25 -20
4. Duševní práce rutinní povahy s trvalou kontrolou sluchem	mimořádné běžné	-15 -10
5. Fyzická práce náročná na přesnost a soustředění		-5
6. Fyzická práce bez nároků na soustředění		0
7. Fyzická práce bez zvláštních nároků na smyslovou činnost		+5

3.3.4 Legislativa

Přípustné limity hluku na pracovišti byly stanoveny nařízením vlády č. 272/2011 Sb., které v § 3, bod (1) stanovuje limit hluku na pracovišti po dobu 8 hodin na 85 dB. Pokud je hluk na pracovišti nad 80 dB, stanovuje § 9, bod (3) písmene f) mimo jiné správné používání osobních ochranných pracovních prostředků. Bod (6) v § 9 stanovuje přestávky při expozici hluku překračující přípustný expoziční limit, a to po maximálně 2 h práce 15 min přestávka, dále jsou přestávky po 10 min.

Pro chráněné venkovní prostory se stanovuje L_{aeqT} pro 8 nejhluchnějších hodin během dne, pro noc jde o jednu nejhluchnější hodinu dle § 12 bodu (1). Limit stanovuje § 12, bod (3) na 50 dB.²⁷

²⁵ Beran, Vlastimil: Chvění a hluk, Plzeň: ZČU v Plzni, 2010. 127-128 s. ISBN: 978-80-7043-916-6

²⁶ Tamtéž. 128 s.

3.4 Vývoj konstrukce spalovacího motoru v mobilních energetických prostředcích

Motory pro pohon dopravních prostředků prodělaly dlouhý vývoj. Na začátku byly motory s vnějším spalováním, kdy přenos energie zajišťovala např. vodní pára. Později přišly motory s vnitřním spalováním, u kterých je pracovní látka přímo produkt spalování, např. nafta, benzin atd. Motory s vnitřním spalováním lze rozdělit podle procesu hoření:

- přerušovaně = pístové motory (vratný nebo rotační pohyb pístu a využita je především potenciální energie spalin),
- kontinuálně = lopatkové motory (spalovací turbíny a využita je především kinetická energie spalin).

Pro pohon mobilních dopravních prostředků je v převážné míře používán motor pístový.²⁸

3.4.1 Rozdělení pístových spalovacích motorů

Pístové spalovací motory lze dělit podle mnoha kritérií, např. podle druhu paliva (plynné x kapalné), podle principu činnosti (čtyřdobé x dvoudobé motory) či podle způsobu plnění válce (plněné podtlakem x plněné přetlakem). Velice často užívané rozdělení, považované za základní dle normy (ČSN 09 0022 - Spalovací motory. Názvosloví pístových spalovacích motorů. Druhy motorů.), je však podle způsobu zapálení směsi. Motory s umělým zažehnutím, využívající elektrickou jiskru, se nazývají **zážehové** a motory se samočinným vznícením, ke vznícení dojde po vstříknutí paliva do vzduchu zahřátého na vyšší teplotu než je zápalná teplota paliva, se nazývají **vznětové**.²⁹

²⁷ Sbírka zákonů č. 272/2011, Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací ze dne 24. srpna 2011.

²⁸ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 3-4 s. ISBN 80-238-8756-4.

²⁹ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 3 – motory, 5. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 9 s. ISBN 978-80-87143-06-3.

3.4.2 Historie, charakteristika, paliva a vývoj vznětového motoru

V zemědělství u dopravních prostředků (traktor, nákladní vozidla, pick-upy, manipulátory atd.) se používají především motory čtyřdobé vznětové, na které je tato diplomová práce zaměřena.

3.4.2.1 Historie - vznik

V roce 1893 sestrojil Rudolf Diesel vznětový motor zapalující palivo kompresním teplem.³⁰ V roce 1927 bylo vyrobeno první nákladní vozidlo a 1936 první osobní vozidlo se vznětovým motorem.³¹

3.4.2.2 Princip činnosti čtyřdobého vznětového motoru

Pracovní proces čtyřdobého motoru probíhá během dvou otáček klikové hřídele (720°) a je složen z následujících fází:

- 1) Sání (sací ventil otevřen, výfukový uzavřen, píst se pohybuje z horní do dolní úvratě a dochází k nasávání vzduchu do válce, těsně za dolní úvratí se sací ventil uzavře – využití energie vzduchu).
- 2) Komprese (sací i výfukový ventil je uzavřen, píst se pohybuje z dolní do horní úvratě a dochází ke stlačování vzduchu nad pístem, těsně před horní úvratí se začne vstříkovat palivo do válce).
- 3) Expanze (vlivem kompresního tepla dojde k samovznícení směsi, ve válci roste teplota a tlak, kterým je píst tlačěn z horní do dolní úvratě a přes ojnici dochází k roztáčení klikové hřídele).
- 4) Výfuk (těsně před dolní úvratí se otevře výfukový ventil, píst se pohybuje z dolní do horní úvratě, dochází k vytlačování výfukových plynů, výfukový ventil se uzavře těsně za horní úvratí – využití energie spalin, sací ventil se otevírá těsně před horní úvratí – vzduch proudí bez prodlevy do válce).

Vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu. Teoreticky na 1 kg nafty je k dokonalému spálení zapotřebí 14,3 – 14,5 kg vzduchu, motor ale při chodu

³⁰ Bureš, Oldřich a kol.: Traktory a automobily, 1. vydání, Praha: SZN, 1980. 7 s.

³¹ Bosch GmbH: Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory, 1. vydání, Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2005. 9 s.

naprázdno pracuje s mimořádně chudou směsí se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 3,4$ i více, při plném zatížení se součinitelem $\lambda = 1,3 - 2$.³²

3.4.2.3 Požadavky na motor používaný v zemědělských mobilních zařízeních

Na motor jsou kromě obecných požadavků, viz tabulka 2, kladeny speciální požadavky, vycházející z podmínek provozu:

- trvalý provoz při maximálním výkonu,
- provoz při velkém kolísání zatížení,
- vysoké převýšení točivého momentu,
- práce motoru v širokém rozmezí otáček s konstantním výkonem.³³

Tabulka 2 Obecné požadavky na motor dle různých hledisek (Bauer, 2006)

Legislativa	Zákazník	Výrobce
výfukové emise	spotřeba paliva	nenáročnost výroby
spotřeba paliva a emise	životnost	kvalita
hluk	výkon	výrobní náklady
recyklovatelnost	spolehlivost	zisk
bezpečnost	údržba	trh a konkurence
	cena	sériovost výroby

3.4.2.4 Paliva

Princip vznětového motoru umožňuje použití více druhů paliv, nejrozšířenějším pro menší rychloběžné motory používané v mobilních dopravních zařízeních je však motorová nafta a dále alternativně bionafta, případně zatím minoritně zastoupený zemní plyn.

3.4.2.4.1 Motorová nafta

Nafta vyráběná u nás je podle normy ČSN EN 590 (65 6506) a patří do první skupiny paliv vznětových motorů. Získává se frakční destilací ropy a bod varu má mezi 150 – 360 °C. V dalším kroku se motorová nafta vyrábí mísením petroleje a plynových olejů, vzájemný podíl složek je dán požadavky provozu při nízkých teplotách. U nafty se sleduje řada parametrů: hustota, kinematická viskozita, bod vzplanutí, cetanové číslo, filtrovatelnost a výhřevnost, hodnoty viz tabulka 4 v kapitole „Bionafta“, a dále pak obsah síry, bod tuhnutí a teplota vylučování

³² Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 10-12 s.

³³ Tamtéž. 10-11 s.

parafinů. Nízkoteplotní vlastnosti motorové nafty patří mezi nejdůležitější parametry. Nafta obsahuje složky, které mají při nižších teplotách sklon krystalizovat a dále pak vytvářet krystalickou mříž, která znemožňuje tekutost kapaliny. Nízkoteplotní vlastnosti se popisují parametry:

- teplota vylučování parafinů CP (teplota, při níž se nafta začíná kalit vyloučenými krystalky parafinu, při dosažení bodu zákalu je však nafta ještě velmi dobře tekutá, při dalším snižování teploty se podíl vyloučených parafinů zvětšuje a dochází k usazování v čističi paliva),
- teplota filtrovatelnosti CFPP (teplota, při níž parafinové částice kompletně pokryjí čistič paliva a dojde ke ztrátě filtrovatelnosti – z provozního hlediska je tento parametr nejdůležitější, třídění viz tabulka 3),
- bod tuhnutí (teplota, při níž je množství vyloučených parafinových částic tak velké (zvýšení viskozity), že dojde ke ztrátě tekutosti, jde o parametr důležitý při manipulaci s naftou).

Tabulka 3 Dělení motorové nafty podle teploty filtrovatelnosti (Ždánský, Jan, 2008)

Klasické nafty		Arktické nafty	
Třída	CFPP [°C]	Třída	CFPP [°C]
A	+5	1	-20
B	0	2	-26
C	-5	3	-32
D	-10	4	-38
E	-15	5	-44
F	-20		

U nás se používají nafty klasické, arktické nafty se ve střední Evropě používají výjimečně.³⁴

3.4.2.4.2 Bionafta

Bionafta je v EU i ČR definována jako FAME, což jsou metylestery mastných kyselin. Pokud je bionafta vyráběna výhradně z řepkového oleje, označujeme ji jako MEŘO - metylester řepkového oleje. Jde o chemicky upravený

³⁴ Motejl, Vladimír, Horejš, Karel a kol: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, 3. vydání, Brno: Littera, 2004. 213-215 s. ISBN 80-85763-24-9.
Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 12-14 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

řepkový olej a cílem této úpravy je přiblížit výsledné vlastnosti tohoto paliva parametrům klasické motorové nafty vyráběné z ropy. Čistá bionafta se označuje jako B100 dle evropské a české normy (EN ČSN 14214+A1: Kapalné ropné výrobky - Methylestery mastných kyselin (FAME) pro vznětové motory a topné oleje - Technické požadavky a metody zkoušení).

Tabulka 4 - Porovnání typických vlastností řepkového oleje, MEŘO a motorové nafty (Pokorný, 1998)

Vlastnosti	Měrné jednotky	Řepkový olej	MEŘO	Motorová nafta
Hustota při 15°C	kg*m ⁻³	915	880	840
Kinematická viskozita při 20°C	mm ² *s ⁻¹	98	7,5	6,5
Bod vzplanutí	°C	300	130	75
Cetanové číslo		40	52	50
Filtrovatelnost (CFPP)	°C	15	-10	0/-10/-20 (dle způsobu aditivace)
Výhřevnost	MJ*kg ⁻¹	36	37,1	42,5

Směs motorové nafty a MEŘO, označovaná jako SMN B30, musí mít obsah metylesteru řepkového oleje vyšší jak 30 % hmotnosti, maximálně však 36 % hmotnosti, toto definuje norma ČSN 65 6508. U této směsi bývají při prodeji použita i obchodní označení: biodiesel B30, ekodiesel atd.³⁵

Provoz na B100 či SMN B30 musí povolovat výrobce motoru.

3.4.2.4.3 Zemní plyn

Zemní plyn jako palivo motorů zažívá v posledních letech růst, jedná se o ekologické palivo a je pravděpodobné, že se se zemním plynem u dopravních zařízení budeme setkávat častěji než doposud.

Ložiska zemního plynu se velice často vyskytují spolu s ložisky ropy – naftový zemní plyn, případně s ložisky uhlí – karbonský zemní plyn. Zemní plyn je

³⁵ Pokorný, Zdeněk: Bionafta ekologické alternativní palivo do vznětových motorů, 1. vydání, Praha: Institut výchovy a vzdělávání MZe ČR, 1998. 3-4 s. ISBN 80-7105-173-X. Bažata, Miroslav: Bionafta a směsná motorová nafta. Biom.cz [online]. 2013-05-06 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bionafta-a-smesna-motorova-nafta>>. ISSN: 1801-2655.

tvořen až z 99 % objemu metanem. Je skladován ve dvou formách, v plynné (CNG) a kapalné (LNG).³⁶

Pokud je motor dopravního zařízení poháněn čistě zemním plynem, mluvíme o monovalentním pohonu, v případě, že je zemní plyn kombinován s jiným druhem paliva, mluvíme o bivalentním pohonu. V případě vznětového motoru je třeba vyřešit zapálení směsi zemního plynu se vzduchem. Jedna z možností je zapalování směsi vstříknutím malého množství nafty, jde o zhruba 30%, při menším množství vstříkované nafty je obtížné zajistit chlazení vstříkovací trysky. Výhodou těchto motorů je, že jsou schopny provozu jen na samotnou naftu, nevýhodou, že mají o 20 – 25 % vyšší spotřebu, emisní hodnoty jsou však stále značně lepší než motory provozované na naftu. Další systém je DING, který pracuje v podstatě na stejném principu jako systém common rail (viz kapitola 3.4.2.6.6 Vstříkovací systém s tlakovým zásobníkem (common rail – CR)) s tím rozdílem, že kompresní teplo je pro vznícení zemního plynu nedostatečné a je zajištěno žhavicí svíčkou. Účinnost, výkon, spotřeba i emise takového motoru jsou lepší než u motoru spalujícího motorovou naftu. K plnění nádrží dochází zpravidla přes noc, jedná se o pomalý proces.³⁷

3.4.2.5 Vstříkování motorové nafty (bionafty)

Účelem vstříkování je, aby se palivo dostalo do válce, v němž dojde ke vznícení, a zároveň před samotným vznícením, případně i během hoření se dobře promísilo se vzduchem.³⁸

3.4.2.5.1 Nepřímé vstříkování

Dnes u již velmi málo používaného nepřímého vstříkování se palivo nevstříkuje přímo do hlavního spalovacího prostoru, ale do jeho oddělené části – vírové komůrky, spojené s hlavním spalovacím prostorem tangenciálním kanálem. Objem vírové komůrky je přibližně 25 až 40% objemu spalovacího prostoru. U nepřímého vstříkování se používají čepové trysky, s otevíracími tlaky 10 až 14 MPa. Provedením čepu na konci jehly trysky a různým průměrem tohoto čepu se mění tvar

³⁶ GAS s.r.o.: Co je zemní plyn [online]. 2007-2010 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.zemniplyn.cz/plyn/>>.

³⁷ Kameš, Josef: Alternativní pohon automobilů, 1. vydání, Praha: BEN – technická literatura, 2004. 27-35 s. ISBN 80-7300-127-6.

³⁸ Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 281 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

kužele vstřikovaného paliva dle potřeby konstrukce motoru. Platí, že válcový čep vytváří velmi úzký kužel vstřikovaného paliva, naproti tomu kuželový čep vytváří široký kužel paliva. Tvar kužele vstřikovaného paliva na vytvoření směsi paliva se vzduchem nemá až takový podíl, promísení směsi ovlivňuje především účinek víru nasátého vzduchu. Ten vzniká v průběhu kompresního zdvihu, kdy je vzduch vtlačován do vírové komůrky. V ní je vysoká teplota zkracující prodlevu vznícení paliva, nicméně i nedostatek vzduchu, respektive kyslíku, což vyvolá krakování paliva. Krakování spolu s nedostatkem kyslíku vede k pomalému a neúplnému spalování v komůrce. Jak po vznícení směsi naroste v komůrce tlak, dojde k vytlačení směsi vysokou rychlostí do hlavního spalovacího prostoru, kde se spalování dokončí a krakované palivo shoří bez vytvoření sazí.³⁹

3.4.2.5.2 Přímé vstřikování

U přímého vstřikování se palivo vstřikuje přímo do spalovacího prostoru nad píst, ve kterém je zpravidla vytvořena prohlubeň – spalovací prostor. Spalovacích prostorů je více druhů:

- válcový (miskový),
- Hasselman,
- Man,
- toroidní,
- Sauer,
- kulovitý s termickým způsobem tvoření směsi,
- polokulovitý.

Vstřikovací tryska je umístěná ve středu a zpravidla šikmo dolů. U tohoto provedení vstřikování se používají trysky otvorové s o něco vyššími otevíracími tlaky, 15 až 25 MPa. U otvorových trysek se mění hloubka vniku paprsků paliva do spalovacího prostoru pomocí změn průměru a délky vstřikovacích otvorů trysky. Při nasávání vzduchu dochází k jeho krouživému pohybu díky vhodně tvarovanému sacímu kanálu, nebo clonami na sacích ventilech, případně úpravami spalovacího prostoru.

³⁹ Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 281-282 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

Vzniklé víření vzduchu podporuje rovnoměrné rozdělení paliva v celém spalovacím prostoru.⁴⁰

Oproti nepřímému vstřikování jsou výhody:

- jednoduchý kompaktní spalovací prostor, jednodušší konstrukce hlavy válců,
- lepší víření vzduchu (tvorba směsi),
- malý poměr povrchu k objemu spalovacího prostoru (lepší studené starty),
- nižší měrná spotřeba paliva.

Nevýhody:

- vyšší hlučnost a vibrace,
- vyšší nároky na vstřikovací zařízení.⁴¹

3.4.2.6 Vývoj vstřikovacího systému vznětových motorů

U vznětového motoru spalujícího motorovou naftu (bionaftu) je vývoj spjat ve velké míře s vývojem vstřikovacího systému, provedení celých palivových soustav v této diplomové práci uvedeno nebude z důvodu malé souvislosti s tématem diplomové práce (např. druhy a provedení filtrací paliva).

3.4.2.6.1 Řadové vstřikovací čerpadlo

Řadová vstřikovací čerpadla byla v dnešní době vytlačena, v minulosti však byla používána po několik desetiletí a jejich význam byl obrovský a v řadě zemědělských podniků slouží stroje vybavené tímto vstřikovacím čerpadlem dodnes. U řadových vstřikovacích čerpadel se používají dopravní palivová čerpadla pístová. Zlepšují účinnost, rovnoměrnost dodávky paliva a stabilitu funkce vstřikovacího čerpadla. Je poháněno buď přímo motorem, nebo je součástí vstřikovacího čerpadla. Pístová dopravní čerpadla dělíme na:

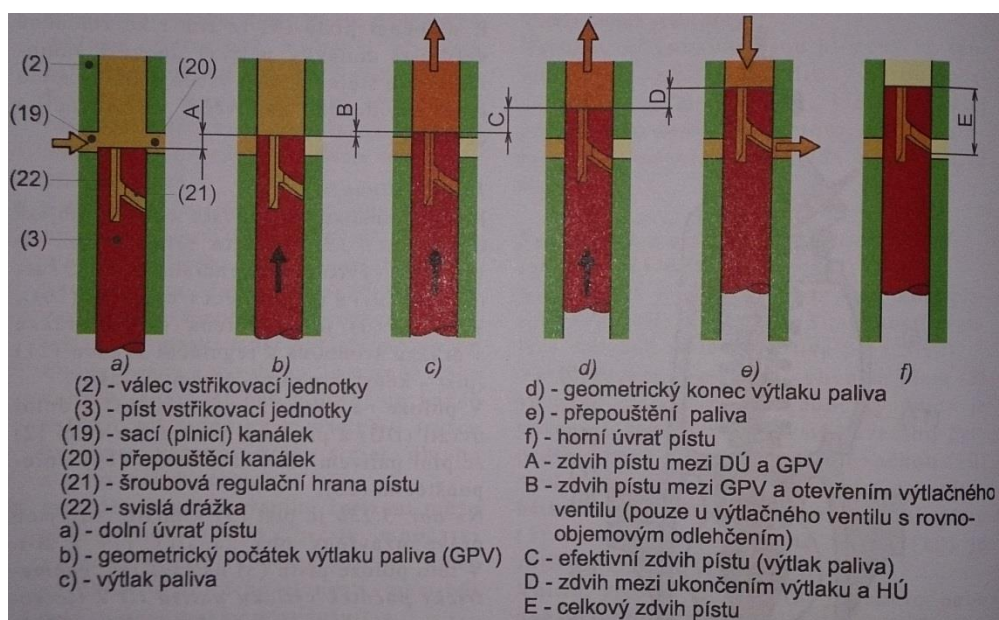
- jednočinná,
- dvojčinná.⁴²

⁴⁰ Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 283-284 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 3 – motory, 5. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 115-119 s. ISBN 978-80-87143-06-3.

