



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

VYUŽITÍ VIBRODIAGNOSTIKY V SOUDNÍM INŽENÝRSTVÍ

USE OF VIBRODIAGNOSTICS IN FORENSIC ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. VERONIKA ZÁLESKÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR PANÁČEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství

Ústav soudního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Ing. Veronika Záleská

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Expertní inženýrství v dopravě (3917T002)**

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

Využití vibrodiagnostiky v soudním inženýrství

v anglickém jazyce:

Use of Vibrodiagnostics in Forensic Engineering

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat měřením vibrací vybraných konstrukčních částí (skupin, dílů) vozidel podle stanovených kritérií (druh, typ, technický stav, aj.) vozidla. Naměřené výsledky budou podrobeny analýze. Na základě analýzy naměřených hodnot v experimentální části práce bude dále v práci uvedeno využití analýzy vibrací v soudním inženýrství, zejména při hodnocení technického stavu vozidel. Experimentální měření může být provedeno přístrojovým vybavením ÚSI VUT v Brně.

Cíle diplomové práce:

1. Hluk a vibrace strojů, zařízení a vozidel.
2. Vliv hluku a vibrací na lidský organismus.
3. Vibrodiagnostika - význam, účel, možnosti.
4. Experimentální měření vibrací vybraných konstrukčních celků vozidla (např. volant).
5. Analýza naměřených hodnot, vyhodnocení výsledků experimentálních měření.
6. Využití vibrodiagnostiky při znalecké činnosti.

Seznam odborné literatury:

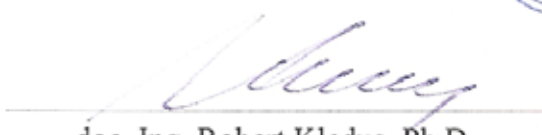
- [1] MIŠUN, Vojtěch. Vibrace a hluk. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [2] HELEBRANT, František. Technická diagnostika a spolehlivost. II., Vibrodiagnostika /. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] STODOLA, Jiří. Vibrace a jejich využití v technické diagnostice strojů. 1. Brno: VA Brno, 2003. ISBN 80-85960-64-8.
- [4] VLK, František. Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [5] PANÁČEK, V. Zkoušení vozidel. Brno: 2012. ISBN: 978-80-214-4558- 1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Panáček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 30.10.2013




doc. Ing. Robert Kledus, Ph.D.
ředitel vysokoškolského ústavu

Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením a vyhodnocováním vibrací na vybraných částech osobního automobilu. Část práce se věnuje teorii vibrací a hluku, která v sobě zahrnuje mimo jiné i projevy nejčastějších poruch strojních součástí z hlediska kmitání apod.

V rámci praktické části práce bylo provedeno spektrum měření, které je zde popsáno jak z hlediska jeho průběhu, tak z hlediska metodiky zpracování dat, jejich vyhodnocení a analýzy získaných výsledků. Poslední část práce se věnuje možnostem využití podobného měření při znalecké činnosti.

Abstract

This thesis deals with the measurement and evaluation of vibration on selected parts of car. Part of the work is devoted to the theory of vibration and noise, which includes, among others, presentations of common disorders of machine parts in terms of vibration.

In the practical part of the work were performed out measurements described here and the results analyzed. Last part is in short devoted to the possibilities of using a similar measurement in forensic engineering.

Klíčová slova

Vibrace, kmitání, vibrodiagnostika, měření vibrací.

Keywords

Vibration, oscillation, vibrodiagnostics, vibration measurements.

Bibliografická citace

ZÁLESKÁ, V. Využití vibrodiagnostiky v soudním inženýrství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2014. 105 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Panáček.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis diplomanta

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu práce, Ing. V. Panáčkovi, za cenné rady, připomínky a optimistický přístup k práci.

Dále bych chtěla poděkovat jednateři a vlastníkovi společnosti INSET s.r.o., Ing. L. Hegrlíkovi, za možnost zapůjčení a použití měřicí linky s měřícím a zpracovatelským programem OSCILO a dalších programech využitých při práci, které jsou produkty této firmy, a třech služebních vozidel, na nichž bylo měření realizováno. Také patří poděkování pracovníkům technického oddělení firmy INSET s.r.o. za poskytování konzultací k provedení měření a k práci s měřícím a zpracovatelským programem OSCILO.

V neposlední řadě patří poděkování rodině za podporu při práci a při studiu, zejména pak Ing. L. Záleskému, Ing. O. Machátovi a K. Záleské za asistenci a pomoc při měření a zpracovávání dat.

OBSAH

ÚVOD	12
1 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY VE VIBROAKUSTICE	13
1.1 Vlnění	13
1.2 Podmínka vzniku vlnění	13
1.3 Zdroj	14
1.4 Vibrace	14
1.5 Dělení kmitů dle vnějších znaků a interakce kmitavých soustav s okolím	14
1.6 Periodické harmonické vlastní netlumené kmity	15
1.7 Energie mechanické harmonické kmitavé soustavy	15
1.8 Periodické harmonické vlastní tlumené kmity	16
1.9 Nucené kmity	17
1.10 Skládání kmitů	17
1.11 Veličiny a jednotky, často používané pojmy	18
1.12 Zvuk a hluk	21
1.13 Rychlost šíření zvuku	21
1.14 Odraz a průchod zvuku, pohlcování zvuku, ohyb zvuku	22
1.15 Decibel (dB).....	23
1.16 Akustický tlak, výkon a intenzita	24
1.16.1 Akustický tlak	24
1.16.2 Akustický výkon	24
1.16.3 Akustická intenzita	25
1.17 Hladina akustického tlaku, výkonu a intenzity	25
1.17.1 Hladina akustického výkonu	25
1.17.2 Hladina akustické intenzity	26
1.17.3 Hladina akustického tlaku	26
1.17.4 Výsledná hladina od více zdrojů hluku	26
1.18 Spektra vibroakustických signálů	26
1.19 Váhové filtry	29
2 VIBRACE A HLUK STROJŮ, ZAŘÍZENÍ A VOZIDEL	30
2.1 Vibrace strojních zařízení	30
2.2 Původ vibrací	30
2.3 Základní poruchy a jejich projevy	30
2.3.1 Nevýváženost	30
2.3.2 Nesouosost (přesazení)	32
2.3.3 Další příklady poruch a jejich projevů ve frekvenčním spektu	35
2.4 Vibrace spalovacích motorů	37
2.5 Rezonance	37
2.6 Hluk v dopravě	37
2.6.1 Hluk z letecké dopravy	38
2.6.2 Hluk z železniční dopravy	38
2.6.3 Hluk ze silniční dopravy	38
3 VLIV HLUKU A VIBRACÍ NA LIDSKÝ ORGANISMUS	39