⁴¹ Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 12 s.

Řadová vstřikovací čerpadla jsou charakteristická tím, že mají pro každý válec motoru jednu čerpadlovou jednotku, která se skládá z pístu čerpadla a válce čerpadla, a vzhledem k tomu, že jsou u víceválcového motoru čerpadlové jednotky uspořádané v řadě, používá se název řadová. Pohyb pístu zajišťuje vačka na vačkové hřídeli, která je poháněna přímo od motoru v přesně synchronizovaném pohybu, zpětný pohyb pístu obstarává pružina. Ve válci čerpadlové jednotky jsou otvory sloužící k plnění pracovního prostoru – sací, další je výtlačný ventil do vstřikovače a poslední je přepouštěcí zpět do nádrže. Přepouštěcí otvor být nemusí, jeho funkci poté přebírá otvor sací – toto řešení se používá pouze u motorů s malým výkonem a menším počtem otáček, nevýhoda je, že se palivo zahřívá a pění.⁴³



Obrázek 3 Princip činnosti pístu vstřikovací jednotky, píst s konstantním počátkem výtlačeného paliva (Jan, Ždánský, 2008)

Pohyb pístu začíná z dolní úvratě, v bodě, kdy horní hrana pístu uzavře sací otvor, začne tvorba vysokého tlaku, tento okamžik se nazývá počátek dodávky paliva. Pohyb pístu je stále ve směru horní úvratě a zvyšuje tak tlak paliva. Když tlak paliva překročí otevírací tlak vstřikovací trysky, začne se palivo vytlačovat přes výtlačný ventil a vstřikovací trysku a dojde ke vstříknutí paliva do motoru. Palivo se vstříkuje tak dlouho, dokud nedojde k uvolnění šikmou (řídící) hranou přepouštěcího otvoru, v tu chvíli tlak poklesne – jehla trysky se uzavře, palivo odtéká zpět do

⁴² Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 206-208 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

⁴³ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 205-207 s. ISBN 80-238-8756-4.

nádrže a dodávka paliva je ukončena. Rychlé uzavření trysky, aby nedošlo k nežádoucímu dostřiku paliva, zajišťuje výtláčny ventil, který odděluje vysokotlaké potrubí od pracovního prostoru čerpadlové jednotky. Píst poté, co dosáhne horní úvratě, je pružinou tažen zpět do dolní úvratě.⁴⁴

Druhy pístu:

- s konstantním počátkem dodávky paliva – nejčastěji,
- s proměnným počátkem i koncem dodávky paliva – výhody tohoto pístu jsou ve snížení hlučnosti a výfukových emisí, nevýhody komplikovanost při výrobě a tím cena,
- s konstantním koncem dodávky paliva – příliš se nepoužívá.

Každý píst je vybaven svíslou drážkou, která při určitém natočení pístu spojuje prostor nad pístem s přepouštěcím otvorem, to umožňuje nulovou dodávku paliva. Zásadním způsobem pohyb pístu, respektive rychlost vytékání paliva z trysky, ovlivňuje tvar vačky. Vačka představuje jednu z nejdůležitějších částí vstřikovacího čerpadla. Používají se zpravidla symetrické, u čerpadel s velmi vysokými otáčkami se používají vačky asymetrické, u kterých náběhová plocha přechází do vrcholu povlnněji, aby se snížily nároky na pístovou pružinu vracející píst. Regulační tyč je další důležitá součást, spojuje všechny vstřikovací jednotky, na kterých jsou regulační objímky, a pomocí regulační tyče se řídí množství dodávaného paliva do motoru, tedy – výkon motoru. Řadová vstřikovací čerpadla je nutno seřadit do kruhu pomocí povolení regulačních objímek. Začátek vstřiku paliva před horní úvratí pístu v motoru (předstih vstřiku) má zásadní vliv na rozložení a průběh spalovacího procesu a tím výkon a efektivnost motoru. Ideální předstih vstřiku je pro různé otáčky různý, a tak vstřikovací čerpadlo má na vačkové hřídeli samočinný přesuvník vstřiku. Je založen na odstředivé síle, kdy se vzrůstajícími otáčkami se závaží upnuté pružinami vzdaluje od středu a dochází k natáčení vačkové hřídele čerpadla vůči pohonu.⁴⁵

⁴⁴ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 205-207 s. ISBN 80-238-8756-4.

⁴⁵ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 217-223 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

U řadových vstřikovacích čerpadel se používají základní dva druhy regulací:

- omezovací (v případě vznětového motoru je použit omezovací regulátor dvojitý – slouží k regulaci volnoběžných a maximálních otáček, v oblasti mezi těmito otáčkami je regulátor neúčinný a hodnotu otáček si volí obsluha motoru),⁴⁶
- výkonnostní – otáčková (po nastavení otáček je regulátor udržuje, při měnícím se zatížení reguluje množství vstřikovaného paliva bez zásahu obsluhy).

Vstřikovací tlaky se u řadových čerpadel pohybují až do 150 MPa.⁴⁷

Elektronická regulace EDC za pomoci čidel (např. teploty paliva, vzduchu atd.), jejichž data vyhodnocuje řídicí jednotka, umožňuje seřizovat dodávku paliva s vysokou přesností, jaké mechanická regulace není schopna dosáhnout.⁴⁸

3.4.2.6.2 Rotační vstřikovací čerpadlo s axiálním pístem

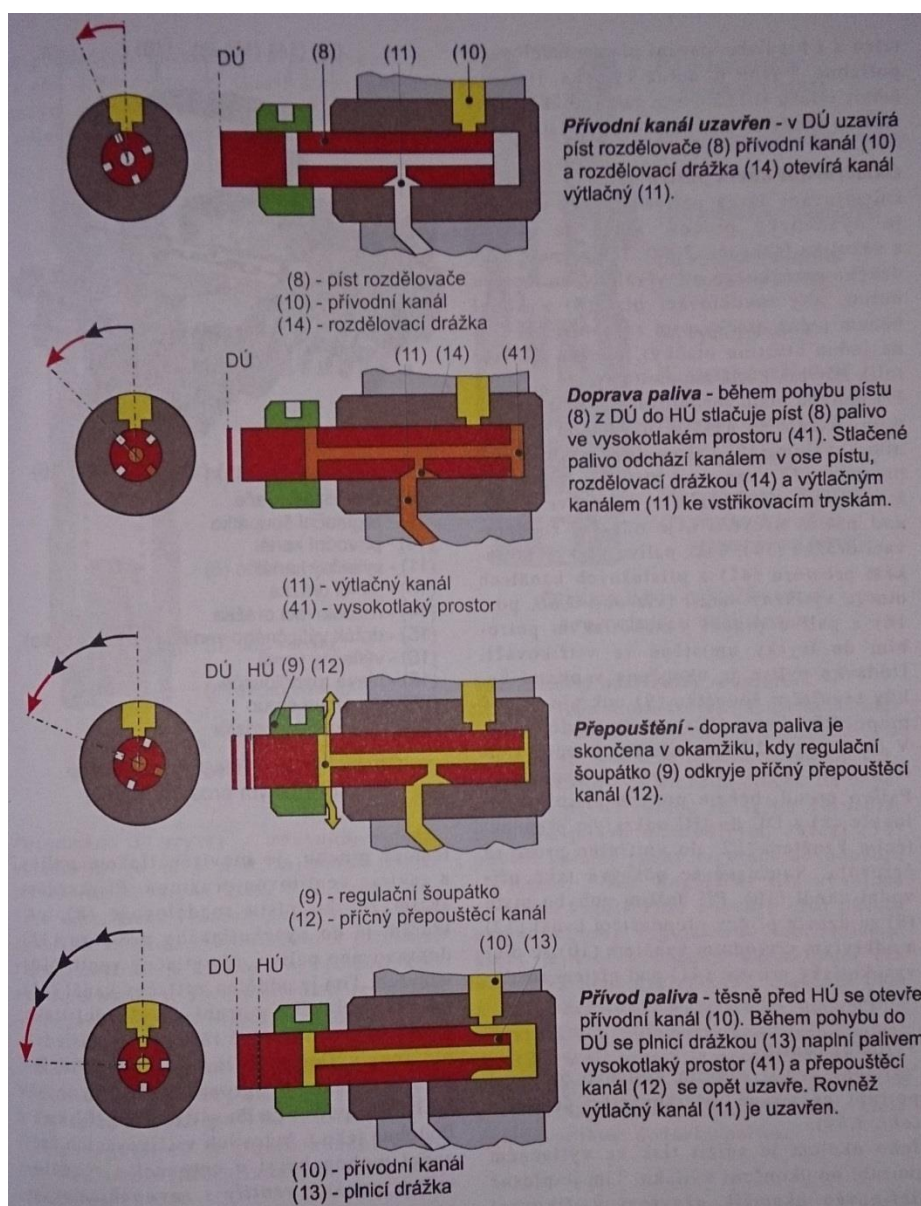
Tento druh vstřikovacích čerpadel je vhodný pro rychloběžné vznětové motory používané v osobních a menších užitkových vozidlech. Jejich výhodou je nižší hmotnost a menší rozměry čerpadla. Mazání všech částí čerpadla obstarává pouze palivo – nafta, což sebou nese zvýšené nároky na kvalitu a čistotu nafty a filtraci paliva ve vozidle. Oproti řadovým čerpadlům dodává rotační čerpadlo s axiálním pístem palivo do všech válců pouze jedním pístem, což u čtyřválcového motoru znamená, že píst čerpadla musí vykonat za jednu otáčku osm zdvihů, na čtvrt otáčky dva, jeden sací a jeden výtlačný pro jeden válec motoru. Z tohoto důvodu musí být rotační vstřikovací čerpadlo velmi odolné proti opotřebení, které je vyšší o násobek počtu válců motoru. Podávací nízkotlaké čerpadlo zde bývá v jednom celku se vstřikovacím. Jedná se o lamelové (křídlové) dopravní palivové čerpadlo. Se stoupajícími otáčkami stoupá také tlak paliva. Redukční ventil tak zabraňuje přílišnému zvýšení tlaku. Píst vstřikovacího čerpadla má v horní části plnicí drážku, v dolní části je příčný přepouštěcí kanál, který je spojen s podélným průřezem uprostřed pístu, a na ten je napojena jedna rozdělovací drážka. Ve válci jsou v horní části plnicí kanály a uprostřed válce jsou otvory – kanály k jednotlivým válcům. Při

⁴⁶ Bureš, Oldřich a kol.: Traktory a automobily, 1. vydání, Praha: SZN, 1980. 352-353 s.

⁴⁷ Motejl, Vladimír, Horejš, Karel a kol.: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, 3. vydání, Brno: Littera, 2004. 313-314 s. ISBN 80-85763-24-9.

⁴⁸ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 241 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

pohybu do dolní úvrati se plnicí drážkou natáčejí k plnicím kanálům a prostor nad pístem se plní palivem. Píst směřuje do horní úvrati, a jak se otáčí, rozdělovací drážka začíná odkrývat kanál k jednomu válci, palivo se nad pístem stlačuje a uniká podélným průřezem uprostřed pístu a rozdělovací drážkou do válce, při dalším pohybu do horní úvrati se začne otevírat přepouštěcí kanál, tlak klesá a uniká do čerpadla a zpět do nádrže. Aby bylo možno regulovat množství vstřikovaného paliva, tak přepouštěcí kanál zakrývá regulační šoupátko (objímka). Regulační šoupátko svým pohybem umožňuje odkrytí dříve nebo později a tím regulovat dodávku paliva do motoru, případně zajistit nulovou dodávku paliva.



Obrázek 4 Odměrování a doprava paliva pístem rozdělovače (Jan, Ždánský, 2008)

Pohon pístu je zajištěn axiální vačkou, která se otáčí po kladkách. Kladky nemají stále stejnou polohu, ale v závislosti na otáčkách se natačejí a tím mění počátek vstřiku. Natačecí mechanismus je závislý na tlaku uvnitř čerpadla, který je přímo úměrný otáčkám. Přesuvník je schopný začít regulovat počátek vstřiku už od nejnižších otáček při startování motoru. Rotační čerpadla s axiálním pístem nedosahují tak velkých vstřikovacích tlaků, maximum je přibližně 75 MPa.⁴⁹

3.4.2.6.3 Rotační vstřikovací čerpadlo s radiálními písty

Rotační vstřikovací čerpadlo s radiálními písty bylo vyvinuto pro rychloběžné vznětové motory s přímým vstřikem paliva. Jejich výhodou je ve vysoké rychlosti regulace množství vstřikovaného paliva a počátku vstřiku. Vstřikovací čerpadlo vytváří vysoký tlak pomocí dvou pístů, může jich být i více, tři, čtyři, nicméně písty v čerpadle pracují vždy současně. Podávací čerpadlo je řešeno stejným způsobem jako u rotačního s axiálním pístem. V rozdělovací hřídeli (rotoru rozdělovače) jsou radiálně vedeny písty, které vůči hřídeli konají radiální pohyb. V hřídeli jsou vytvořeny kanálky. Jeden z nich je plnicí a druhý je tlakový. Hřídel s písty je vložena do prstence, který má na vnitřní straně radiální vačky a tělesa rozdělovače paliva, jenž má v sobě dávkovací a tlakový kanálek. Počet vaček je stejný jako počet válců v motoru.⁵⁰

Činnost čerpadla probíhá ve dvou fázích:

- 1) Plnění – při natočení rotoru, kdy jsou dávkovací a plnicí kanálek rotoru rozdělovače naproti sobě, se přivádí palivo a to svým tlakem odtlačuje písty od sebe, v tuto chvíli je tlakový kanál v rotoru a tělesa rozdělovače paliva zakryt.
- 2) Vstřikování – při otáčení rotoru rozdělovače dojde k zakrytí dávkovacího kanálku a plnění je u konce. Zároveň dochází k zákrytu tlakového kanálku s vysokotlakým výstupem jednoho z válců motoru v tělese rozdělovače paliva

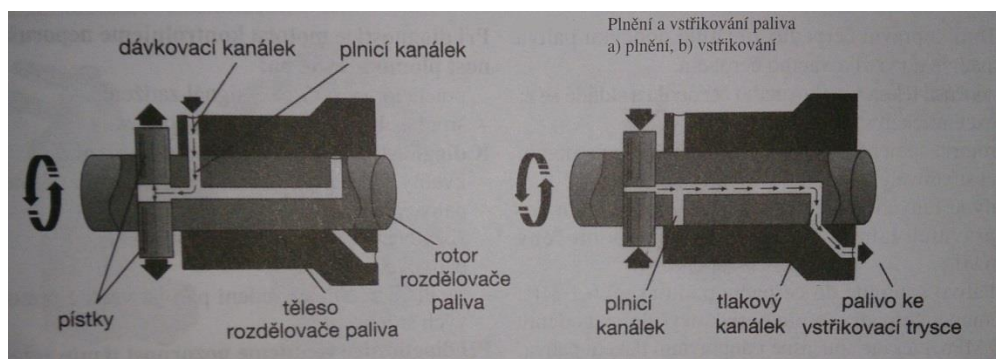
⁴⁹ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 253-271 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

Motejl, Vladimír, Horejš, Karel a kol: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, 3. vydání, Brno: Littera, 2004. 317-319 s. ISBN 80-85763-24-9.

Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 300-307 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

⁵⁰ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 273-275 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

a současně dojde ke stlačování pístů, jak vlivem otáčení písty nabíhají na vačky prstence.



Obrázek 5 Sání a výtlač u radiální vstřikovacího čerpadla (Motejl, Horejš, 2004)

Regulace počátku vstřiku je zde řešena podobně jako u rotačních čerpadel s axiálním pístem. Prstenec s vačkami není uložen pevně, ale je spojen kulovým čepem s nastavovačem vstřiku. Natáčení prstence se děje ve směru otáčení rotoru. Množství vstřikovaného paliva je určeno dávkovacím ventilem, natočením je do rozdělovače přiváděno větší nebo menší množství paliva. V podstatě se posouvá regulační hrana podél vstupního otvoru a svojí polohou určuje vstřikované množství. Mazání zajišťuje stejně jako u rotačního čerpadla s axiálním pístem palivo. Vstřikovací tlak u těchto čerpadel může dosahovat až 185 MPa.⁵¹

3.4.2.6.4 Vstřikovací trysky otevírané tlakem paliva

Vstřikovací systémy popsané v předchozích třech kapitolách jsou zakončeny vstřikovači s tryskami otevíranými tlakem paliva. Potrubí ke všem vstřikovačům musí být stejné dlouhé, aby se zajistily stejné podmínky pro dopravu paliva. Trysky můžeme rozdělit na:

- jednopružinové vstřikovací trysky. Hlavní části jsou těleso, pružina, tlačný čep, trysky, přívodní kanál paliva a odpad paliva. Pomocí seřizovacího šroubu se mění předpětí pružiny umístěné v tělese, která přes čep tlačí jehlu vstřikovací trysky do sedla. Tím se nastavuje vstřikovací tlak paliva.
- dvoupružinové vstřikovací trysky. Jde o vylepšené jednopružinové vstřikovací trysky. Slouží k redukci hluku vzniklého při spalování. Ve vstřikovači jsou za sebou umístěny dvě pružiny. Při otevření trysky působí

⁵¹ Motejl, Vladimír, Horejš, Karel a kol: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, 3. vydání, Brno: Littera, 2004. 320-322 s. ISBN 80-85763-24-9.

na jehlu pouze jedna pružina, která určuje otevírací tlak. Druhá pružina se opírá o dorazové pouzdro, které omezuje úvodní zdvih jehly.

U elektronicky řízených vstřikovacích soustav je důležité znát počátek vstřiku paliva. Aby mohl být řízen, je na jednom vstřikovači snímač pohybu jehly.⁵²

3.4.2.6.5 Vstřikovací sdružené jednotky (čerpadlo tryska – PD)

Tento systém vstřikování je poměrně nový, přišel v 90. letech, ale dnes už je na ústupu stejně jako předchozí vstřikovací systémy.

Oproti předchozím vstřikovacím systémům ho odlišují elektronicky řízené vstřikovací trysky. Sdružený vstřikovací systém je systém s jednotlivými časově řízenými vstřikovacími čerpadly, která jsou přímo ovládána vačkovou hřídelí motoru (případně svou vačkovou hřídelí hnanou od vačkové hřídele motoru). Vstřikovací tlak u tohoto systému dosahuje až 205 MPa, což zajišťuje optimální rozprášení paliva, tedy i vyšší výkon, menší emise a spotřeba paliva. Sdružený vstřikovač je umístěn přímo v hlavě válců pod ventilovým víkem a tvoří ho tyto části:

- vstřikovací čerpadlo,
- vstřikovací tryska,
- řídicí jednotka.

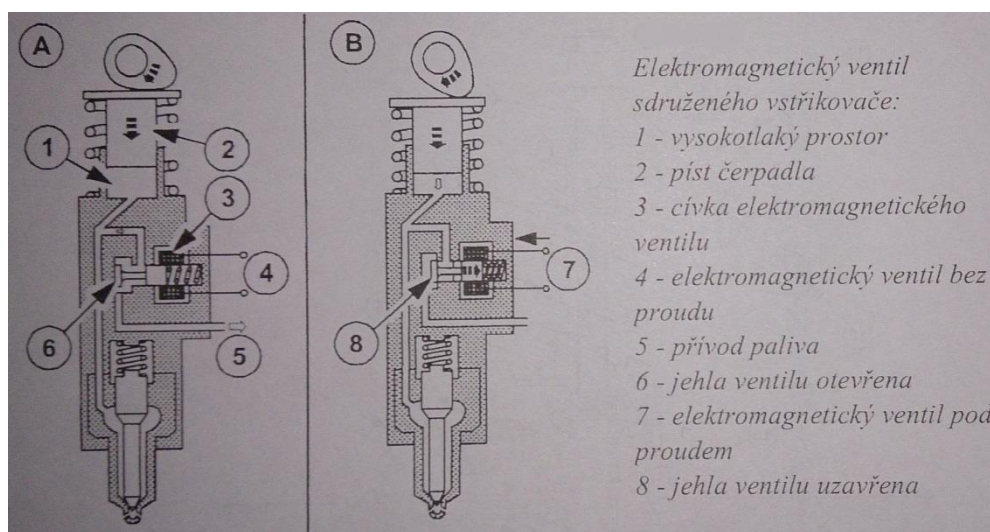
Vačka nepůsobí na sdružený vstřikovač přímo, ale přes vahadlo a to pak na zdvihátko, které působí na píst vstřikovací jednotky. Náběh vstřikovacího tlaku je dán tvarem vačky, která má strmý náběžný bok a plochý úběžný bok. To způsobuje, že píst čerpadla je tlačěn vysokou rychlostí dolů a tím rychle vznikne vysoký vstřikovací tlak a naopak při pohybu vzhůru, který zajišťuje pružina, může palivo přitékat bez pění do vysokotlakého prostoru sdruženého vstřikovače.⁵³

Průběh pracovního cyklu sdružené vstřikovací jednotky začíná fází plnění palivem. Na píst vstřikovací jednotky působí pružina a účinkem síly pružiny se píst pohybuje vzhůru, objem vysokotlakého prostoru čerpadla se zvětšuje a plní se palivem. Po dosažení horní polohy je píst tlačěn dolů a palivo je vytlačováno do přívodu k vstřikovací trysce a do odtoku do vratného potrubí. Uvolňovací ventil je tlačěn pružinou trysky k jeho hornímu dorazu. Palivo se v tuto chvíli ale nevstřikuje,

⁵² Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 20-21 s.

⁵³ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 201-202 s. ISBN 80-238-8756-4.

počátek dodávky paliva do motoru nastává uzavřením elektromagnetického ventilu signálem z řídicí jednotky. Zamezí se tak palivu odtok do vratného potrubí a vzniklý tlak působí proti síle pružiny od osazení dříku vstříkovací trysky. Jakmile tlak překoná sílu pružiny, jehla vstříkovací trysky je přizvednuta a začíná předvstřík – pilotní vstřík. Malá část z vysokotlakého prostoru zatlačí na uvolňovací píst mezi tímto prostorem a pružinou trysky. Tím se zvýší síla pružiny a ta uzavře jehlu trysky. Vstříkování paliva se přeruší, ale píst je stále tlačěn směrem dolů a tlak se opět zvyšuje. Na pružinu trysky působí již jen tlak dříku jehly, protože uvolňovací ventil je na svém dolním dorazu, a tak brání zvýšení uzavírací síly pružiny trysky tlakem paliva. Jehla trysky se znovu nadzvedne a vstříkuje se hlavní dávka. Protože otvory trysky nemůže protéci takové množství paliva, jaké vytlačuje píst z vysokotlakého prostoru, narůstá tlak do velmi vysokých hodnot. Konec dodávky paliva nastává v okamžiku otevření elektromagnetického ventilu. Tlak paliva poklesne, pružina trysky zatlačí jehlu do sedla, kde uzavře vstříkovací otvory. Současně pružina posune uvolňovací píst do jeho základní polohy.⁵⁴



Obrázek 6 Sdrúžená vstříkovací tryska (Vlk, 2003)

Velmi podobným systémem jsou samostatné vstříkovací jednotky (PLD), tato zkratka je do češtiny překládána jako čerpadlo – potrubí – tryska. Dá se říci, že u PLD je navíc vysokotlaké potrubí a tento systém se uplatní u motorů, které mají vačkovou hřídel mimo hlavu motoru, například motory s rozvodem OHV.⁵⁵

⁵⁴ Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 340-341 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

⁵⁵ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 285 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

3.4.2.6.6 Vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem (common rail – CR)

V současnosti jde o nejrozšířenější systém vstřikování vznětových motorů napříč výrobci a bude mu zcela určitě patřit budoucnost příštích několika let. První generace vstřikovacího systému s tlakovým zásobníkem přišla v roce 1997.

U vstřikovacího systému s tlakovým zásobníkem (Common Rail) je vstřikovací tlak vytvářen nezávisle na otáčkách motoru a vstřikované dávce. Palivo je připraveno pro vstřikování ve vysokotlakém zásobníku paliva (v railu). Vstřikovaná dávka je určena řidičem, okamžik vstřiku a vstřikovací tlak jsou vypočteny z uložených datových polí v elektronické řídicí jednotce a realizovány vstřikovačem každého válce – jde o plně elektronický vstřikovací systém. V tlakovém zásobníku je k dispozici kontinuální tlak paliva, zatímco u původních systémů je pro každé vstřikování zapotřebí stále nový nárůst tlaku paliva. Vytváření tlaku a vstřikování paliva je tedy u vstřikovacího systému Common rail oddělené.⁵⁶

Podávací čerpadla v nízkotlakém okruhu jsou používána dvě a liší se podle oblasti použití:

- elektrická (převážně osobní a lehká užitková vozidla). Vyrábějí se ve dvojitým provedení (pro zástavbu do potrubí, nebo do nádrže vozidla). Čerpadla umístěná v nádrži bývají vybavena sítím na sací straně a ukazatelem stavu paliva. Čerpadla jsou vybavena bezpečnostním obvodem a jsou v činnosti pouze při chodu motoru. Skládají se ze tří hlavních součástí: 1) elementu čerpadla, zpravidla se jedná o válečkové lamelové čerpadlo, 2) elektromotoru, který je neustále obtékán palivem a tím i chlazen, což zaručuje vysoký výkon bez náročných těsnících prvků, 3) přípojovacího víka, ve kterém se nacházejí elektrické přípojky, tlakové přípojky a zpětný ventil zabraňující vyprázdnění palivového vedení po vypnutí.
- zubová (nákladní vozidla). Jsou umístěna buď přímo ve vysokotlakém čerpadle, nebo na motoru vozidla. Dodávané množství paliva je přibližně přímo úměrné otáčkám motoru, proto se regulují buď na sací straně, nebo upouštějí ve výtlaku.

⁵⁶ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 194-195 s. ISBN 80-238-8756-4.

Další rozdíl mezi common railem pro osobní a nákladní vozidla je ve filtraci. Nákladní vozidla mají palivový filtr (jemný) i na výtlačné straně dopravního palivového čerpadla. Vysokotlaké čerpadlo se zubovým podávacím čerpadlem, upevněným pomocí příruby, proto potřebuje vně umístěný přívod paliva.⁵⁷

Vysokotlaké čerpadlo vytváří trvale systémový tlak pro systémový zásobník (rail) a jeho úkolem je dodávat dostatečné množství paliva pod vysokým tlakem při všech provozních režimech běhu motoru. Vysokotlaké čerpadlo je umístěno na stejné místo jako např. rotační vstříkovací čerpadlo a je poháněno od klikové hřídele motoru. Důležité je dodržet volbu převodu tak, aby otáčky čerpadla při nejvyšších otáčkách motoru nepřekročily $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.⁵⁸

Vysokotlaká čerpadla mohou být radiální či řadová. Radiální pístová čerpadla používaná u osobních vozidel jsou mazána palivem. U nákladních vozidel se používají radiální pístová čerpadla mazaná palivem nebo olejem, ale také dvoupístová řadová čerpadla. Čerpadla mazaná olejem mají lepší odolnost proti horší kvalitě paliva. Mezi generacemi čerpadel jsou provedení s rozdílným dopravním výkonem a dopravním tlakem:

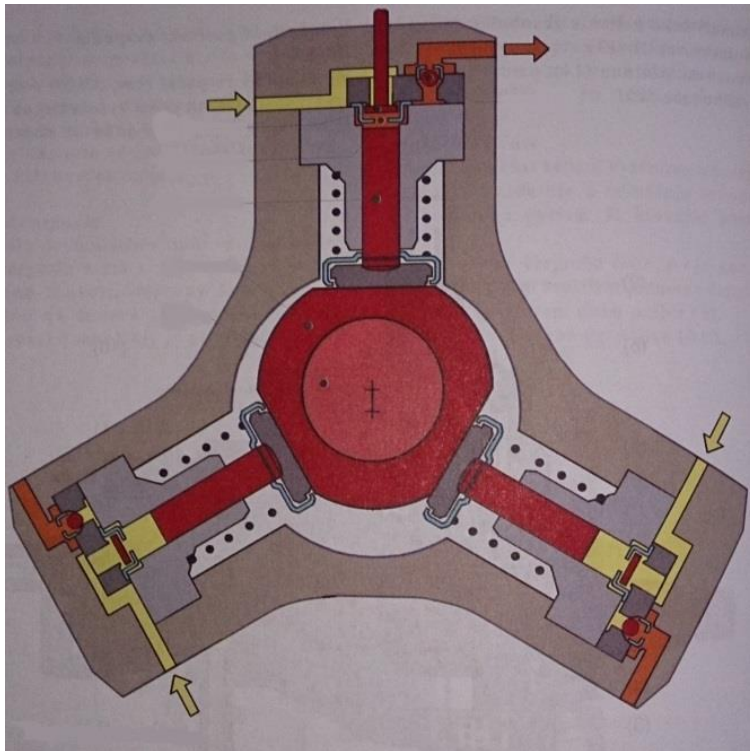
- Radiální pístové čerpadlo CP1 disponuje maximálním tlakem 135 MPa a je mazáno palivem. V tělese CP1 je uložena centrální hnací hřídel a radiálně k němu jsou v roztečích po 120° uspořádány jednotlivé elementy čerpadla. Výstředník nasazený na hnací hřídeli vyvolává vratný pohyb pístů čerpadla. Při pohybu pístu dolů přichází palivo vstupním otvorem do prostoru příslušného elementu. Poté píst překročí dolní úvrat', zavře se vstupní ventil a palivo v prostoru elementu se začíná stlačovat. Vytvořený tlak otevře výstupní ventil, jakmile je dosažen tlak v zásobníku (railu), stlačené palivo se dostane do vysokotlaké části okruhu. Píst čerpadla dodává palivo, dokud nedosáhne horní úvratě – poté poklesne tlak a výstupní ventil se uzavře.
- Radiální pístové čerpadlo CP3 je podobné CP1, oproti CP1 má těleso monoblok – menší počet spojů a talířová zdvihátka – síla od výstředníku nepůsobí přímo na píst čerpadla, ale prostřednictvím zdvihátek na stěnu tělesa

⁵⁷ Bosch GmbH: Systém vstříkování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory, 1. vydání, Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2005. 20-22, 15 s.

⁵⁸ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 289-290 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

- důsledkem je vyšší zatížitelnost (až 180 MPa). Použití jak u osobních, tak nákladních vozidel, mazání dle varianty palivem nebo olejem.
- Řadové pístové čerpadlo CP2 je mazané olejem a použití je pouze u nákladních vozidel. Princip činnosti probíhá podobně jako u CP1 prostřednictvím kombinovaného vstupního/výstupního ventilu.⁵⁹
- Poslední generace je čerpadlo CP4, jde o radiální čerpadlo, ale oproti CP1 a CP3 má ve variantě CP4.1 pouze jeden píst, ve variantě CP4.2 písty dva.

U třípístového čerpadla vzniká zejména při běhu naprázdno a částečném zatížení přebytek množství stlačeného paliva, snižuje se tím celková účinnost a palivo je zbytečně zahříváno. Částečně lze tyto ztráty odstranit přizpůsobením dopravního výkonu spotřebě paliva. Regulovat dopravní výkon lze změnou převodu pohonu čerpadla nebo odpojením pístové jednotky čerpadla. V tomto případě je sací ventil jednotky pomocí elektromagnetu držen trvale otevřený. Po odpojení jedné pístové jednotky vysokotlaké čerpadlo dodává palivo s přestávkami a pracuje tak do dvou třetin plného zatížení motoru.⁶⁰



Obrázek 7 Třípístové axiální vysokotlaké čerpadlo systému CR (Jan, Ždánský, 2008)

⁵⁹ Bosch GmbH: Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory, 1. vydání, Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2005. 40-45 s.

⁶⁰ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 291-292 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

Vysokotlaký zásobník paliva akumuluje palivo pod vysokým tlakem a jeho objem je takový, aby tlumil tlakové kmitání paliva vznikající dopravou paliva vysokotlakým čerpadlem a odběrem paliva při vstřikování a zároveň při startu motoru došlo k rychlému vytvoření vysokého tlaku.⁶¹

Regulace tlaku podle systému může být:

- regulace na straně vysokého tlaku (tato regulace umožňuje rychlé přizpůsobení tlaku v railu při změně zatížení, nevýhoda je v zahřívání paliva a nižší účinnost),
- regulace množství na sací straně (dávkovací jednotka na sací straně vysokotlakého čerpadla zajišťuje, aby čerpadlo dodávalo do railu přesně takové množství, při kterém je dosažen požadovaný tlak, nevýhoda je v pomalejším vytvoření vysokého tlaku),
- dvojitý regulační systém (kombinuje výhody předchozích dvou systémů).⁶²

Protože je vysoký tlak k dispozici nepřetržitě, má systém common rail omezovače průtoku. V případě poruchy vstřikovače by mohlo dojít k nepřetržitému vstřikování paliva. Pokud dojde k aktivaci omezovače průtoku, uzavře se přívod paliva k danému vstřikovači až do zastavení motoru.⁶³

Vstřikovače používané u vstřikovacího systému common rail jsou s elektromagnetickým a piezoelektrickým ovládním:

- U elektromagneticky ovládaných vstřikovačů se palivo dostává vysokotlakým přívodem přes hrdlo s tyčovým filtrem ke vstřikovací trysce a současně přes přítokovou tlumící trysku do řídicího prostoru ventilu. Řídicí prostor je spojen přes tlumící trysku odtoku se zpětným odtokem nadbytečného paliva. Jestliže je vinutí elektromagnetu bez napětí, je tryska odtoku uzavřena kuličkou ventilu, přitlačovanou silou ventilové pružiny. V řídicím prostoru ventilu a na vstřikovací jehle trvá stejný systémový tlak. Protože plocha řídicího pístu ventilu je na jeho horním konci větší než plocha osazení dříku

⁶¹ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 291-292 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

⁶² Bosch GmbH: Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory, 1. vydání, Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2005. 7 s.

⁶³ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 294-295 s. ISBN 978-80-87143-08-7.

jehly v tlakové komoře a na obě plochy působí stejný tlak paliva, je síla působící v řídicím prostoru ventilu větší. Jehla trysky je tlačena do sedla tělesa a uzavírá vstřikovací otvory proti spalovacímu prostoru válce. Přivede-li se na vinutí elektromagnetu napětí, překoná jeho magnetická síla sílu přitlačné pružiny ventilu působící na uzávěr odtokové tlumící trysky. Uzávěr se otevře, tlak paliva v řídicím prostoru klesne a trvalý tlak paliva v tlakové komoře pod osazením dřívku nadzvedne jehlu. Jehla otevře vstřikovací otvory a palivo je vstřikováno do válce motoru. Jakmile se přeruší přívod napětí k vinutí elektromagnetu, síla pružiny ventilu zatlačí přes kotvu elektromagnetu ventilovou kuličku do jejího sedla a tryska odtoku se uzavře. Tlak paliva přiváděného do řídicího prostoru se opět zvýší na stejnou úroveň jako v tlakové komoře. Obnoví se hydraulický tlak na řídicí píst a ten spolu se silou pružiny nad horním koncem jehly velmi rychle zatlačí jehlu do sedla. Vstřikovací otvory se uzavřou a vstřikování paliva je ukončeno.

- U piezoelektricky ovládaných vstřikovačů je místo elektromagnetu piezoelektrický ovladač o výšce asi 30 mm, na který se přivádí 150V, které způsobí prodloužení krystalů celkem o asi 0,04 mm. Tento malý zdvih stačí, aby se vstřikovací tryska mohla přesně otevírat a zavírat. Provedení i funkce mechanismu je obdobná jako u vstřikovací trysky s elektromagnetickým ovladačem. Výhoda je asi 4x rychlejší spínání, a tak se průběh vstřikování může velmi dobře přizpůsobit potřebám motoru. Objem vstřikovaného paliva může být rozdělen až do sedmi dílčích dávek, což přinese snížení hlučnosti (předvstřik), menší namáhání částí motoru, snížení emisí (hlavní dávka), snížení částic sazí (dovstřik), regenerace filtru pevných částic (druhý dovstřik).⁶⁴

⁶⁴ Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 336-338 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.

3.4.2.7 Vlivy působící na výkon motoru, přeplňování

Výkon nepřepřplňovaného motoru vychází z rovnice:

$$P_e = \frac{i \cdot V_z \cdot n \cdot p_e}{C} \quad [\text{W}] \quad (22)$$

Kde:

- P_e = výkon motoru [W]
- i = počet válců
- V_z = zdvihový objem válce [m^3]
- n = otáčky motoru [s^{-1}]
- p_e = střední užitečný tlak [Pa]
- C = konstanta, která pro jednočinný čtyřdobý motor je 2, pro jednočinný dvoudobý motor je 1.

Výkon motoru se zvětšuje, zvětšují-li se činitele čitatele rovnice:⁶⁵

- zvýšení otáček znamená zvýšení střední pístové rychlosti, které se projeví nárůstem spotřeby paliva, zvýšenými požadavky na mazání motoru, kratšími intervaly na výměnu motorového oleje, větším hlukem, náročností uložení klikové hřídele, zvýšeným tepelným namáháním a zvýšeným ztrátovým výkonem,
- při zvětšení zdvihového objemu motoru se nedosáhne úměrného nárůstu výkonu motoru, vyplatí se pouze tehdy, je-li střední efektivní tlak vyšší než 1 MPa,
- zvyšování počtu válců vede k úměrnému zvýšení výkonu, pro konstrukci to ovšem znamená nárůst hmotnosti a velikosti motoru, výrobní náročnosti a také nákladů na opravy,
- zvýšením středního efektivního tlaku, který se dá dosáhnout zvýšením hmotnosti vzduchu dopraveného do válce, tím se může dodat více paliva při nezměněné kvalitě spalování.

Další možnosti jsou zvýšení mechanické účinnosti nebo použití paliva s vyšší výhřevností. Dopravení většího množství vzduchu do spalovacího prostoru je však ze všech možností nejefektivnější řešení ke zvýšení výkonu. Přeplňování je v dnešní

⁶⁵ Kozoušek, Josef: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I, 1. vydání, Praha: SNTL, 1978. 66 s.

době u vznětových motorů použito v drtivé většině případů, umožňuje konstruktérům zvýšit výkon motoru, přitom udržet spotřebu paliva na přijatelné úrovni, a současně neměnit charakteristické parametry motoru.⁶⁶ Případně výkon zachovat stejný a zmenšit rozměry motoru.⁶⁷

Přepřehování motoru lze zajistit:

- 1) dmychadly: - mechanicky poháněná,
 - poháněná výfukovými plyny,
- 2) tlakovými vlnami (laděná sací potrubí, rotační rozdělovač Comprex),
- 3) nápirem vzduchu (uplatnění při rychlosti jízdy vyšší než 100 km*h⁻¹).