3.1	Hluk	39
3.2	Lidský sluch	39
3.2.1	Vnímání hluku člověkem	39
3.2.2	Oblast slyšitelnosti	39
3.2.3	Sluchový orgán	41
3.2.4	Zvukový projev lidského ucha	42
3.2.5	Neslyšící řidiči	42
3.3	Lidský hlas	42
3.4	Vliv hluku na lidský organismus	43
3.4.1	Měření hluku	43
3.4.2	Situace v ČR, sluchově postižení	43
3.5	Vliv vibrací na lidský organismus	44
3.5.1	Dělení vibrací dle způsobu přenosu na člověka	44
3.5.2	Nemoci způsobené vibracemi při práci s vibrujícími nástroji	44
3.3	Zákonné limity vibrací	45
3.3.1	Vibrace na pracovištích (část čtvrtá)	45
3.3.2	Vibrace v chráněných vnitřních prostorech staveb a na pracovištích (část pátá)	47
3.4	Ochrana před hlukem a vibracemi	47
3.4.1	Pasivní metody snižování hluku	47
3.4.2	Vibroizolace strojů a přístrojů	49
4	VIBRODIAGNOSTIKA	50
4.1	Vibrodiagnostika, akustická diagnostika	50
4.2	Diagnóza a diagnostický systém	50
4.3	Rozdělení signálů	51
4.4	Metody vibrační diagnostiky	52
4.4.1	Frekvenční analýza pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT)	52
4.4.2	Kepstrální analýza	53
4.4.3	Trendování vibrací (celková mohutnost kmitání)	53
4.4.4	Stanovení alarmových hodnot	55
4.4.5	Stanovení aktuálních otáček ze spektra vibrací	55
4.4.6	Identifikace technického stavu při využití časového záznamu	55
4.4.7	Metoda Kurtosis	55
4.4.8	Crest faktor	55
4.4.9	Další metody	56
4.5	Vibrace strojních zařízení	56
4.6	Základní veličiny používané ve vibrodiagnostice	56
4.7	Snímače vibrací	57
4.7.1	Rozdělení dle měřené veličiny	57
4.7.2	Akcelerometr a jeho důležité vlastnosti	57
4.7.3	Umísťování snímačů, provozní pokyny	58
4.7.4	Blokové schéma měřicího řetězce	58
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ VYBRANÝCH KONSTRUKČNÍCH CELKŮ VOZIDLA	59
5.1	1. skupina experimentů (měření 1)	59
5.1.1	Cíl měření	59

5.1.2	Měřicí zařízení (měřič vibrací)	59
5.1.3	Nastavení měřicího zařízení	60
5.1.4	Objekty měření (vozidla)	61
5.1.5	Umístění snímače	62
5.1.6	Podmínky měření	62
5.2	2. skupina experimentů (měření 2)	64
5.2.1	Cíl měření	64
5.2.2	Měřicí zařízení	64
5.2.3	Objekty měření (vozidla)	67
5.2.4	Umístění snímačů	67
5.2.5	Podmínky měření	72
6	ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ	73
6.1	1. skupina experimentů (měření 1)	73
6.1.1	Efektivní hodnoty zrychlení při rychlostech ve vybraných časových okamžicích	73
6.1.2	Efektivní hodnoty zrychlení v průběhu celého měřeného úseku	76
6.1.3	Závěr měření 1	78
6.2	2. skupina experimentů (měření 2)	78
6.2.1	Způsob zpracování dat	78
6.2.2	Složky zrychlení/efektivní hodnoty zrychlení kmitání	79
6.2.3	Vibrace motorů při volnoběhu	79
6.2.4	Vibrace vybraných částí vozidla při volnoběhu	81
6.2.5	Jednotlivá vozidla při jízdních režimech	83
6.2.6	Otáčky motoru ve vztahu k velikosti amplitudy okamžitého zrychlení kmitání	89
6.2.7	Nerovnosti na vozovce	90
6.2.8	Vyhodnocení výsledků měření dle hygienických norem	94
6.2.9	Závěr měření 2	95
7	VYUŽITÍ VIBRODIAGNOSTIKY PŘI ZNALECKÉ ČINNOSTI	97
7.1	Zjišťování technického stavu vozidla pomocí měření vibrací na volantu	97
7.1.1	Metodika měření	97
7.1.2	Názvosloví	97
7.1.3	Stav vozidla, mezní hodnoty	97
7.1.4	Měření vibrací na volantu	99
7.2	Měření vibrací za účelem posouzení vlivu na zdraví člověka	99
7.3	Vibrace způsobené povrchem vozovky	99
7.4	Další možnosti	99
	ZÁVĚR	100
	ZDROJE	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	103
	Seznam obrázků a grafů	103
	Seznam tabulek	104
	SEZNAM PŘÍLOH	105

ÚVOD

Vibrace člověka obklopují téměř všude v každodenním životě a je zřejmé, že na nás mají poměrně zásadní vliv. Vibrace jsou jedním z projevů chodu strojů a tedy i ukazatelem, zda je tento chod správný. Pomocí vibrací lze detekovat vadu, která by mohla výrazně ovlivnit životnost stroje, a díky včasnému zásahu předejít nežádoucím škodám ať z pohledu ekonomiky či zdraví.