U motorů převládá varianta přepřehování dmychadlem poháněným výfukovými plyny, takže turbodmychadlem.⁶⁸

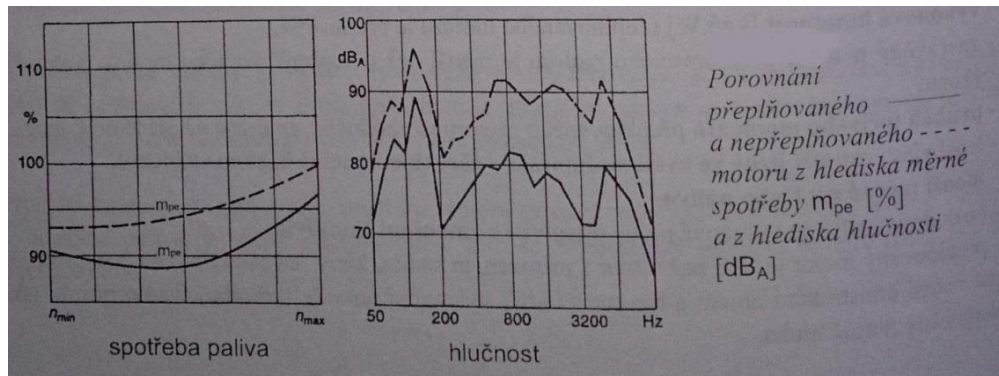
Přepřehovaný vznětový motor má řadu technických a ekonomických výhod oproti motoru s přirozeným sáním:

- výkonová hmotnost [kg*kW⁻¹] přepřehovaného motoru je příznivější,
- zastavěný prostor přepřehovaného motoru je menší než u nepřepřehovaného motoru o stejném výkonu,
- průběh točivého momentu přepřehovaného motoru je vhodnější, zejména při jízdě do kopce,
- lepší vlastnosti při jízdě ve vyšší nadmořské výšce,
- menší měrná spotřeba paliva,
- turbodmychadlo na výfukové plyny přispívá ke zmenšení škodlivin,
- přepřehovaný motor je tišší než motor s přirozeným sáním, který má stejný výkon, mj. proto, že má menší konstrukční objem a tím menší hluk vyzařující povrch a turbodmychadlo působí jako dodatečný tlumič hluku.

⁶⁶ Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 27 s.

⁶⁷ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 3 – motory, 5. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 123 s. ISBN 978-80-87143-06-3.

⁶⁸ Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 27-28 s.



Obrázek 8 Porovnání přepřlňovaného a nepřepřlňovaného motoru (Vlk, 2003)

Turbodmychadlo se skládá ze dvou proudových strojů – turbíny a kompresoru, které jsou umístěny na společné hřídeli.⁶⁹

Turbodmychadlo pracuje při velmi vysokých otáčkách (až 180 000 ot*min⁻¹), což klade nároky na přesnost výroby, jakost povrchu, mazání a vyvážení hřídele. Hřídel bývá uložena v jehlových ložiskách nebo v plovoucích kluzných pouzdrech. Plovoucí kluzná ložiska se otáčejí v otvorech olejem mazané skříně ložisek ve stejném smyslu jako hřídel, což umožňuje snížení relativní rychlosti mezi hřídelí a kluznými ložisky – tím pádem i snížení opotřebení a třecích ztrát. Materiál turbíny bývá žáruodolná niklová slitina, kompresor se zhotovuje z hliníkové slitiny. Podle velikosti přetlaku lze přepřlňované motory rozdělit na:

- nízkotlaké přepřlňování (20 – 50 kPa),
- středotlaké přepřlňování (50 – 100 kPa),
- vysokotlaké přepřlňování (více jak 100 kPa).

Při stlačování vzduchu dochází k nárůstu jeho teploty, a tak se mezi motor a turbodmychadlo vkládají chladiče vzduchu (intercoolery). Nárůst teploty může dosáhnout až 130°C, chladiče jsou schopny docílit snížení teploty vzduchu až o 60°C. Provedení chladiče stlačeného vzduchu může být:

- vzduchové (častěji používané),
- vodní.

⁶⁹ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 467-469 s. ISBN 80-238-8756-4.

Regulace turbodmychadel je dvojitá:

- 1) regulace turbodmychadla obtokovým regulačním ventilem plnicího tlaku – jde o pasivní regulaci, konstrukčně jednodušší, navrženou tak, aby turbodmychadlo dávalo poměrně velké množství vzduchu již při nízkých otáčkách, po dosažení určitého tlaku v sacím potrubí se otevře obtokový regulační ventil, aby nedošlo k poškození dmychadla tlakovým kmitáním, je sací a plnicí potrubí propojeno odlehčovacím ventilem.
- 2) regulace turbodmychadla nastavitelnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny – jde o aktivní regulaci, rozváděcí lopatky řídí proud výfukových plynů tak, že turbína pracuje nezávisle na otáčkách motoru a tedy i okamžitém objemu výfukových plynů, regulace tedy probíhá v celém rozsahu otáček, nejen v horním jako u obtokové regulace.

U nákladních vozidel může sloužit turbodmychadlo s variabilní geometrií rozváděcích lopatek i pro brzdění motorem, kdy se rozváděcí lopatky natočí tak, aby kladly co největší odpor.⁷⁰

⁷⁰ Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 3 – motory, 5. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 123-133 s. ISBN 978-80-87143-06-3.

3.5 Zdroje hluku u spalovacího motoru energetických prostředků

Celková hlučnost motoru se skládá z mnoha dílčích hluků. Zdroje hluku:

- Hluk tvořený termodynamickým cyklem – pístový spalovací motor s vnitřním spalováním využívá chemickou energii obsaženou v uhlovodíkovém palivu, a to tak, že v uzavřeném prostoru válce motoru dochází k hoření a tím následně i ke zvýšení teploty a tlaku v daném místě. Velký nárůst plynů ve válci je dán vznícením směsi vzduchu a odpovídajícího množství paliva. Protože je směs (vzduch) ještě před vznícením stlačena, dochází tak k ještě razantnějšímu nárůstu tlaku plynů a vývinu tepla. Rychlé zvýšení tlaku je také doprovázeno hlukem.

Tento hluk ze spalování paliva tvoří přibližně třetinu až polovinu z celkové hlučnosti motoru.⁷¹

- Aerodynamický hluk – u aerodynamického hluku jsou částečně výrazné harmonické (periodické) děje, částečně spojitě spektrum turbulentního hluku průtoku. Nejvýznamnější zdroj hluku jsou odcházející výfukové plyny z válce motoru ihned po otevření výfukového ventilu. Dojde k prudkému poklesu tlaku ve válci ještě před dosažením dolní úvratě, kdy se využívá tlaková energie zbylá na konci expanzního zdvihu pro rychlejší odvod spalin z válce. V menší míře tvoří hluk vzduch proudící sacím potrubím.⁷²
- Hydrodynamický hluk – je tvořen proudící kapalinou, v případě motoru jde o chladicí kapalinu a olej. Z hlediska měření celkového hluku motoru je hluk proudění chladicí kapaliny a oleje zanedbatelný.⁷³
- Mechanický hluk – navenek vysílaný povrchem konstrukce motoru (deskovité plochy na bloku motoru, hlavách, spodního víka motoru (olejová vana)). Na povrch se dostává přes mechanické kanály z vlastních zdrojů – kmitajících částí (např. kliková hřídel) pod účinkem sil od tlaku plynů a

⁷¹ Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 24-26 s.

⁷² Macek, Jan, Suk, Bohuslav: Spalovací motory I, 1. vydání, Praha: ČVUT, 1994. 106 s. ISBN: 80-01-00919-X.

Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 27 s.

⁷³ Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 27 s.

setrvačných sil (klikový mechanismus, rozvodový mechanismus). Vlivem naladění jednotlivých dílů se může zesilovat nebo tlumit. Nebezpečné rázy ve vůli mezi pohyblivými díly (překlápění pístu ve válci při změně směru normální síly, ventilová vůle, vůle v ložiskách atd.) – jde o spektrum s vysokou amplitudou vyšších harmonických, které vždy nalezne netlumenou odezvu v přenosové řetězci.⁷⁴

Příklady jednotlivých zdrojů hluku motoru:

- dosednutí ventilů do ventilových sedel při zavírání,
- vymezení ventilové vůle při otevírání ventilů,
- klopení pístů v dolní a horní úvrati,
- pohyb pístních kroužků v drážce pístu,
- vymezování vůle v ojnicím ložisku a pístním čepu,
- hluk hlavních ložisek klikové hřídele,
- tření vačky po ventilovém zdvihátku,
- vstříkovací čerpadlo a vstříkovače,
- olejové čerpadlo.

V zásadě platí, že s rostoucí teplotou mechanický hluk u motoru klesá z důvodu tepelné roztažnosti materiálu a tím zmenšování vůlí mezi jednotlivými součástmi motoru.

Klikový a ventilový mechanismus tvoří z celkové hlučnosti motoru přibližně jednu třetinu, z toho ventilový mechanismus tvoří dvě třetiny.⁷⁵

⁷⁴ Macek, Jan, Suk, Bohuslav: Spalovací motory I, 1. vydání, Praha: ČVUT, 1994. 106 s. ISBN: 80-01-00919-X.

⁷⁵ Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 24, 27 s.

3.6 Možnosti snížení hluku spalovacího motoru

3.6.1 Aplikované v/na motoru

Možnosti snížení hladiny akustického tlaku je možno docílit už při návrhu a konstrukci motoru vhodným použitím součástí a jejich konstrukčního řešení.

- 1) Vstřikování – nejvýznamnější je hluk produkovaný spalováním směsi, a proto je v předcházejících kapitolách vývoj vstřikovacího systému popsán. (Přímé vstřikování produkuje větší hluk než nepřímé. Více vstříků na jeden pracovní cyklus hluk snižuje.)
- 2) Uložení klikové hřídele – kliková hřídel uložená za každým zalomením produkuje méně vibrací a tím i hluku. Rovnoměrnost chodu je také výrazně ovlivněna počtem válců.
- 3) Pracovní otáčky motoru – při snížení pracovních otáček motoru jsou nižší střední pístové rychlosti.
- 4) Přepřehování – motor o stejném výkonu jako nepřepřehovaný je tišší, protože má menší objem a tím menší povrch vyzařující hluk, dále turbodmychadlo působí jako významný tlumič hluku.⁷⁶ A zpravidla umožní snížit i pracovní otáčky motoru.
- 5) Žhavení – použití žhavení před studeným startem a v prvních vteřinách běhu motoru pomáhá k lepšímu vznícení a spalování směsi a tím snížení hluku.
- 6) Vůle – zmenšení vůlí na minimum vede k významnému snížení hluku, například použití hydraulických zdvihátek na ventilech, či použití oleje s vyšší viskozitou.
- 7) Konstrukce sání – hluk je tlumen vhodnou volbou objemů, průřezů a celkovou stavbou sacího traktu.⁷⁷

⁷⁶ Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 467 s. ISBN 80-238-8756-4.

⁷⁷ Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 27 s.

8) Výfuk – velmi významně ovlivňuje hlučnost spalovacích motorů, zejména u nepřepřehovaných. K tlumení výfukových plynů se používají tlumiče dvojího typu:

- a. rezonanční tlumiče,
- b. absorpční tlumiče.

Rezonanční tlumič je tvořen válcovou nádobou rozdělenou přepážkami na dvě a více komor. Komory jsou propojené perforovanými trubkami, které samy pomáhají rozptýlit hluk. Stupeň útlumu může dosahovat 50 dB.

Absorpční tlumiče mají uvnitř absorpční materiál, přes který proudí výfukové plyny, nejsou však tak efektivní jako rezonanční a více jim vadí kondenzát.⁷⁸

3.6.2 Aplikované vně motoru (v mobilním energetickém prostředí)

Hluk je možné tlumit pasivně tlumícími materiály a zakrytváním. Motor je umístěn pod kapotou mobilního prostředku a samotná kapotáž, která je nejčastěji plechová nebo plastová je obložena tlumícím materiálem pohlcujícím hluk. Řidič mobilního prostředku sedí v kabině, která je rovněž odhlučněna tlumícím materiálem či skly (tloušťka skel).

⁷⁸ Martyr, A.J., Plint, M.A.: Engine testing, Theory and Practise, 3. vydání, UK, 2007. 42-43 s. ISBN-13: 978-0-7506-8439-2.

4. Metodika

4.1 Firma

Tato diplomová práce byla vypracována ve spolupráci se zemědělským podnikem **Rolnické družstvo PLEVIS**.

4.1.1 Lokalita, charakteristika podniku

Zemědělský podnik je na území České republiky a nachází se v jižních Čechách v okrese Jindřichův Hradec, poblíž města Kardašova Řečice se sídlem v obci Pleše. Podnik má ještě další dvě střediska, první středisko v obci Višňová a druhé středisko se nachází mezi obcí Pleše a Zahoří. V zemědělském podniku probíhá výroba:

- živočišná,
- rostlinná,
- energetická.

Na všech třech místech je realizována živočišná výroba, zázemí rostlinné výroby je v sídle zemědělského podniku. Energetická výroba je realizována pomocí bioplynové stanice umístěné ve druhém středisku.

Nadmořská výška se pohybuje okolo 460 – 500 m. n. m. a jedná se o zemědělskou výrobní oblast bramborářskou.

4.1.2 Historie podniku

Historie podniku sahá do roku 1993, kdy byl založen. V současné době (2/2015) hospodaří na 1018 ha půdy, z toho je 780 ha orné půdy a 238 ha jsou trvalé travní porosty. Počet zaměstnanců je 28.

4.2 Měřicí technika

4.2.1 Hlukoměry:

- **Voltcraft SL-300**

- **Voltcraft SL-400**

Technické údaje: - přesnost: $\pm 1,4\%$
- mikrofon: $\frac{1}{2}$ Elektret-kondenzátorový mikrofon
- rozsah frekvence: 31,5 Hz – 8 kHz
- rozsah dynamiky: 50 dB
- rozsah hladiny hluku: 30 – 130 dB
- třída přesnosti: 2

Provozní podmínky: - teplota: 0 až +40 °C
- relativní vlhkost vzduchu: 10 – 90% (bez kondenzace)
- provozní výška < 2000 m. n. m.

SL-400 a SL-300 jsou technicky stejné, liší se pouze v možnosti u SL-400 přemístit snímač z přístroje na prodlužovací kabel a měřit tak obtížně přístupná místa. Tato možnost nebyla využita.

4.2.2 Kalibrátor

- **Voltcraft 326**

Technické údaje: - třída přesnosti: 2 (IEC 60942)
- rozsah měření: 94 dB, 114 dB

4.2.3 Dálkoměr:

- **Bosch DLE 50 Professional**

Technické údaje: - laserová dioda: 635 nm, < 1 mW
- měřicí rozsah: 0,05 – 50 m
- třída laseru: 2
- přesnost měření: $\pm 1,5$ mm (0,3 – 30 m)
- měrné jednotky: m / cm
- doba měření: < 0,5 s

4.2.4 Meteorologická stanice:

- WS 1600

- Technické údaje:
- rozsah měření venkovní vlhkosti vzduchu: 1 – 99%
 - rozsah měření venkovní teploty: -40 až +60 °C
 - přesnost měření vlhkosti vzduchu: ±5%
 - přesnost měření venkovní teploty: ±1 °C
 - rozlišení venkovní teploty: 0,1 °C
 - rozlišení venkovní vlhkosti vzduchu: 1%
 - rozsah měření rychlosti větru: 0 – 50 m*s⁻¹
 - rozsah měření tlaku vzduchu: 919 – 1080 hPa

4.2.5 Pomocná technika

Velký stativ použit pro hlukoměr měřící hluk mimo kabinu mobilního dopravního prostředku.

SW SL-400, přes který došlo ke stažení dat z hlukoměrů a uložení do počítače.

A dále notebook Packard Bell a propojovací kabel mini USB.

4.3 Měřené prostředky

Pro měření byly vybrány 4 mobilní energetické prostředky. Byly vybrány prostředky, jejichž místo práce je v převážné míře areál firmy, kromě pick-upu, který slouží k pohybu agronoma po areálu střediska, jízdy mezi středisky, na pole a jiné cesty.

4.3.1 Smykem řízený nakladač Bobcat S175

Smykem řízený nakladač je používán pro odkliz hnoje ze stájí dobytka. Rok výroby stroje je 2008 a odpracováno v době měření měl 6621 mth.

- Motor:
- počet válců: 4
 - objem: 2195 cm³
 - typ vstřikování: přímé, řadové čerpadlo
 - plnění: atmosférické
 - výkon: 34 kW při 2650 ot*min⁻¹
 - vnější hlučnost: - stojícího
 - za jízdy – 78,5 dB
 - nejvyšší rychlost: 10 km*h⁻¹

4.3.2 Kolový traktor Claas 420 Arion

Kolový traktor Claas je používán ve spojení s krmným vozem pro krmení dobytka ve dvou střediskách. Rok výroby traktoru je 2012 a odpracováno v době měření měl 2088 mth.

- Motor:
- počet válců: 4
 - objem: 4525 cm³
 - typ vstřikování: přímé, Common rail
 - plnění: přeplňování turbodmychadlem
 - výkon: 81 kW při 2200 ot*min⁻¹
 - vnější hlučnost: - stojícího – 80 dB při 2270 ot*min⁻¹
 - za jízdy – 81,6 dB
 - nejvyšší rychlost: 40 km*h⁻¹

4.3.3 Kolový traktor Zetor 8011

Kolový traktor Zetor je používán ve spojení s čelním nakladačem pro dovoz balíků slámy a další pomocné práce na jednom ze středisek. Rok výroby traktoru je 1973 a odpracováno v době měření měl 16350 mth.

- Motor:
- počet válců: 4
 - objem: 4562 cm³
 - typ vstřikování: přímé, řadové čerpadlo
 - plnění: atmosférické
 - výkon: 55 kW při 2200 ot*min⁻¹
 - vnější hlučnost: - stojícího
 - za jízdy
 - nejvyšší rychlost: 25 km*h⁻¹

4.3.4 Pick-up Mitsubishi L200

Nákladní automobil karoserie pick-up je používán k přepravě osob a materiálu (náhradní díly, krmivo atd.). Rok výroby vozidla je 2006 a v době měření měl najeto 255 tkm.

- Motor:
- počet válců: 4
 - objem: 2477 cm³
 - typ vstřikování: přímé, Common rail
 - plnění: přeplňování turbodmychadlem
 - výkon: 100 kW při 4000 ot*min⁻¹
 - vnější hlučnost: - stojícího – 83 dB při 3000 ot*min⁻¹
 - za jízdy – 74,5 dB
 - nejvyšší rychlost: 167 km*h⁻¹

4.4 Postup měření

4.4.1 Prostředí měření

Měření probíhalo v areálu jednoho ze středisek firmy na asfaltové ploše, po které se měřené stroje denně pohybují, a relativně volném prostranství, kdy nejbližší budova byla ve vzdálenosti 15 metrů od hlukoměru. Středisko se nachází mezi obcí Pleše a Zahoří a jeho nadmořská výška činí 460 m. n. m.

4.4.2 Instalace meteorologické stanice

Při měření hladiny akustického tlaku musí být monitorováno prostředí, ve kterém se měří, z důvodu relevantnosti naměřených hodnot. Měření se nesmí provádět, pokud je povrch pokryt sněhem či ledem, nesmí být zmrzlý ani přemokřený a rychlost větru nesmí překračovat $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Hodnoty z meteorologické stanice umístěné v blízkosti měření byly odečítány před měřením každého mobilního prostředku.

4.4.3 Kalibrace hlukoměrů

Po zapnutí hlukoměru a navolení příslušného nastavení dle návodu k obsluze byl zastrčen mikrofón do kalibrovací komory v kalibrátoru a zkontrolovalo se, aby oba přístroje těsně přiléhaly. Na kalibrátoru bylo nastaveno 1 000 Hz a 94 dB a zkontroloval se údaj naměřený hlukoměrem. Pokud hlukoměr neukazoval hodnotu 94 dB, muselo být provedeno seřízení hlukoměru kalibračním šroubem na boku hlukoměru, dokud se na displeji hlukoměru nezobrazila hodnota 94 dB.