V první kapitole se tato práce věnuje základním pojmům, se kterými vibroakustika pracuje - vznikem vibrací a hluku, jejich šířením do okolí a dalším. Dále je problematika blíže specifikována do oblasti vibrací a hluku vznikajících u strojů, jejich projevům a ochraně před nimi. Jelikož vibrace a hluk mají dopad na lidské zdraví, je této problematice věnována samostatná kapitola. Mimo jiné jsou zde zmíněny nemoci způsobené nadměrnou expozicí vibracemi a normy, které určují limitní hodnoty vibrací pro dané podmínky. Poslední kapitola teoretické části práce se zabývá metodami používanými při analýze naměřených vibrací, a také měřicími přístroji, způsobu jejich použití a základními jednotkami, ve kterých se vibrace měří.

Praktická část je pak zaměřena na vlastní měření vibrací osobního automobilu na třech místech (volant, řadicí páka a sedadlo) a při volnoběhu také na motoru. Stejně však bylo měření vibrací na volantu. Byla provedena měření dvěma odlišnými přístroji.

Pro první způsob měření byl použit školní přístroj měřící celkové (prostorové) vibrace, kdy bylo provedeno snímání vibrací volantu na třech vozidlech. Cílem měření bylo určit hodnoty vibrací, které charakterizují normální technický stav vozidla, a následně se pak pokusit stanovit hodnoty indikující vadu na vozidle.

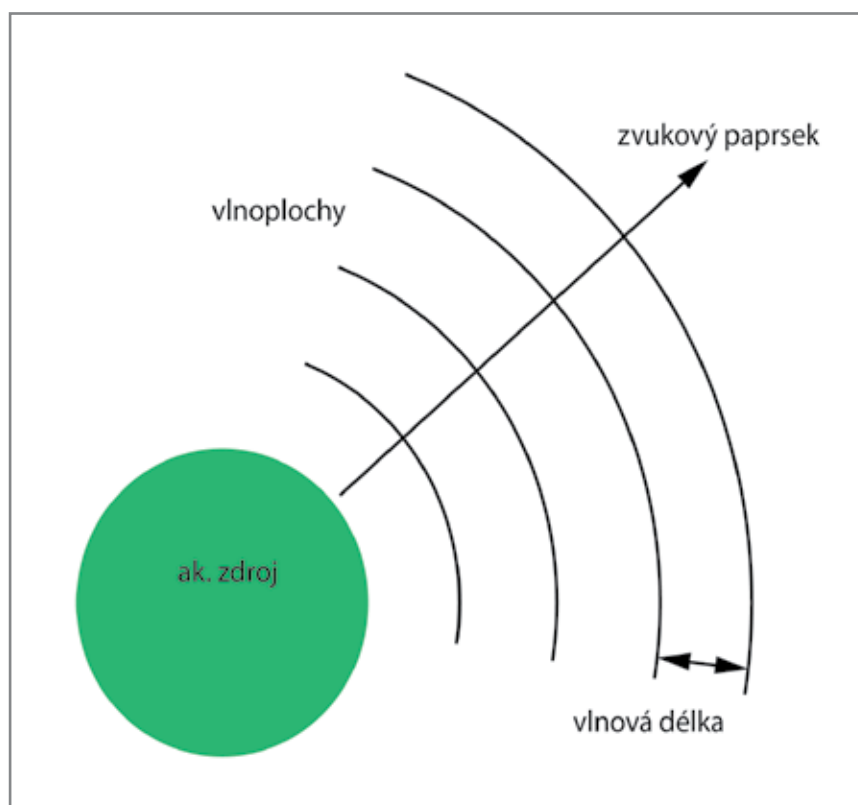
Druhý typ měření byl proveden zařízením firmy INSET s.r.o., které kromě prostorové hodnoty vibrací analyzovalo i jednotlivé složky vektoru zrychlení. Navíc byla měřena míra vibrací na třech místech současně (volant, řadicí páka a sedadlo řidiče). Byla provedena i analýza vibrací při volnoběhu motoru. Cílem tohoto měření je zjištění okolností, při kterých jsou vibrace největší, která ze složek je nejvýraznější, jak ovlivňují výši vibrací otáčky motoru, nerovnosti vozovky a další.

Poslední část práce v krátkosti pojednává o možnostech využití podobného měření při znalecké činnosti mimo jiné při hodnocení stavu vozidel.

1 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY VE VIBROAKUSTICE

1.1 VLNĚNÍ

„Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln.“ (Mišun, 2005, str. 10) (7)
Vlnění se dělí na podélné a příčné, jejich kombinací vzniká ohybové vlnění. Příčné vlny vznikají, když částice kmitají kolmo ke směru vlnění, podélné když kmitají částice ve směru vlnění. Částice pružného prostředí se nepohybují s šířící se vlnou, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. (7, s. 10)



Obr. 1: Vlnění v pružném prostředí (7, s. 10)

1.2 PODMÍNKA VZNIKU VLNĚNÍ

$$l \geq \lambda \cdot 0,5 = c_L \cdot 0,5 \cdot f^{-1} \text{ [m]} \quad (1)$$

kde jsou: l - největší rozměr materiálu
 λ - vlnová délka
 c_L - rychlost šíření podélných vln
 f - frekvence vlnění

Tedy: největší rozměr materiálu, ve kterém má vzniknout vlnění, musí být větší nebo roven poloviční délce vlny. Podélné vlny ve většině konstrukčních materiálů mají

poměrně vysoké hodnoty délky, proto podélné vlnění zde nevzniká, zato ohybové vlnění má podmínky pro vznik díky kratším vlnám příznivější. (7, s. 13 - 14)

1.3 ZDROJ

Zdroj zvuku je místo, kde vzniká akustická (nebo jiná) energie. Odtud se energie šíří do akustického prostředí.

Příčiny vzniku akustické energie jsou dvě: mechanický hluk (například mechanické kmity povrchu strojů) a aerodynamický hluk (nestacionární proudění plynného nebo kapalného prostředí - vzniká v místech, kde neustále proudí tekutina nebo se neustále mění tlak). Některé zdroje patří do obou kategorií, například spalovací motor: mechanický hluk vzniká od setrvačných sil, dosedání ventilů a podobně, aerodynamický hluk je tvořen kupříkladu sáním, výfukem, ve ventilátoru. (7, s. 5)

1.4 VIBRACE

Vibrace jsou velice častým jevem způsobeným jednak pracovními procesy strojů, jednak také přirozeným chodem organismů v přírodě (například srdeční tep). Vznikají v některých místech pružného zdroje v důsledku proměnného působení sil. Ze zdroje se vibrace posléze šíří do okolí. (7, s. 5) Používají se pro ně také pojmy kmitání, chvění.