Kalibrace se provádí na místě měření před samotným měřením.

4.4.4 Metodika měření

Pro měření byla stanovena vlastní metodika z důvodu porovnání mobilních prostředků z různých vozidlových kategorií. Vzdálenosti byly stanoveny s ohledem na podmínky prostředí měření a výskytu pracovníků a dobytka v blízkosti práce motoru mobilních prostředků, například jízda středovou chodbou stáje, či odkliz výkalů apod.

Hlukoměr zaznamenávající hladinu akustického tlaku vně mobilního prostředku byl umístěn na stativu. Pro jízdní zkoušky byla stanovena dráha o délce 100 m, hlukoměr umístěný na stativu ve výšce 1,3 m a vzdálenosti od kapotáže

motoru 2,5 m byl umístěn ve středu dráhy, tedy 50 m od začátku dráhy. Pro statické zkoušky byla zvolena vzdálenost rovněž 2,5 m od kapotáže motoru a výška stativu 1,3 m. Měření vzdáleností bylo prováděno laserovým dálkoměrem.

Hlukoměr zaznamenávající hladinu akustického tlaku uvnitř mobilního prostředku byl držen v ruce přibližně v oblasti hlavy obsluhy konkrétního mobilního prostředku. Během měření byla zavřena všechna okna, dveře, vypnutá ventilace, případně radiový přijímač.

Při jízdních zkouškách byla rychlost prostředku zvolena na obvykle využívanou hodnotu rychlosti při přejezdech po areálu, v případě kolových traktorů byla určena stejná hodnota rychlosti.

Při statických zkouškách měření probíhalo při volnoběžných otáčkách motoru a zvýšených, případně maximálních otáčkách motoru. Měření se uskutečňovalo po ustálení hladiny akustického tlaku na displeji hlukoměrů a měřilo se po dobu 30 sekund.

Z důvodu poměrně malých vzdáleností, případně vyznačených bodů při jízdních zkouškách, byla komunikace mezi obsluhou hlukoměrů zvolena na signály paží.

4.4.5 Měření

Postup při měření byl následující:

- přistavení energetického mobilního prostředku na měřicí místo,
- změření vzdálenosti od kapotáže motoru a přesné umístění hlukoměru na stativu,
- poučení obsluhy stroje o ovládání hlukoměru a požadavku, kde uvnitř kabiny měřit,
- zapsání hodnot z meteorologické stanice,
- nastavení obou hlukoměrů a předání jednoho z nich obsluze prostředku,
- signálem paží bylo zahájeno vždy konkrétní měření,
- po ukončení měření obsluha prostředku předala hlukoměr a data byla ihned stažena do počítače a zkontrolována, v případě pochybností nad nějakou nezvykle vysokou hodnotou bylo měření opakováno.

5. Výsledky měření

5.1 Zpracování naměřených hodnot

Po stažení dat z hlukoměrů do počítače byly naměřené hodnoty v podobě souboru textového dokumentu. Pro další zpracování hodnot a jejich přehlednost je nutné data převést do souboru excelového dokumentu.

Ke zpracování hodnot byl využit program Microsoft Excel 2010, s jeho pomocí byly vytvořeny spojnicové grafy z naměřených hodnot, použité v této diplomové práci, a dále vypočteny ekvivalentní hladiny akustického tlaku a zjištěna minimální a maximální hodnota zaznamenaná během měření.

5.2 Použité vzorce

Pro výpočet ekvivalentní hladiny akustického tlaku byl použit vzorec číslo 14 z kapitoly 3.2.8.2 Hladina akustického tlaku.

Dále funkce MIN k určení minimální hodnoty, funkce MAX k určení maximální hodnoty a funkce PRŮMĚR k vypočtení aritmetického průměru, protože platí:

Je-li rozptyl hodnot menší než 5 dB ($\pm 2,5$ dB) je možno jako výslednou hodnotu volit aritmetický průměr.⁷⁹

⁷⁹ Jaksch, Ivan: Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky, Liberec: TUL, 2010. 15 s.

5.3 Výsledné hodnoty a jejich vyhodnocení

Všechny hodnoty naměřené v této diplomové práci jsou ze dne 6. února 2015.

5.3.1 Smykem řízený nakladač Bobcat S175

5.3.1.1 Meteorologické podmínky

Při měření hladiny akustického tlaku produkovaného motorem mobilního energetického prostředku Bobcat S175 meteorologické podmínky byly:

- teplota vzduchu: 4 °C
- vlhkost vzduchu: 63 %
- atmosférický tlak: 1019 hPa
- bezvětří

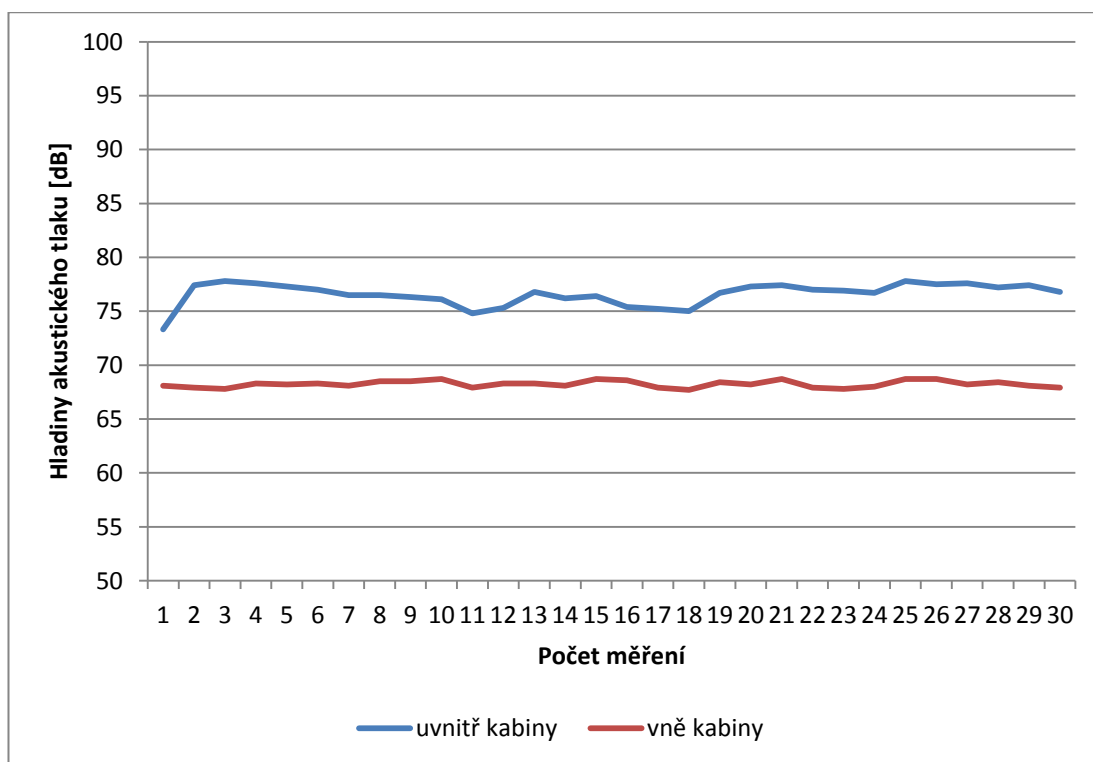


Obrázek 9 Smykem řízený nakladač Bobcat S175

5.3.1.2 Hluk při volnoběžných otáčkách

Tabulka 5 Naměřené a vypočtené hodnoty Bobcat S175, volnoběžné otáčky

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	73,3	67,7
Maximum [dB]	77,8	68,7
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	76,6	68,2
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	38,8	48

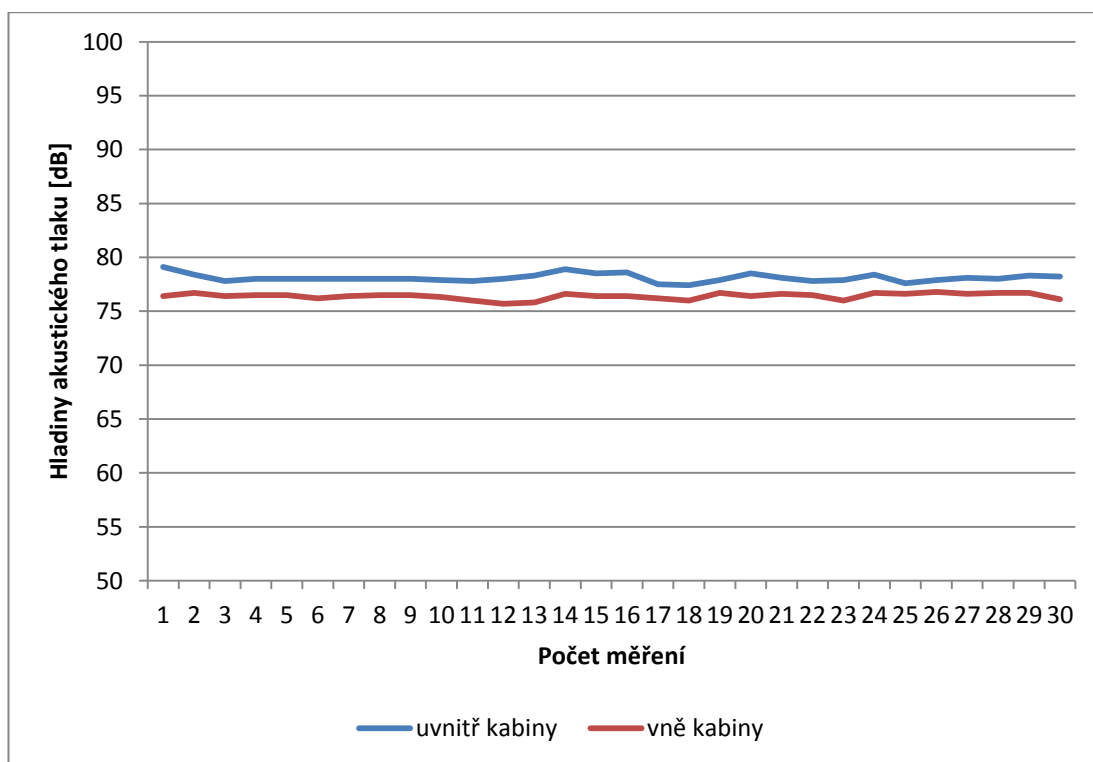


Graf 1 Hluk při volnoběžných otáčkách, Bobcat S175

5.3.1.3 Hluk při zvýšených otáčkách (2650 ot*s⁻¹)

Tabulka 6 Naměřené a vypočtené hodnoty Bobcat S175, zvýšené otáčky (maximální)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	77,4	75,7
Maximum [dB]	79,1	76,8
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	78	76,4
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	38,8	48

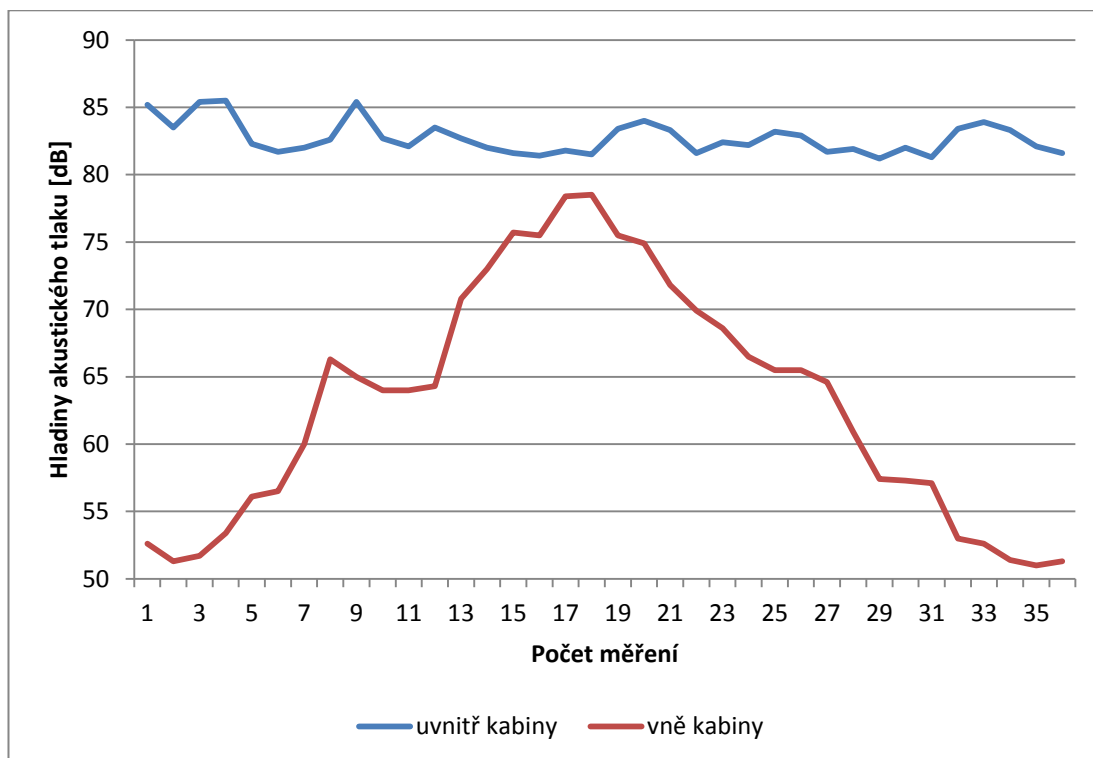


Graf 2 Hluk při zvýšených otáčkách (maximálních), Bobcat S175

5.3.1.4 Hluk při jízdě zkoušce

Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty Bobcat S175 (jízdě zkouška)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	10	10
Otáčky [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	2650	2650
Délka tratě [m]	100	100
Délka měření [s]	36	36
Minimum [dB]	81,2	51
Maximum [dB]	85,5	78,5
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	82,7	70,2
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	38,8	48



Graf 3 Hluk při jízdě zkoušce ($10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), Bobcat S175

5.3.2 Kolový traktor Claas 420 Arion

5.3.2.1 Meteorologické podmínky

Při měření hladiny akustického tlaku produkovaného motorem mobilního energetického prostředku Claas 420 Arion meteorologické podmínky byly:

- teplota vzduchu: 4,7 °C
- vlhkost vzduchu: 60 %
- atmosférický tlak: 1019 hPa
- bezvětří

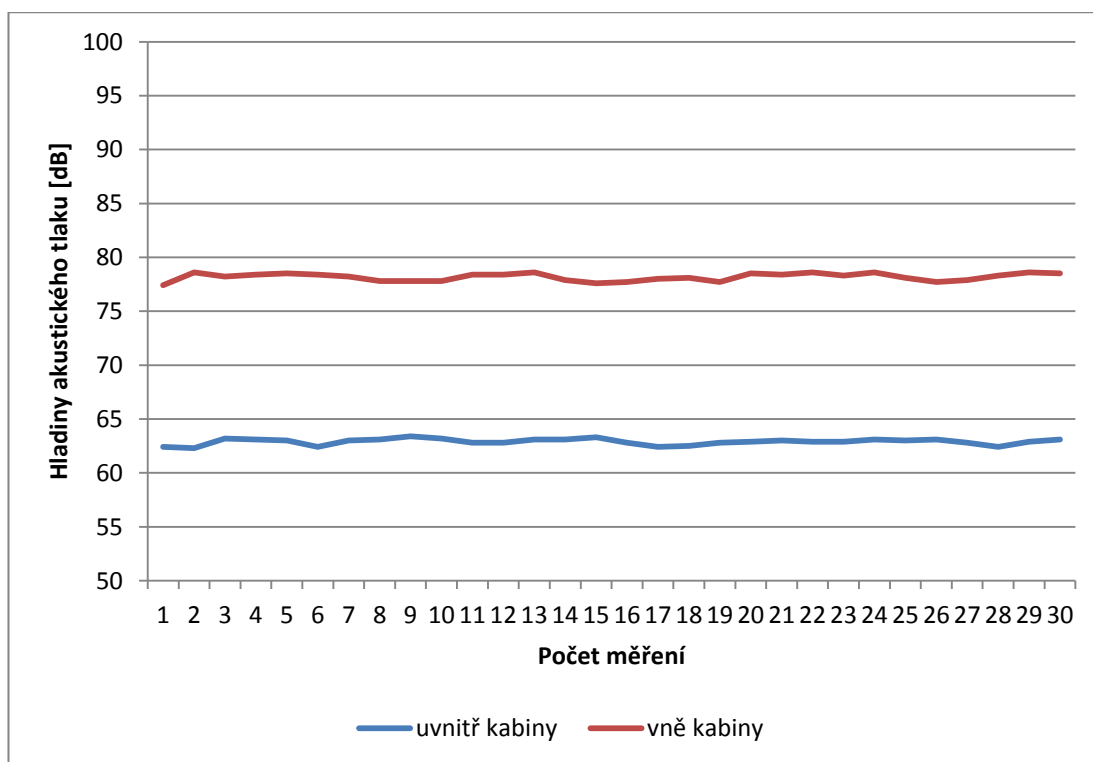


Obrázek 10 Kolový traktor Claas 420 Arion

5.3.2.2 Hluk při volnoběžných otáčkách

Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty Claas 420 Arion, volnoběžné otáčky

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	62,3	77,4
Maximum [dB]	63,4	78,6
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	62,9	78,2
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	47,6

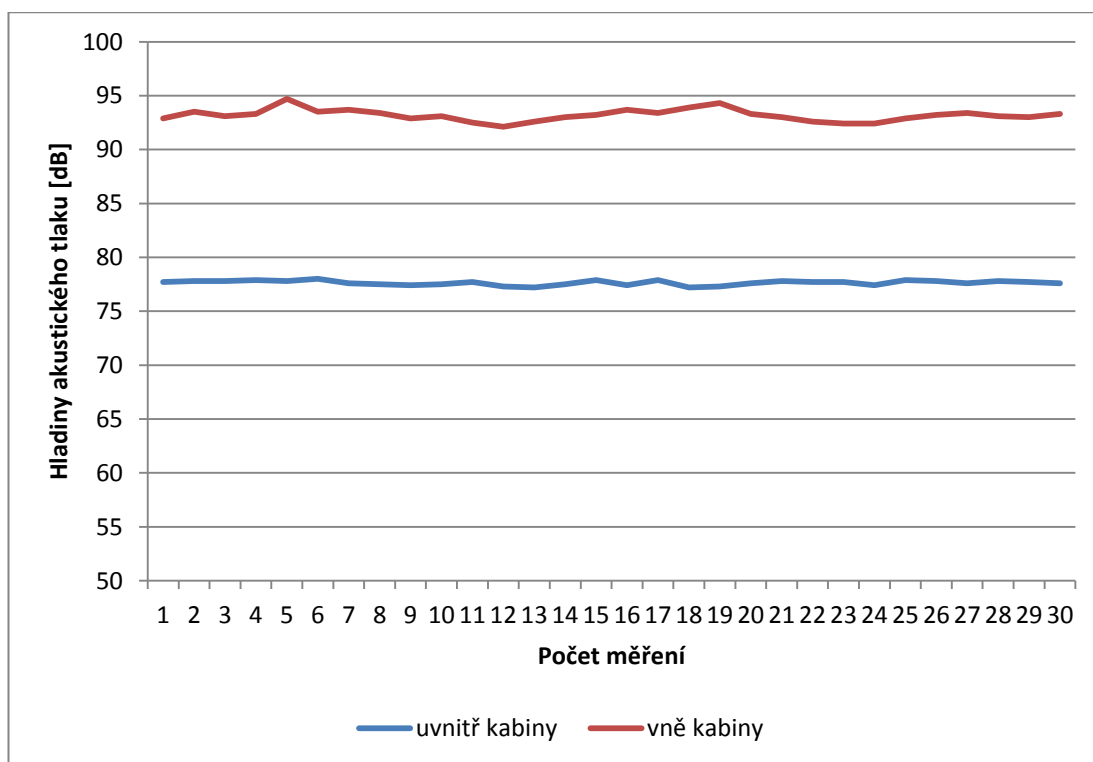


Graf 4 Hluk při volnoběžných otáčkách, Claas 420 Arion

5.3.2.3 Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s⁻¹)

Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty Claas 420 Arion, zvýšené otáčky (2200 ot*s⁻¹)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	77,2	92,1
Maximum [dB]	78	94,7
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	77,6	93,2
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	47,6

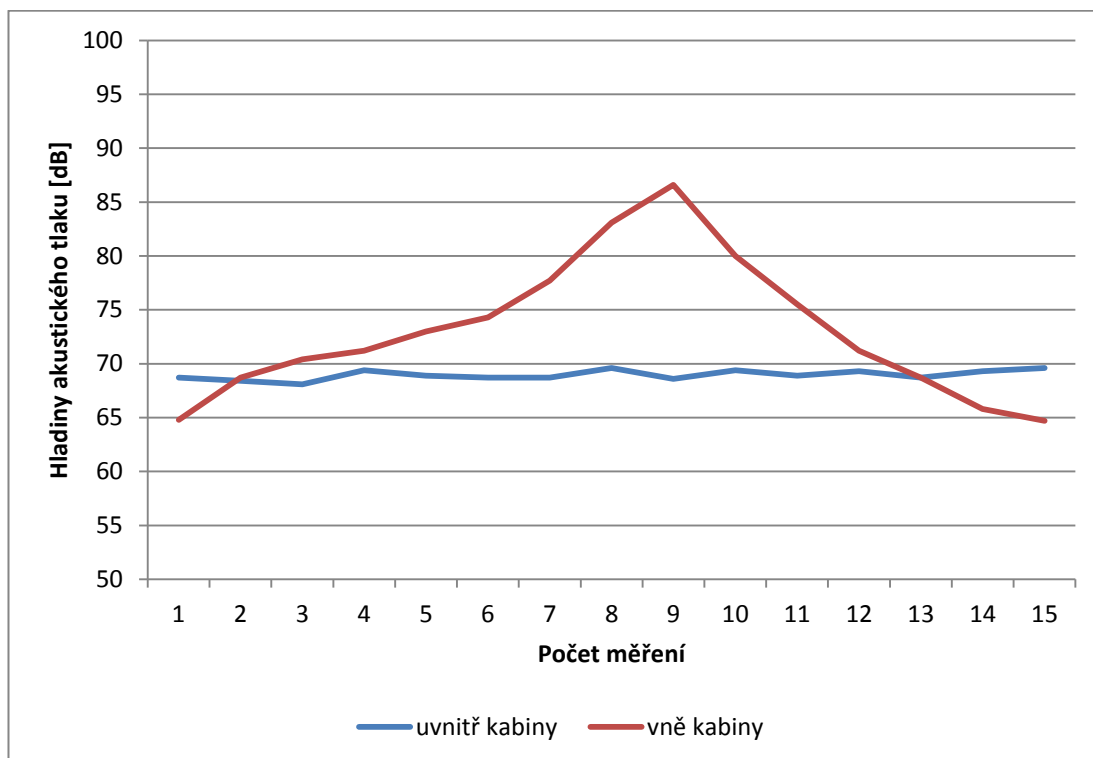


Graf 5 Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s⁻¹), Claas 420 Arion

5.3.2.4 Hluk při jízdě zkoušce

Tabulka 10 Naměřené a vypočtené hodnoty Claas 420 Arion (jízdě zkouška)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	25	25
Otáčky [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	1700	1700
Délka tratě [m]	100	100
Délka měření [s]	15	15
Minimum [dB]	68,1	64,7
Maximum [dB]	69,6	86,6
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	69	78,1
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	47,6



Graf 6 Hluk při jízdě zkoušce ($25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), Claas 420 Arion

5.3.3 Kolový traktor Zetor 8011

5.3.3.1 Meteorologické podmínky

Při měření hladiny akustického tlaku produkovaného motorem mobilního energetického prostředku Zetor 8011 meteorologické podmínky byly:

- teplota vzduchu: 4,5 °C
- vlhkost vzduchu: 59 %
- atmosférický tlak: 1019 hPa
- bezvětří

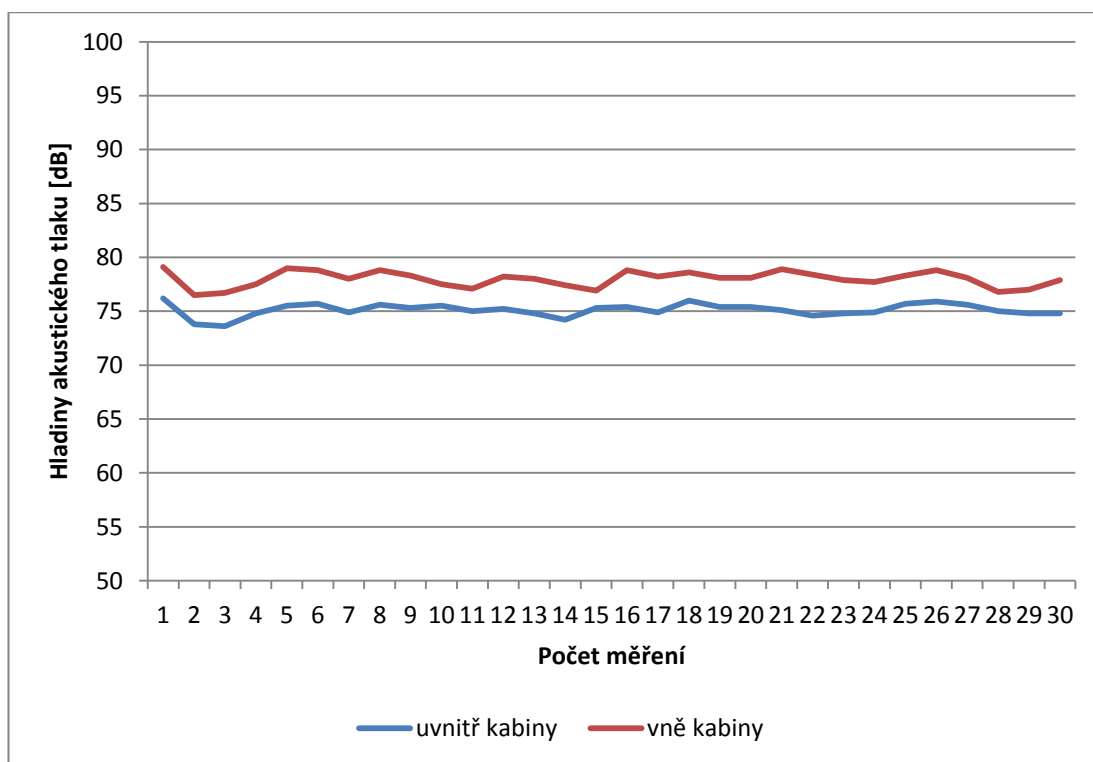


Obrázek 11 Kolový traktor Zetor 8011

5.3.3.2 Hluk při volnoběžných otáčkách

Tabulka 11 Naměřené a vypočtené hodnoty Zetor 8011, volnoběžné otáčky

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	73,6	76,5
Maximum [dB]	76,2	79,1
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	75,1	78
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	40,9

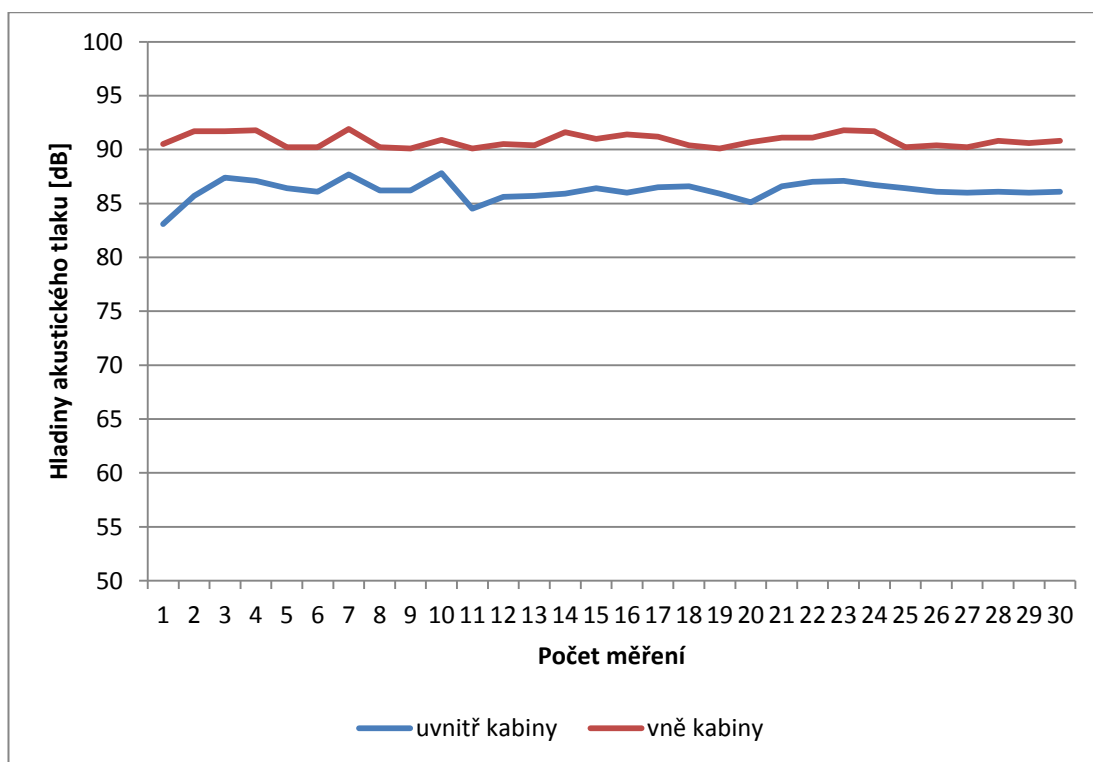


Graf 7 Hluk při volnoběžných otáčkách, Zetor 8011

5.3.3.3 Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s⁻¹)

Tabulka 12 Naměřené a vypočtené hodnoty Zetor 8011, zvýšené otáčky (2200 ot*s⁻¹)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	83,1	90,1
Maximum [dB]	87,8	91,9
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	86,2	90,8
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	40,9

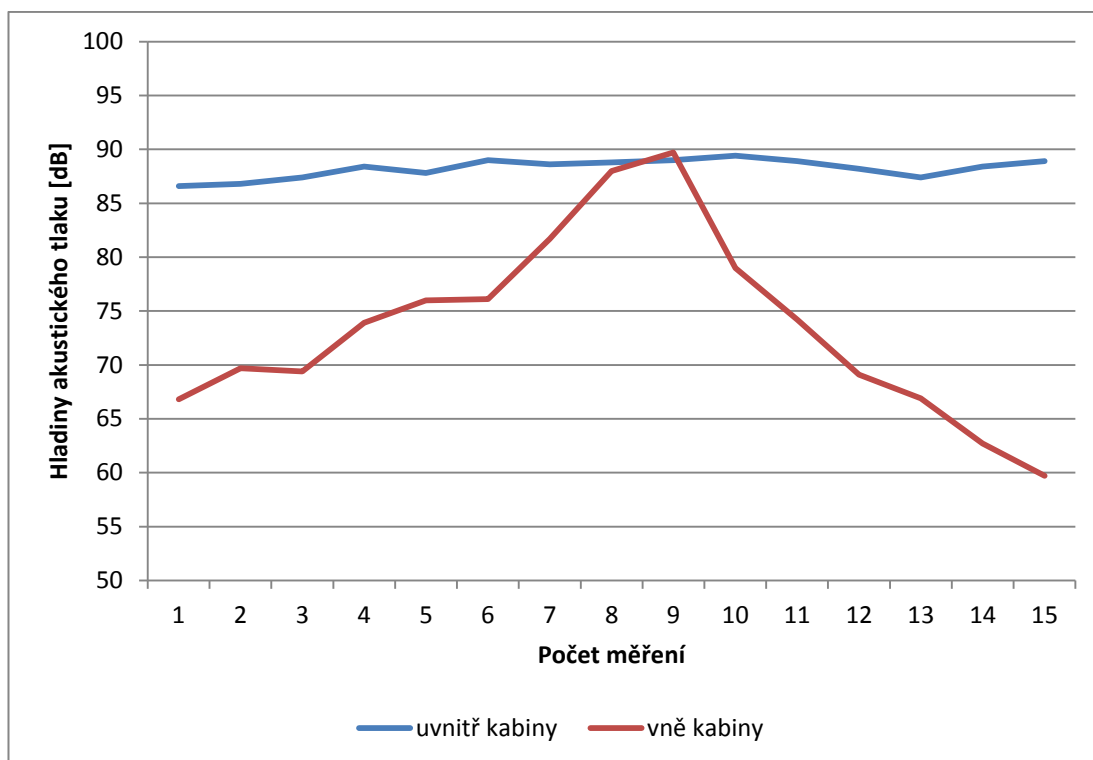


Graf 8 Hluk při zvýšených otáčkách (2200 ot*s⁻¹), Zetor 8011

5.3.3.4 Hluk při jízdě zkoušce

Tabulka 13 Naměřené a vypočtené hodnoty Zetor 8011 (jízdě zkouška)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	25	25
Otáčky [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	2200	2200
Délka tratě [m]	100	100
Délka měření [s]	15	15
Minimum [dB]	86,6	59,7
Maximum [dB]	89,4	89,7
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	88,2	81,2
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	40	40,9



Graf 9 Hluk při jízdě zkoušce ($25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), Zetor 8011

5.3.4 Pick-up Mitsubishi L200

5.3.4.1 Meteorologické podmínky

Při měření hladiny akustického tlaku produkovaného motorem mobilního energetického prostředku Mitsubishi L200 meteorologické podmínky byly:

- teplota vzduchu: 3,5 °C
- vlhkost vzduchu: 64 %
- atmosférický tlak: 1019 hPa
- bezvětří

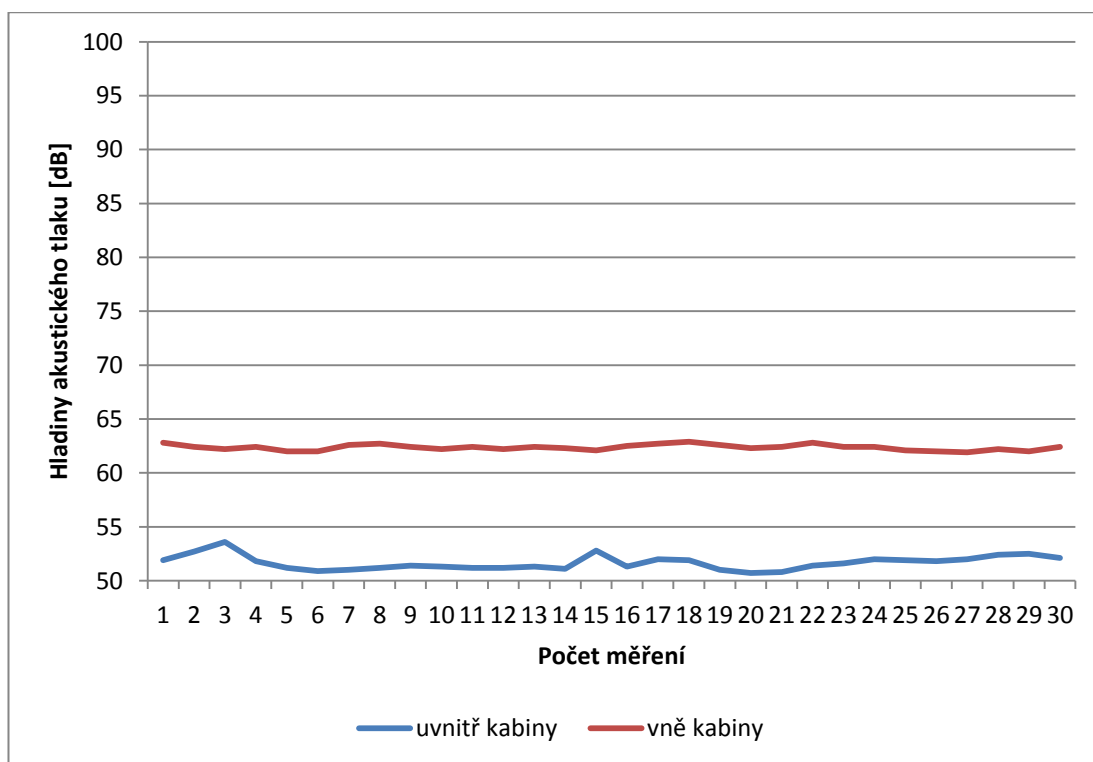


Obrázek 12 Pick-up Mitsubishi L200

5.3.4.2 Hluk při volnoběžných otáčkách

Tabulka 14 Naměřené a vypočtené hodnoty Mitsubishi L200, volnoběžné otáčky

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	50,7	61,9
Maximum [dB]	53,6	62,9
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	51,7	62,4
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	43,4	47,5

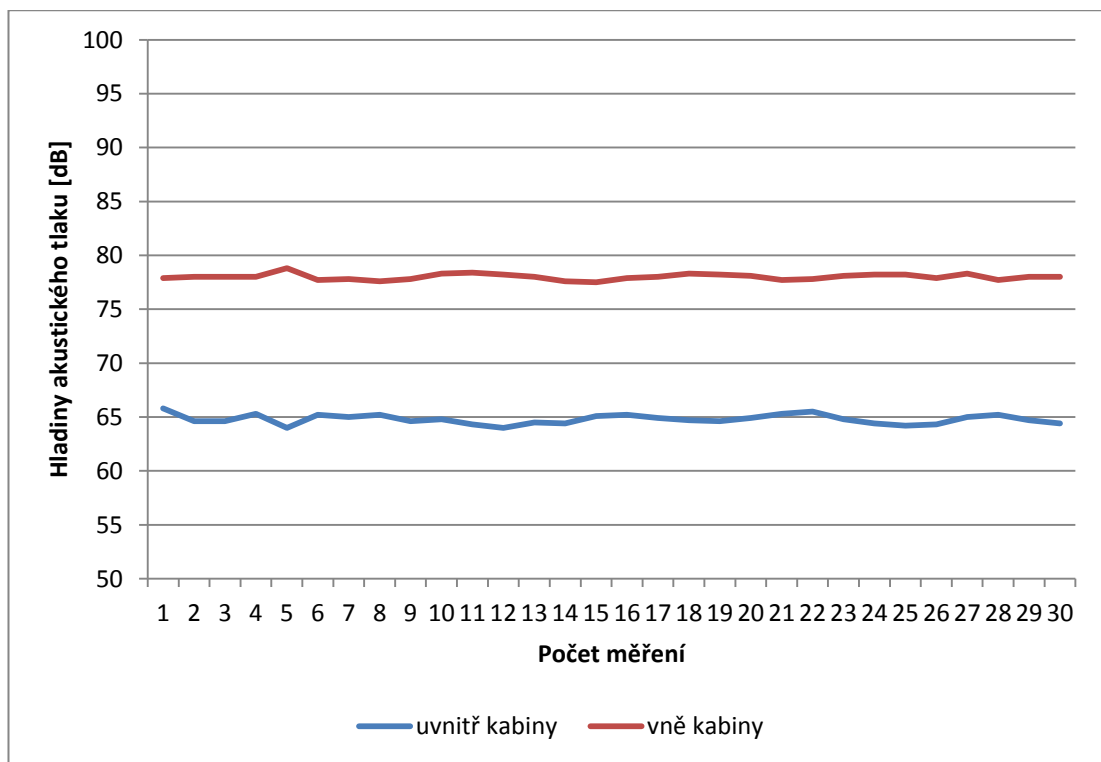


Graf 10 Hluk při volnoběžných otáčkách, Mitsubishi L200

5.3.4.3 Hluk při zvýšených otáčkách (3000 ot*s⁻¹)

Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty Mitsubishi L200, zvýšené otáčky (3000 ot*s⁻¹)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Délka měření [s]	30	30
Minimum [dB]	64	77,5
Maximum [dB]	65,8	78,8
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	64,8	78
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	43,4	47,5