1.5 DĚLENÍ KMITŮ DLE VNĚJŠÍCH ZNAKŮ A INTERAKCE KMITAVÝCH SOUSTAV S OKOLÍM

Periodické kmity:

„Veličina charakterizující kmitání je periodickou funkcí času a platí relace $f(t + T) = f(t)$.“ (Stodola, 2003, s. 4) Příklady: zdravé lidské srdce, kyvadlo hodin.

Harmonické kmity:

Jsou to periodické kmity, které lze vyjádřit pomocí funkcí sinus (cosinus), argument této funkce je lineární funkcí času. (1, s.4)

Vlastní (volné) kmity:

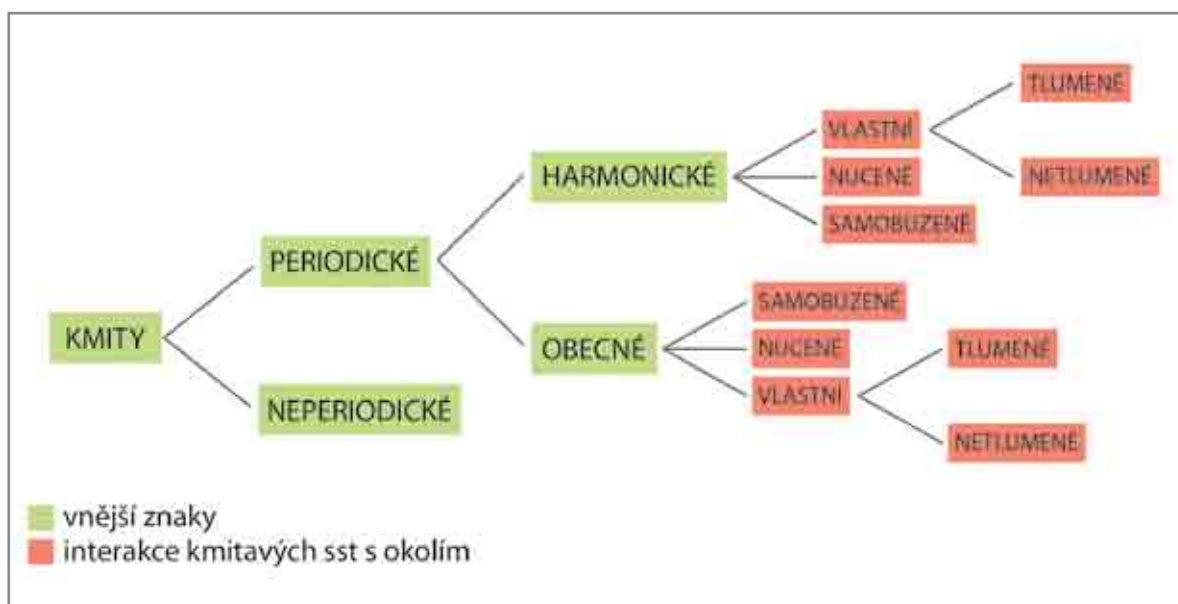
Mohou být tlumené nebo netlumené. Tyto „vznikají počátečním podnětem v izolovaných soustavách. Jejich charakter závisí pouze na vnitřních silách soustavy.“ (Stodola, 2003, str. 4) (1)

Nucené kmity:

Stejně jako u volných kmitů, i těmto počáteční energii dodává vnější podnět. Tento vnější podnět (podněty) je však trvalý a je nezávislý na vlastních kmitěch soustavy. (1, s.5)

Samobuzené kmity:

Disponují vlastním zdrojem energie a tuto energii odebírají v rytmu vlastních kmitů. (1, s. 5)



Obr. 2: Dělení kmitů (1, s. 5)

1.6 PERIODICKÉ HARMONICKÉ VLASTNÍ NETLUMENÉ KMITY

Nastávají v soustavách s rovnovážným stavem a u nichž při vychýlení vzniká síla nutící soustavu k návratu do rovnovážného stavu. Také v této soustavě musí být tyto faktory: její pružnost (tuhost pružiny - způsobuje návrat do rovnovážného stavu) a setrvačnost (hmotnost - způsobuje překmitávání rovnovážného stavu). (1, s. 6)

Platí vztahy:

$$F = -k \cdot s \quad a \quad F = m \cdot a = m \cdot d^2s \cdot (dt^2)^{-1} \quad (2)$$

Po spojení rovnic (2) a úpravě platí:

$$a + k \cdot s \cdot m^{-1} = 0 \quad (3)$$

kde je:

- F - vratná síla (přímo úměrná výchylce, má opačný směr)
- k - tuhost (pružnost) soustavy
- s - výchylka z rovnovážného stavu
- m - hmotnost

1.7 ENERGIE MECHANICKÉ HARMONICKÉ KMITAVÉ SOUSTAVY

Vztahy (2) a (3) lze upravit na následující tvar:

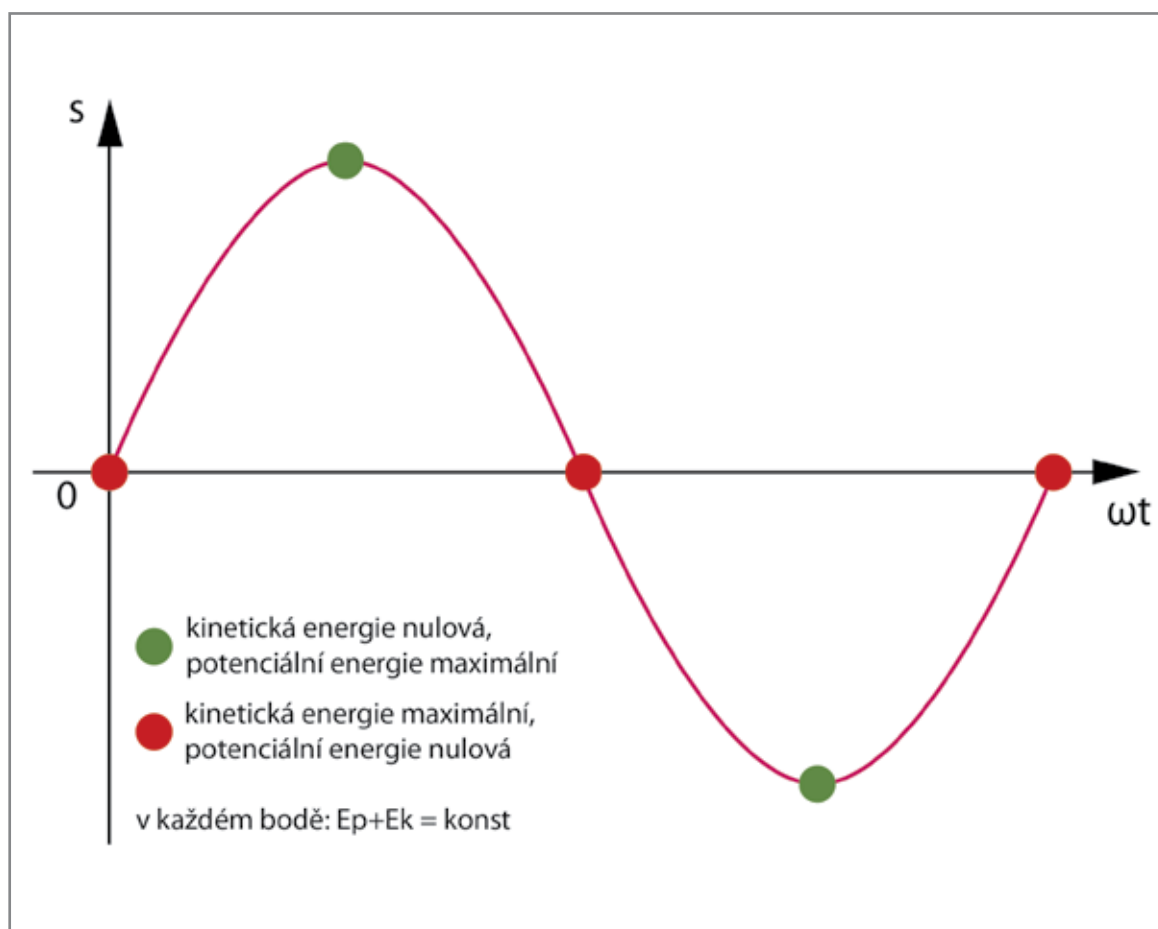
$$-k \cdot s = m \cdot d^2s \cdot (dt^2)^{-1} \quad (4)$$

Dalšími úpravami vznikne:

$$C = 0,5 \cdot k \cdot s^2 + 0,5 \cdot m \cdot (ds \cdot dt^{-1})^2 \quad (5)$$

kde je: C - integrační konstanta

Na pravé straně rovnice je výraz $0,5 \cdot m \cdot (ds \cdot dt^{-1})^2$, který vyjadřuje kinetickou (pohybovou) energii soustavy ($0,5 \cdot m \cdot v^2$), druhý výraz vyjadřuje potenciální (polohovou) energii soustavy. Levá strana je konstanta. Součet okamžitých energií kmitající soustavy je tedy v každé poloze stále konstantní. (1, s. 10 - 11)



Obr. 3: Energie kmitavé soustavy (1, s. 10 - 11)

1.8 PERIODICKÉ HARMONICKÉ VLASTNÍ TLUMENÉ KMITY

„Každá kmitavá soustava má tři základní vlastnosti a to: tuhost, setrvačnost a tlumení.“ (Stodola, 2003, str. 4) (1) Tlumení může být dvojí: žádoucí a nežádoucí. Díky tlumení harmonických vlastních kmitů amplituda těchto kmitů s časem klesá. Jakmile je však kmit tlumen, dá se říci, že už ani není harmonický. (1, s. 13)

1.9 NUCENÉ KMITY

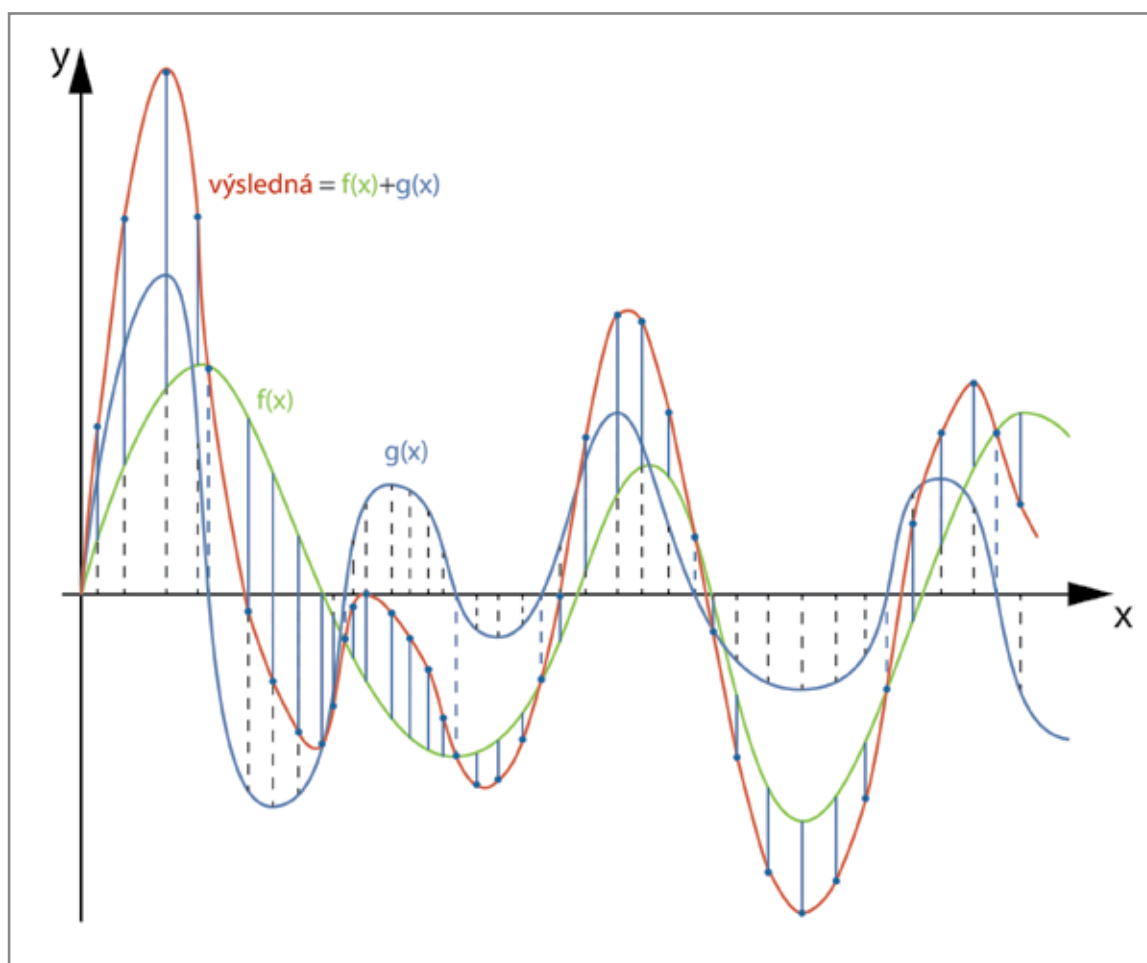
Na těleso s nucenými kmity působí tyto síly: síla pružnosti, odporová síla a budící síla (tato dodává tělesu energii, vyvolává jeho odezvu). (5)