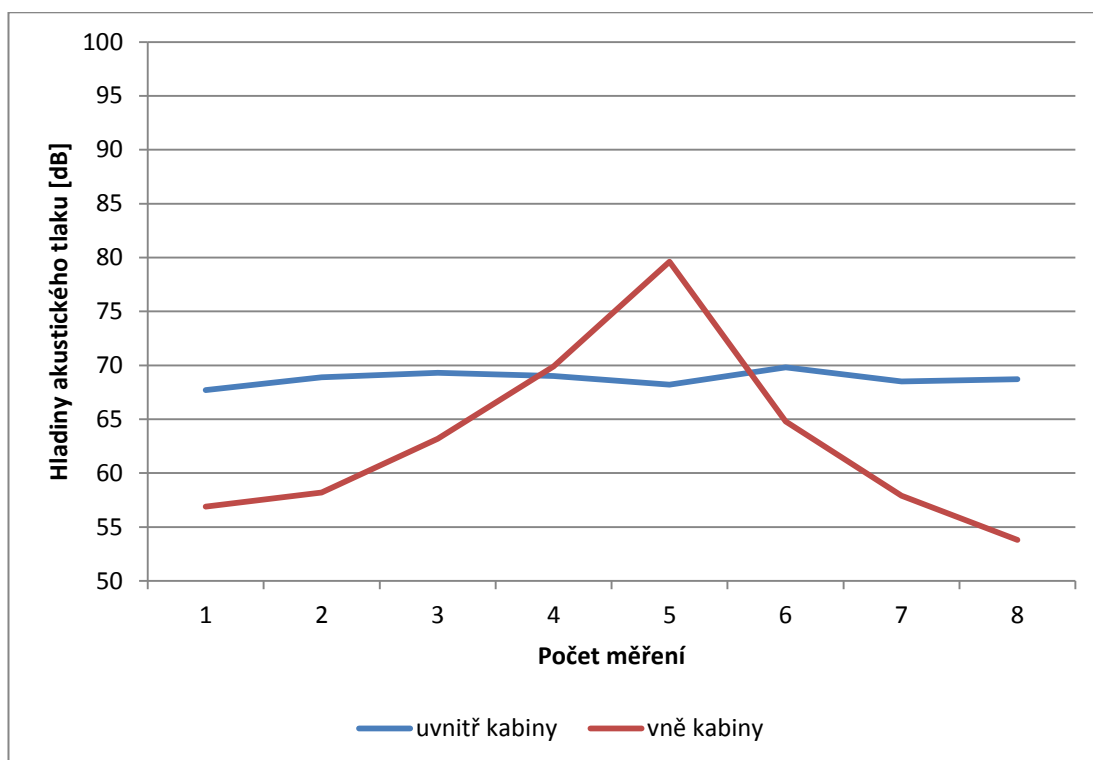


Graf 11 Hluk při zvýšených otáčkách (3000 ot*s⁻¹), Mitsubishi L200

5.3.4.4 Hluk při jízdě zkoušce

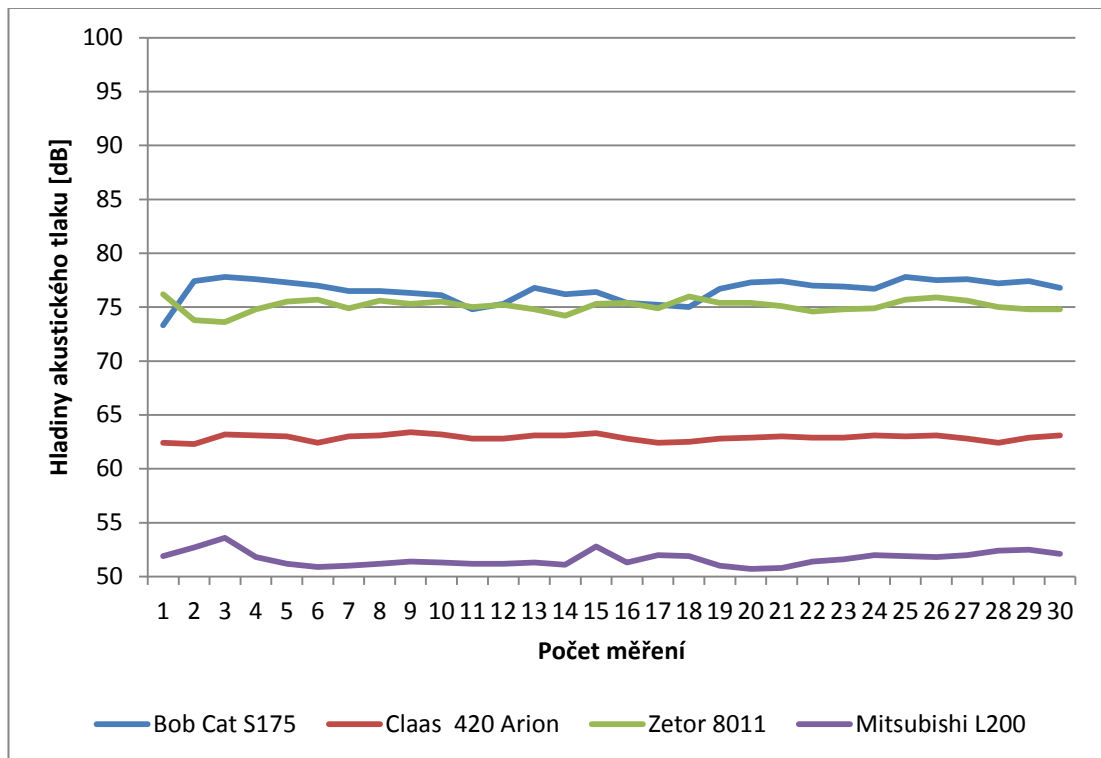
Tabulka 16 Naměřené a vypočtené hodnoty Mitsubishi L200 (jízdě zkouška)

	Uvnitř kabiny	Vně kabiny
Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	50	50
Otáčky [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	2200	2200
Délka tratě [m]	100	100
Délka měření [s]	8	8
Minimum [dB]	67,7	53,8
Maximum [dB]	69,8	79,6
Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]	68,8	71,3
Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí [dB]	43,4	47,5

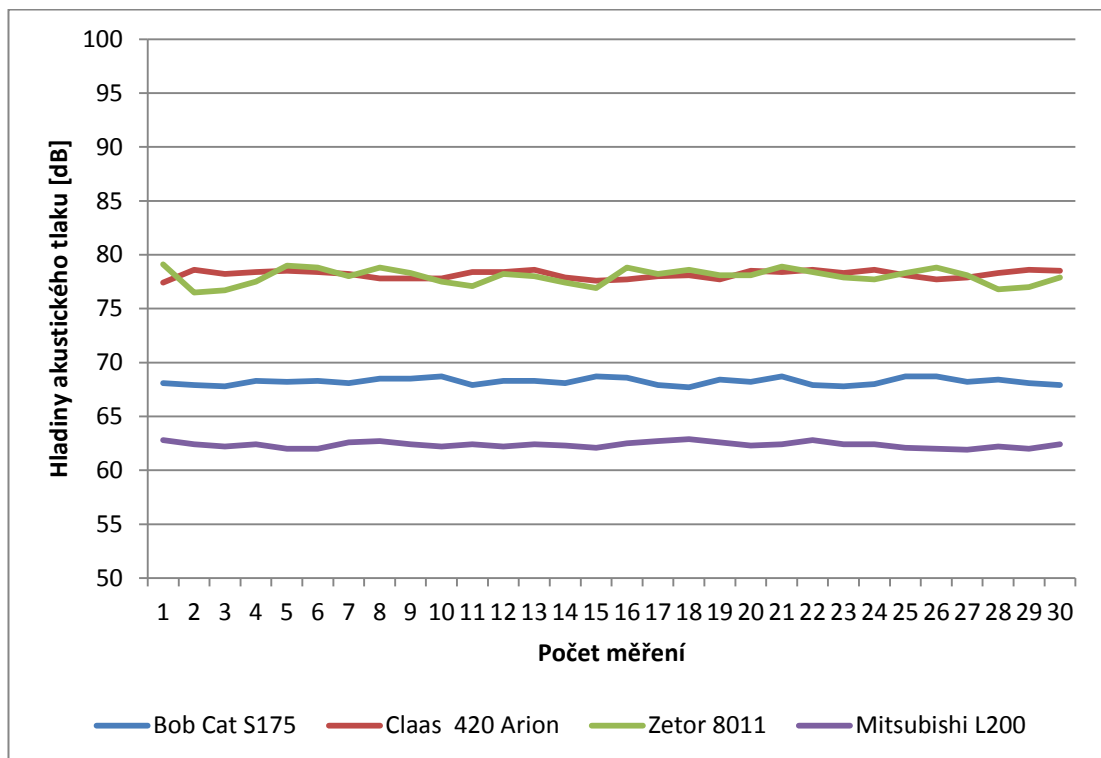


Graf 12 Hluk při jízdě zkoušce ($50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), Mitsubishi L200

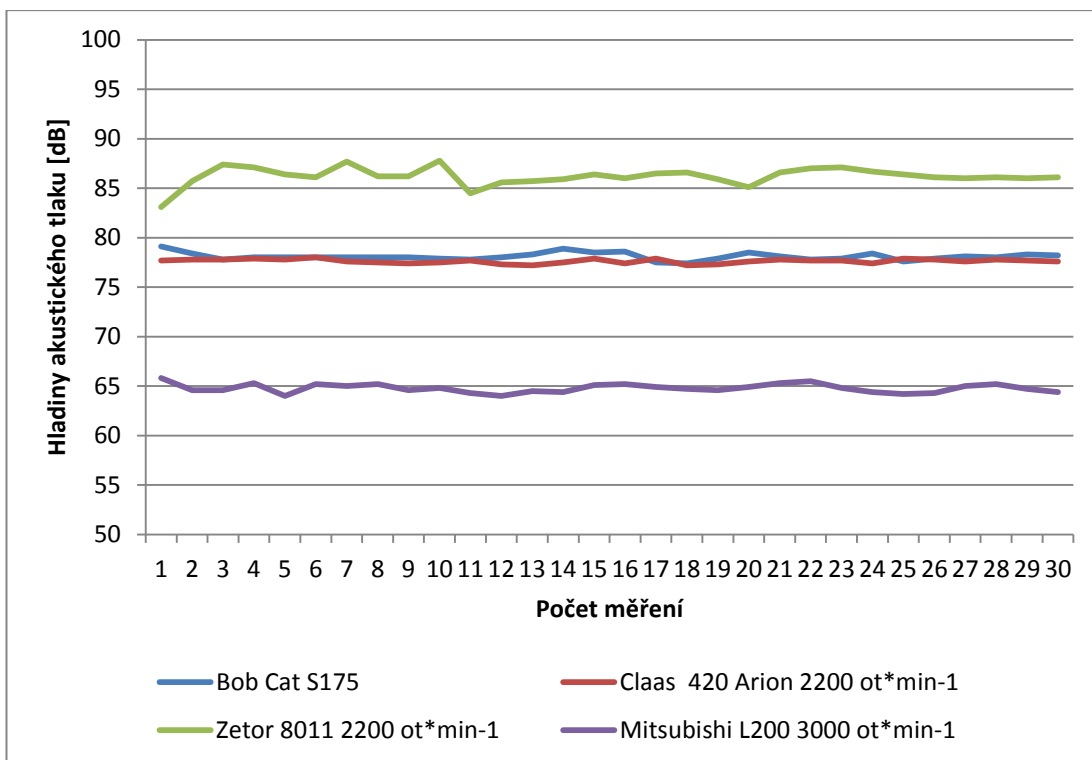
5.3.5 Porovnání hodnot



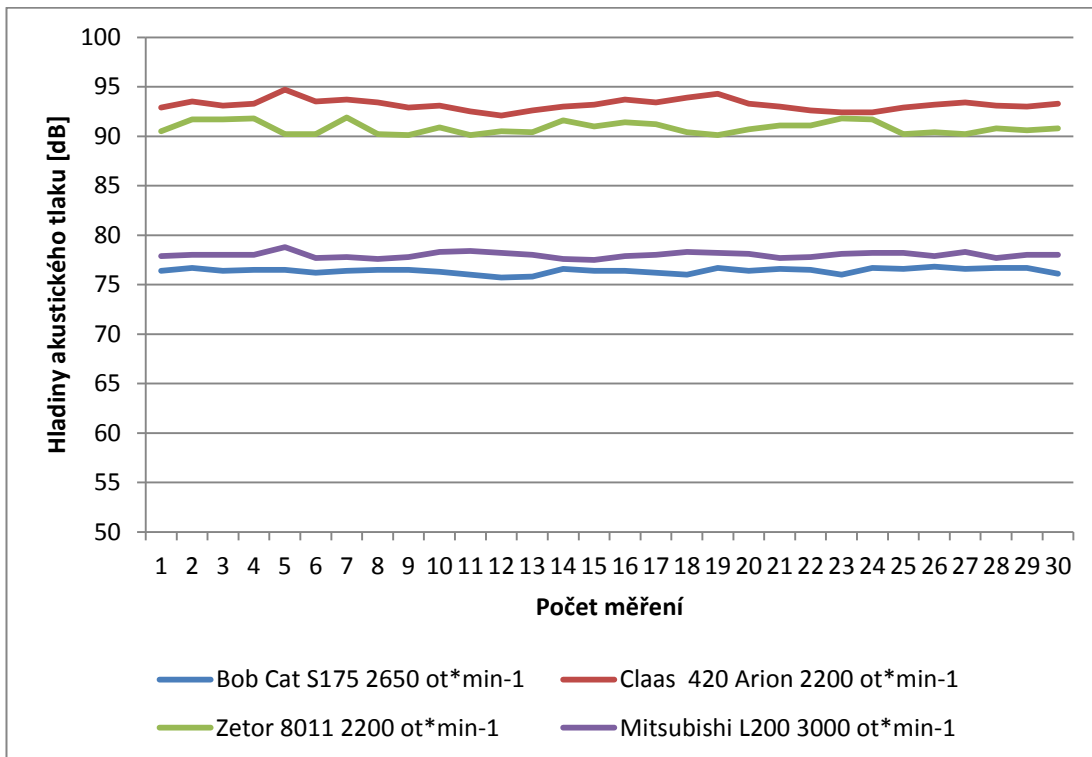
Graf 13 Hluk uvnitř kabiny při volnoběžných otáčkách



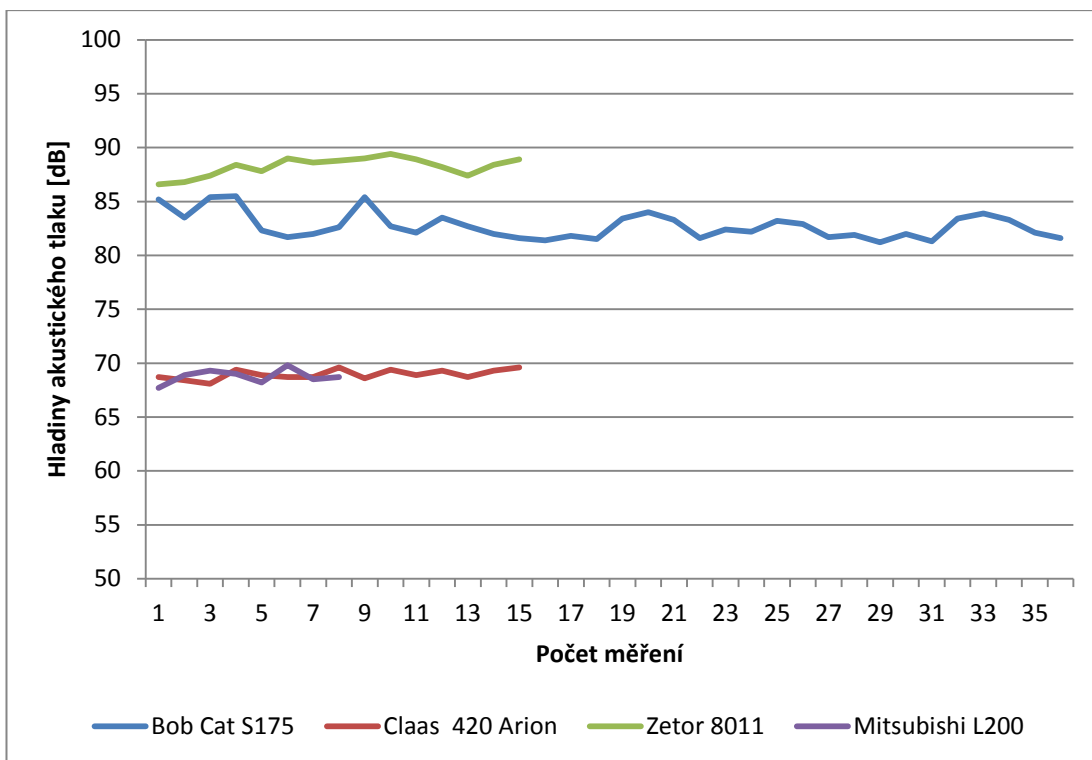
Graf 14 Hluk vně kabiny při volnoběžných otáčkách



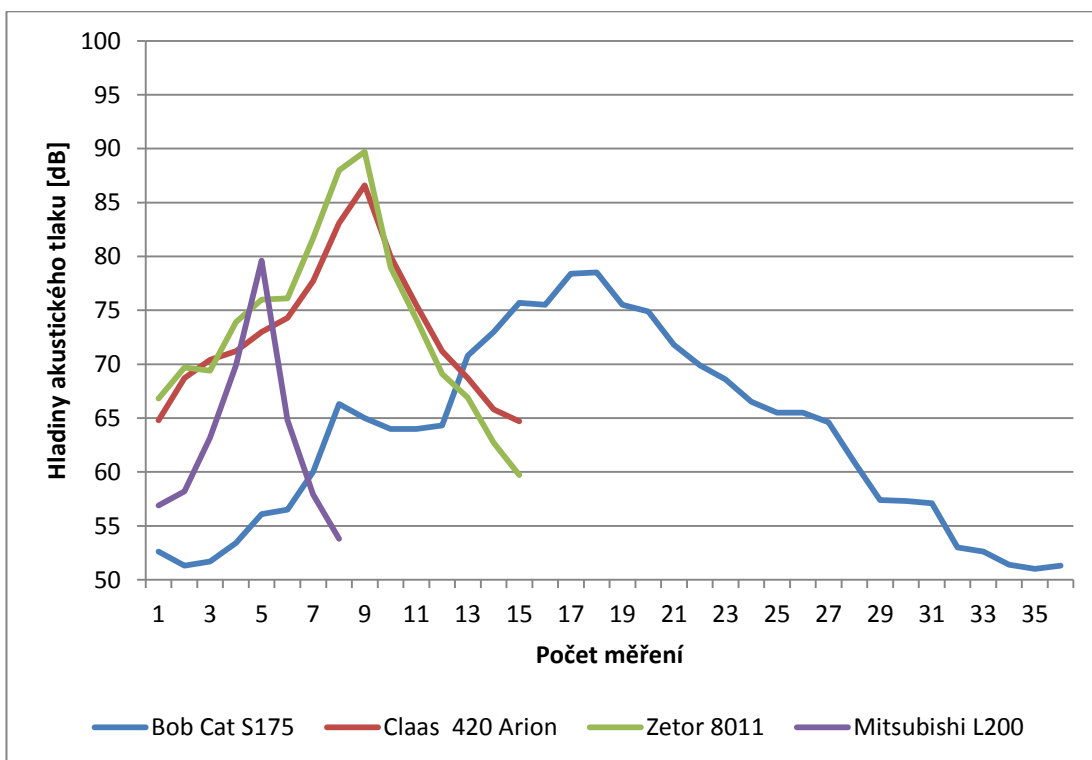
Graf 15 Hluk uvnitř kabiny při zvýšených otáčkách



Graf 16 Hluk vně kabiny při zvýšených otáčkách



Graf 17 Hluk uvnitř kabiny při jízdě zkoušce (z důvodu rozdílných rychlostí a pevně daného úseku měření je u jednotlivých prostředků rozdílný počet měření)



Graf 18 Hluk vně kabiny při jízdě zkoušce (z důvodu rozdílných rychlostí a pevně daného úseku měření je u jednotlivých prostředků rozdílný počet měření)

Tabulka 17 Celkový přehled (porovnání) ekvivalentních hladin akustického tlaku

	volnoběžné otáčky [dB]	zvýšené otáčky [dB]	jízdní zkouška [dB]
Bobcat S175 uvnitř kabiny	76,6	78	82,7
Bobcat S175 vně kabiny	68,2	76,4	70,2
Claas 420 Arion uvnitř kabiny	62,9	77,6	69
Claas 420 Arion vně kabiny	78,2	93,2	78,1
Zetor 8011 uvnitř kabiny	75,1	86,2	88,2
Zetor 8011 vně kabiny	78	90,8	81,2
Mitsubishi L200 uvnitř kabiny	51,7	64,8	68,8
Mitsubishi L200 vně kabiny	62,9	78	71,3

6. Diskuze

K měření byly vybrány záměrně takové stroje, které přijdou do akustického kontaktu s více lidmi či zvířaty. Při výběru složení strojů pro měření bylo cílem měřit „starý“ a „nový“ traktor, což se podařilo v podobě Zetoru 8011 vyrobeného v roce 1973 a Claas 420 Arion z roku 2012. Dále jsou v zemědělství často využívané nakladače a manipulátory, zastoupení této kategorie zajišťoval smykem řízený nakladač Bobcat S175 vyrobený v roce 2008. Přepravu osob a menších nákladů zajišťují zpravidla vozidla kategorie pick-up, které už mají blízko k osobním vozidlům, ve kterých jel či se vezl v podstatě každý. Bylo tedy možno rámcově porovnat zatížení obsluhy zemědělských strojů hlukem s hlukem při přepravě osob osobními automobily. Kategorie pick-up byla zastoupena vozidlem Mitsubishi L200 vyrobeného roku 2006.

Stanovení režimů práce motorů bylo voleno s ohledem na využití pracovních prostředků. Volnoběžné otáčky motoru by měly představovat nejnižší hladinu akustického tlaku, jakou motor produkuje. Zvýšené otáčky motoru i u nepohybujícího se prostředku jsou v zemědělství poměrně časté, jedná se o případy, kdy je potřeba zvýšit výkon motoru pro pohon připojených zařízení, např. čerpadlo hydrauliky. Navíc by tyto otáčky měly představovat nejvyšší hladinu akustického tlaku, jakou motor produkuje. Zatížení obsluhy hlukem při jízdě mobilním prostředkem bylo měřeno jízdni zkouškou, ve které byla volena rychlost, jaká je v tomto konkrétním podniku u konkrétního stroje nejčastěji využívána.

Ekvivalentní hladina akustického tlaku při volnoběžných otáčkách byla zjištěna u smykem řízeného nakladače Bobcat S175 uvnitř kabiny o 8,4 dB vyšší než vně kabiny. Subjektivním vnímáním pomalu dvojnásobná hlučnost. U ostatních mobilních prostředků byla naměřena ekvivalentní hladina akustického tlaku uvnitř kabiny nižší než vně kabiny. Podobně tomu bylo při zvýšených otáčkách, kdy smykem řízený nakladač Bobcat S175 opět vykázal ekvivalentní hladinu akustického tlaku uvnitř kabiny vyšší než vně, ale už jen o 1,6 dB. U ostatních mobilních prostředků tomu bylo opačně. Lze z toho vyvozovat, že uvnitř kabiny Bobcatu S175 dochází k velkému odrazu zvukových vln, které původní hluk zesilují. U Zetoru 8011 je rozdíl při volnoběžných otáčkách mezi hlukem uvnitř kabiny a vně kabiny 2,9 dB, při zvýšených otáčkách 4,6 dB. Což značí, že kabina zetoru není příliš

utlumena, aby bylo zabráněno pronikání hluku k obsluze. Zatímco u Claas 420 Arion byly naměřeny hodnoty vně kabiny při volnoběžných otáčkách o 15,3 dB vyšší a při zvýšených otáčkách o 15,6 dB vyšší než uvnitř kabiny a u Mitsubishi L200 byl naměřen rozdíl při volnoběžných otáčkách 11,2 dB a při zvýšených 13,2 dB. Utlumení kabiny u Claase 420 Arion a Mitsubishi L200 je subjektivním vnímáním člověka více než dvojnásobné oproti hlučnosti vně kabiny, utlumení lze tedy označit za výrazné.

Samotné ekvivalentní hladiny akustického tlaku při volnoběžných otáčkách v kabině mobilních prostředků seřazené od nejnižší hodnoty jsou u Mitsubishi L200 51,7 dB, Claas 420 Arion 62,9 dB, Zetor 8011 75,1 dB a Bobcat S175 76,6 dB. Zetor a Bobcat mají subjektivně vnímanou hlučnost více jak dvojnásobnou oproti Claasu, přičemž i Claas je subjektivně více jak dvakrát hlučnější oproti pick-upu.

Ekvivalentní hladiny akustického tlaku při volnoběžných otáčkách vně kabiny mobilních prostředků seřazené od nejnižší hodnoty jsou u Mitsubishi L200 62,9 dB, Bobcat S175 68,2 dB, Zetor 8011 78 dB a Claas 420 Arion 78,2 dB. Zde je vidět zároveň ve srovnání s hlučností uvnitř kabiny, že hlučnost vyzařovaná motorem do vnějšího okolí u Claase nebyla prioritní a hodnota je v podstatě stejná jako u Zetoru. Mitsubishi dosahuje o více jak 15 dB nižší ekvivalentní hladiny oproti oběma kolovým traktorům.

Z výsledků je patrné, že rozdíly mezi volnoběžnými a zvýšenými otáčkami jsou mezi 10 až 15 dB, kromě smykem řízeného nakladače, u kterého subjektivním posouzením zvuku byl malý rozdíl mezi volnoběžnými a maximálními otáčkami – nebyl přítomen otáčkoměr. Rozdíl v hlučnosti v kabině byl u smykem řízeného nakladače naměřen 1,4 dB a vně kabiny 8,2 dB. Rozdíl hlučnosti v kabině mezi volnoběžnými a zvýšenými otáčkami je na samé hranici rozpoznatelnosti. Zatímco vně kabiny rozdílu atakuje hranici 10 dB, která představuje pro vnímání člověka dvojnásobnou hlučnost. Lze tedy říci, že u ostatních mobilních prostředků je rozdíl mezi volnoběžnými a zvýšenými otáčkami subjektivním vnímáním člověka více než dvojnásobný jak uvnitř kabiny, tak vně.

Hodnoty uvnitř kabiny při zvýšených otáčkách seřazené od nejnižších jsou u Mitsubishi L200 64,8 dB, Claas 420 Arion 77,6 dB, Bobcat S175 78 dB a Zetor 8011 86,2 dB. V případě Zetoru je ekvivalentní hladina akustického tlaku nad hodnotou

danou legislativou, tudíž v případě vykonávání práce obsluhou prostředku v tomto režimu práce motoru by nejspíše došlo k překročení limitu po dobu pracovní doby. Ke zjištění onoho stavu by bylo zapotřebí udělat měření hluku po dobu pracovní doby obsluhy prostředku, což by mohl být námět k dalšímu výzkumu.

Hodnoty při zvýšených otáčkách vně kabiny seřazené od nejnižších jsou u Bobcat S175 76,4 dB, Mitsubishi L200 78 dB, Zetor 8011 90,8 dB a Claas 420 Arion 93,2 dB. Hodnoty kolových traktorů jsou značně vysoké a překračují 85 dB, přičemž hlučnější o 2,4 dB je Claas.

Jízdními zkouškami bylo zjištěno, že hodnoty uvnitř kabiny se u Bobcatu a Zetoru změnilo o 4,7 dB a 2 dB směrem nahoru oproti měření statickému při zvýšených otáčkách. Nejspíše z důvodu nízkých maximálních rychlostí samotných prostředků, na kterých jízdni zkouška probíhala. Zatímco u Claase měřená rychlost $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ představovala pouze 62,5% z maximální rychlosti a motor točil $1700 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, byla hlučnost 69 dB. U Mitsubishi byla hodnota 68,8, o 4 dB vyšší než u stojícího vozidla a motorem točícím $3000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, přičemž motor při rychlosti $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ točil méně otáček, $2200 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, lze to odůvodnit začínajícím aerodynamickým hlukem a hlukem od kol. Při jízdni zkoušce byla hodnota Zetoru opět nad povoleným limitem o 3,2 dB hodnotou 88,2 dB. Claas při rychlosti $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ vykázal hlučnost srovnatelnou s Mitsubishi při rychlosti $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Měření mimo kabinu bylo specifické variabilní délkou zdroje hluku od hlukoměru. Ekvivalentní hodnota akustického tlaku na vzdálenosti 100 m je 71,3 dB u Mitsubishi L200, 70,2 dB u Bobcatu S175, 78,1 dB u Claasu 420 Arion a 81,2 u Zetoru 8011.

Zatížení osob hlukem pohybujících se v blízkosti prostředku je poměrně vysoké a atakuje limitní úroveň či ji překonává. V případě práce stroje v blízkosti zvířat jde o hodnoty též vysoké a hluk působící na zvířata může negativně ovlivňovat produkci mléka, přírůstek na hmotnosti, vytvářet nepohodu ve stádě, případně způsobit i zranění v případě polekání, např. při nastartování stroje ve stáji.

Pokud se má odpovědět na samotný název diplomové práce, jaký vliv má režim práce na hladinu akustického tlaku, lze hovořit o vlivu výrazném. Bohužel režim práce motoru nelze příliš ovlivňovat, protože každá situace si žádá určitý režim

práce motoru. Do jisté míry lze doporučit snížit otáčky motoru a zvýšit zatížení motoru, ale řada přídatných strojů vyžaduje určité otáčky pro svou (bezchybnou) práci. Navíc se může stát, že v nižších otáčkách motor nebude produkovat dostatečný výkon, jaký momentální situace žádá.

6.1 Návrh opatření pro snížení hlukové zátěže

Návrh opatření pro snížení hlukové zátěže obsluhy lze především doporučit u kolového traktoru Zetor 8011.

6.1.1 Osobní ochranné pomůcky

Osobní ochranné pomůcky, mezi které patří špunty do uší, lze koupit už v řádu desetikorun a útlum hluku je v desítkách dB. Tyto pomůcky jsou schopny snížit hlukovou zátěž uší člověka, lidské tělo je však vystaveno působení hluku i nadále. Lze si vybrat, např. útlum o 12 dB, 22 dB, 32 dB. Špunty do uší se zavádějí do zvukovodu.

Mezi další ochranu sluchu patří ochranná sluchátka, která kryjí celé ucho. Jejich cena je vyšší, od stokorun po tisíce.

Nevýhoda těchto osobních ochranných pomůcek je nepohodlnost nošení, pocení uší, tlakové namáhání uší a z toho plynoucí bolest.

6.1.2 Dodatečné odhlučnění

Dodatečné odhlučnění je u zemědělských strojů, především kolových traktorů, značně znemožněno velikým koeficientem prosklení kabiny. Existují folie na sklo, které snižují hlučnost o 3 až 5 dB, jejich cena je přibližně 2000 Kč za 1 m².

Další možností by mohla být montáž lepšího těsnění do dveří a oken, je ale otázkou, zda konstrukční řešení dveří a oken toto umožní.

Dodatečně přidané odhlučnění na kapotáž motoru by především ovlivnilo hlučnost vyzařovanou do okolí, do jisté míry by zcela jistě došlo ke snížení hlučnosti uvnitř kabiny stroje. Tato montáž má však dvě úskalí, a to, že nesmí být narušena funkce motoru, např. zhoršení chlazení motoru, a zároveň zvuková izolace musí být nehořlavá, a druhé úskalí je, že dodatečné odhlučnění musí být kam přimontovat. Staré hlučné stroje mají zpravidla pouze vrchní kapotáž motoru. Ceny se pohybují kolem 2000 Kč za m².

6.1.3 Koupě nového stroje

Koupě nového méně hlučného stroje je také možnost, finanční náročnost je ale o několik řádů jinde.

6.1.4 Vyhodnocení

Vzhledem k tomu, že Zetor 8011 má odpracováno od roku 1973 pouze 16 350 mth, lze usuzovat o malém využití během pracovní doby, a proto doporučuji využít nejlevnějšího opatření, a to osobních ochranných pomůcek dle preferencí obsluhy.

7. Závěr

Nejhůře dopadl dle očekávání Zetor 8011. Bobcat S175 a Claas 420 Arion vykazují hodnoty znatelně lepší, nicméně v některých kategoriích propadly a je otázka, zda by výsledek nemohl být lepší vzhledem k tomu, že kolové traktory dělí ve výrobě bez jednoho roku 40 let. Pick-up Mitsubishi předvedl v některých kategoriích výrazný odstup, který by mohl posloužit jako cíl pro nově vyvíjené kolové traktory, nakladače, manipulátory apod. a snížit tak hlukové emise.

Nový stroj je nemalá investice a jeho nákup je potřeba dobře zvážit, pokud by byl přínos „pouze“ v nižší hlučnosti, nejspíše pro většinu zaměstnavatelů by to nebyl pádný argument snížit hlukovou zátěž zaměstnance při obsluhování onoho stroje. Kromě nižší hlučnosti jsou stroje úspornější, výkonnější, přesnější atd. Proto nákup nových strojů lze doporučit, v mém konkrétním případě Zetoru 8011 jsem se však přiklonil k variantě stroj nechat původní a užívat osobní ochranné pomůcky.

Můj názor je, že vzhledem k tomu, že prakticky celá pracovní doba obsluhy stroje je věnována jeho řízení, neměly by se komfortní prvky známé z dnešních osobních vozidel opomíjet, mezi něž řadím právě onu co nejnižší hlučnost.

8. Přílohy



Obrázek 13 Voltcraft SL-300



Obrázek 14 Voltcraft SL-400



Obrázek 15 Dálkoměr Bosch DLE 50 Professional

9. Použitá literatura

Tištěné

- 1) Bauer, František: Traktory, 1. vydání, Brno: Profi Press, 2006. 191 s.
- 2) Beran, Vlastimil: Chvění a hluk, Plzeň: ZČU v Plzni, 2010. 202 s. ISBN: 978-80-7043-916-6
- 3) Bosch GmbH: Systém vstříkovaní s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory, 1. vydání, Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2005. 95 s.
- 4) Bruel a Kjaer: Nebezpečný hluk, 1. vydání, Praha: NIVOS při VÚBP, 2005. 44 s. ISBN: 80-903604-8-3.
- 5) Bureš, Oldřich a kol.: Traktory a automobily, 1. vydání, Praha: SZN, 1980. 459 s.
- 6) Ferenc, Bohumil: Spalovací motory, 3. vydání, Brno: Computer Press, 2009. 388 s. ISBN: 978-80-251-2545-8.
- 7) Jaksch, Ivan: Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky, Liberec: TUL, 2010. 22 s.
- 8) Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 3 – motory, 5. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 179 s. ISBN 978-80-87143-06-3.
- 9) Jan, Zdeněk, Ždánský, Bronislav: Automobily 4 – příslušenství, 2. vydání, Brno: Avid spol. s r.o., 2008. 313 s. ISBN 978-80-87143-08-7.
- 10) Kameš, Josef: Alternativní pohon automobilů, 1. vydání, Praha: BEN – technická literatura, 2004. 231 s. ISBN 80-7300-127-6.
- 11) Kožoušek, Josef: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I, 1. vydání, Praha: SNTL, 1978. 367 s.
- 12) Macek, Jan, Suk, Bohuslav: Spalovací motory I, 1. vydání, Praha: ČVUT, 1994. 242 s. ISBN: 80-01-00919-X.
- 13) Martyr, A.J., Plint, M.A.: Engine testing, Theory and Practise, 3. vydání, UK, 2007. 423 s. ISBN-13: 978-0-7506-8439-2.
- 14) Mišun, Vojtěch: Vibrace a hluk, Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. 177 s. ISBN: 80-214-1262-3
- 15) Motejl, Vladimír, Horejš, Karel a kol: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, 3. vydání, Brno: Littera, 2004. 610 s. ISBN 80-85763-24-9.
- 16) Nový, Richard: Hluk a chvění, 1. vydání, Praha: ČVUT, 2009. 390 s. ISBN: 978-80-01-04347-9

- 17) Nový, Richard, Kučera, Miroslav: Snižování hluku a vibrací, Praha: Evropský sociální fond, 2009. 64 s.
- 18) Pokorný, Zdeněk: Bionafta ekologické alternativní palivo do vznětových motorů, 1. vydání, Praha: Institut výchovy a vzdělávání MZe ČR, 1998. 43 s. ISBN 80-7105-173-X.
- 19) Rasch, František: Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise, doktorská práce, Brno, 2011. 76 s.
- 20) Smetana, Ctirad: Hluk a vibrace, měření a hodnocení, 1. vydání, Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN: 80-901936-2-5
- 21) Smetana, Ctirad: Měření hluku a chvění, Praha: SNTL, 1974. 211 s.
- 22) Vlk, František: Vozidlové spalovací motory, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 580 s. ISBN 80-238-8756-4.

Internetové zdroje

- 1) Anonym: Frekvence [online]. 2015-01-30 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Frekvence>>
- 2) Anonym: Zvuk [online]. 15-03-2015 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk#Barva_zvuku>.
- 3) Bažata, Miroslav: Bionafta a směsná motorová nafta. Biom.cz [online]. 2013-05-06 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bionafta-a-smesna-motorova-nafta>>. ISSN: 1801-2655.
- 4) GAS s.r.o.: Co je zemní plyn [online]. 2007-2010 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.zemniplyn.cz/plyn/>>.
- 5) Reichl, Jaroslav, Všeticka, Martin: Barva tónu [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/195-barva-tonu>>.

Normy a zákony

- 1) ČSN 09 0022 - Spalovací motory. Názvosloví pístových spalovacích motorů. Druhy motorů

- 2) ČSN EN 590 (65 6506)
- 3) ČSN EN 14214+A1: Kapalné ropné výrobky - Methylestery mastných kyselin (FAME) pro vznětové motory a topné oleje - Technické požadavky a metody zkoušení
- 4) Sbírka zákonů č. 272/2011, Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací ze dne 24. srpna 2011

Návody k obsluze

- 1) Návod k obsluze hlukoměrů Voltcraft SL-300 a SL-400
- 2) Návod k obsluze kalibrátoru Voltcraft 326
- 3) Návod k obsluze meteorologické stanice WS-1600
- 4) Návod k obsluze dálkoměru Bosch DLE 50 Professional