Rezance:

Jakmile se frekvence budící síly přiblíží k hodnotě frekvence vlastní frekvence oscilátoru, podstatně se zvětší amplituda kmitů. A tímto dochází k rezonanci. Maximální výchylky kmitů se dosáhne tím, že frekvence budící síly má stejnou hodnotu jako frekvence vlastních kmitů oscilátoru. S rostoucím tlumením se zmenšuje rezonanční frekvence. Závislost amplitudy nucených kmitů na frekvenci budících kmitů ilustruje na grafu tzv. rezonanční křivka. Rezonance může být žádoucí (například hudební nástroje, houpačka, zesílení určitého akustického signálu na pozadí jiných) nebo nežádoucí (například stroje vs. budovy, skupina lidí vs. mostní konstrukce a podobně). (5)

1.10 SKLÁDÁNÍ KMITŮ

Harmonické kmity se stejnou frekvencí mají za výslednici opět harmonické kmitání se stejnou výslednou frekvencí. Harmonické kmity s rozdílnými frekvencemi se složí do kmitání neharmonického. (4)



Obr. 4: Skládání kmitů (4)

1.11 VELIČINY A JEDNOTKY, ČASTO POUŽÍVANÉ POJMY

Okamžitá výchylka s [m]

$$s = s_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

kde je: $(\omega t + \varphi_0)$ - fázový úhel (fáze) [rad]
 φ_0 - počáteční fáze (v čase $t = 0$) [rad]
 s_0 - amplituda (maximální výchylka z rovnovážného stavu) [m]

Perioda T [s]

(doba, po kterou trvá 1 kmit):

$$T = 2\pi \cdot \omega^{-1} \quad (7)$$

Úhlová frekvence ω [s⁻¹]

(změna fáze za jednotku času)

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot T^{-1} \quad (8)$$

Frekvence kmitání (kmitočet) f [s⁻¹]

(počet cyklů za 1s)

$$f = 1 \cdot T^{-1} = \omega \cdot (2\pi)^{-1} \quad (9)$$

Rychlost kmitů v [m·s⁻²]

$$v = ds \cdot (dt)^{-1} = \omega \cdot s_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi + 0,5\pi) \quad (10)$$

Zrychlení kmitů a [m·s⁻¹]

$$a = dv \cdot (dt)^{-1} = d^2s \cdot (dt^2)^{-1} = -\omega^2 \cdot s_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = a_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi) \quad (11)$$

Úhlová rychlost [rad·s⁻¹]

Bývá zaměňována za úhlovou frekvenci, ale úhl. rychlost souvisí přímo s úhlem natočení a je to vektor. Používá se k popisu pohybu hmotného bodu po kružnici. Naproti tomu úhl. frekvence je skalár a sice souvisí s periodickým dějem, ale nemusí souviset s úhlem, je používána namísto úhl. rychlosti při popisu kmitání hmotného bodu. U periodického pohybu po kružnici je možné zmínit obě veličiny, a pokud je tento pohyb rovnoměrný, číselně se rovnají. (2, 10)

Efektivní hodnota výchylky (rychlosti, zrychlení) [m] ([m·s⁻¹], [m·s⁻²])

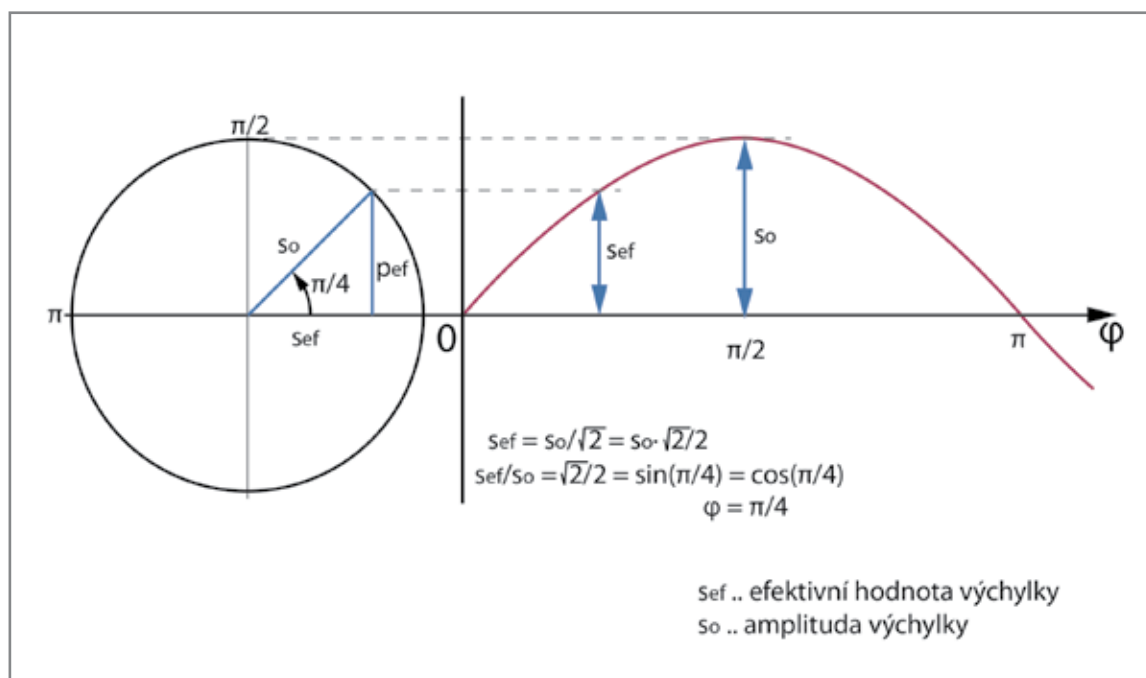
$$x_{ef} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (12)$$

Pro harmonický pohyb platí:

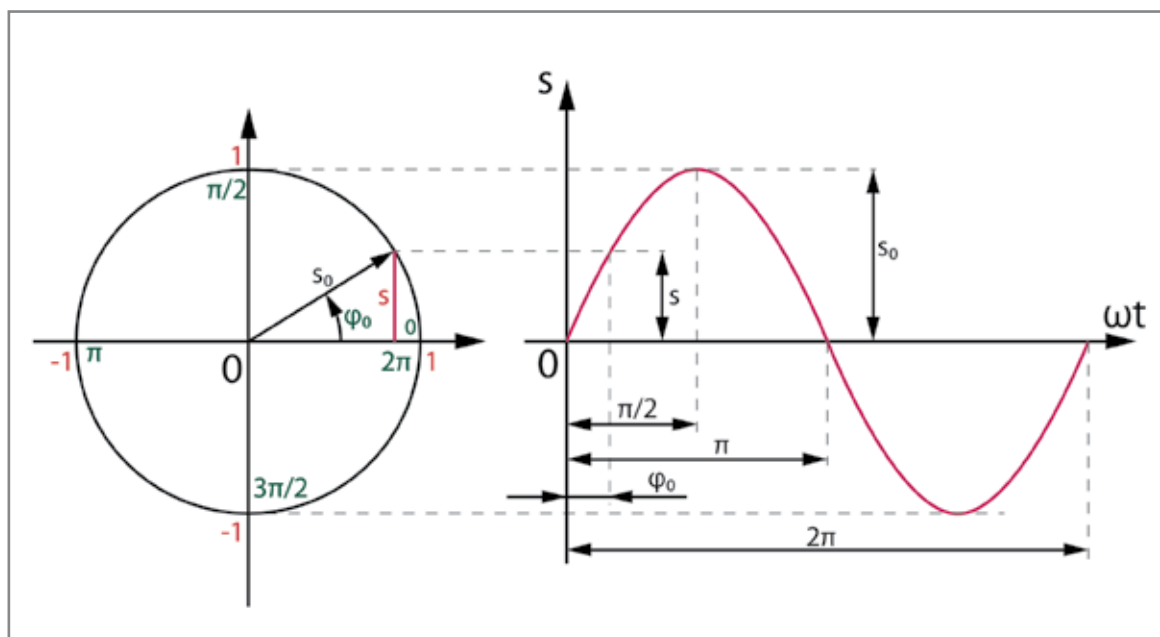
$$x_{ef} = s_0 \cdot 2^{-0,5} \quad (13)$$

Střední hodnota výchylky (rychlosti, zrychlení) [m] ([m·s⁻¹], [m·s⁻²])

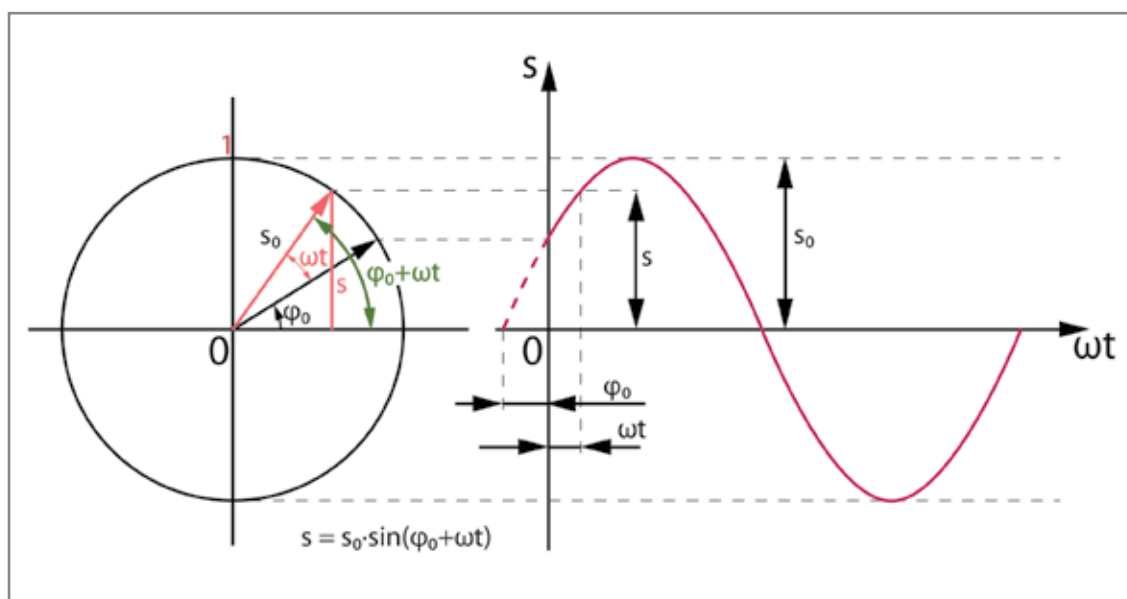
$$x_{stř} = T^{-1} \int_0^T |x| dt \quad (14)$$



Obr. 5: Odvození efektivní hodnoty výchylky

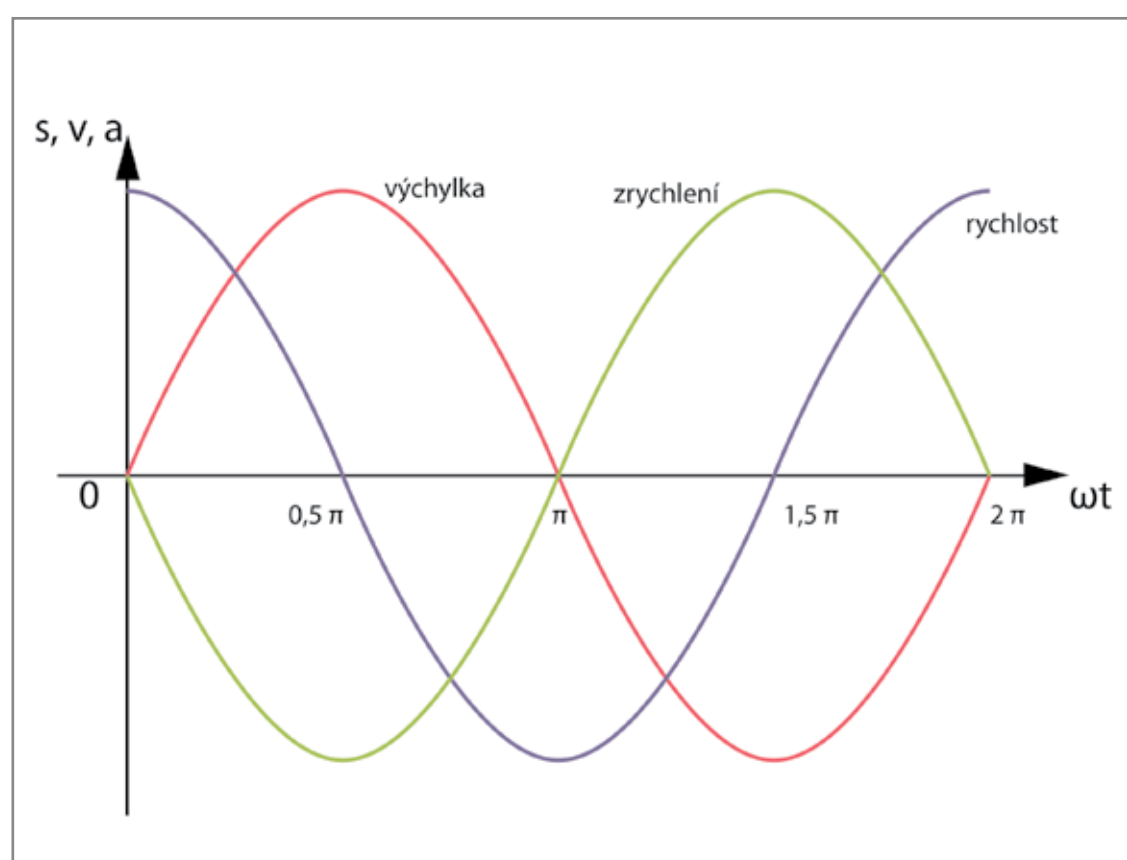


Obr. 6: Harmonické kmitání (1, s. 9)



Obr. 7: Počáteční fáze (1, s. 10)

Ze vztahů pro okamžitou výchylku, rychlost a zrychlení kmitů vyplývá, že rychlost předbíhá výchylku o $0,5\pi$ a zrychlení předbíhá rychlost o $0,5\pi$ (výchylku tedy o π). (1, s. 8)



Obr. 8: Výchylka, rychlost a zrychlení (3, s. 11)

Často používané pojmy

špička (peak) - vzdálenost mezi vrcholem amplitudy (so) a nulovou úrovní signálu (3, s. 9)

špička - špička (peak - to - peak nebo peak - peak) - vzd. mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny (2·so) (3, s. 9)

průměrná hodnota (average) - u nesinusového průběhu je tato hodnota nenulová ($0,637s_0$), také může být střední absolutní hodnota (3, s. 9)

celkové vibrace (overall) - hodnota udávající množství energie obsažené v pásmu mezi dvěma frekvencemi (3, s. 9)

1.12 ZVUK A HLUK

„Zvukem nazýváme mechanické vlnění pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu slyšitelnosti lidského ucha, tj. ve frekvenčním pásmu (16 až 20000) Hz.“
(Mišun, 2005, str. 10) (7).

Jiný zdroj však uvádí, že lidské ucho zvuk slyšet nemusí - v oblasti neslyšitelnosti se pak zvuku říká infrazvuk a ultrazvuk. Slyšitelný je zvuk přibližně v již zmíněném frekvenčním pásmu, ale každý člověk má hranici někde jinde. Zejména horní hranice se v závislosti na věku mění (snižuje). (6)

Zvuk vzniká pohybem částic sledovaného pružného zdroje, rychlost šíření vlnění od zdroje se nazývá rychlostí zvuku. Hlukem pak nazýváme zvuk, který je nežádoucí, obtěžuje a ruší. (7, s. 10) Důležité však je vědět, že i když zvuk obtěžuje, neznamená to, že je nežádoucí nebo z hlediska zákonných limitů zakázaný.

V příklad lze uvést zvukový signál pro nevidoucí na některých přechodech pro chodce - někoho může obtěžovat, ale je to zvuk velice žádoucí. Nežádoucí a obtěžující mohou být také kupříkladu stavební práce, ale jsou nutné, a mimo jiné i na tyto se pak vztahují určité limity.

1.13 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU

Rychlost šíření zvuku vyjadřuje vzdálenost, kam dospěje zvuk od zdroje za 1 s. Značí se c [$m \cdot s^{-1}$].

Platí vztah:

$$c = \lambda \cdot f \quad (15)$$

kde je: λ - vlnová délka,
 f - frekvence.

Rychlost šíření závisí na prostředí. Nejrychleji se zvuk šíří v pevných látkách, nejpomaleji v plynech. (2)

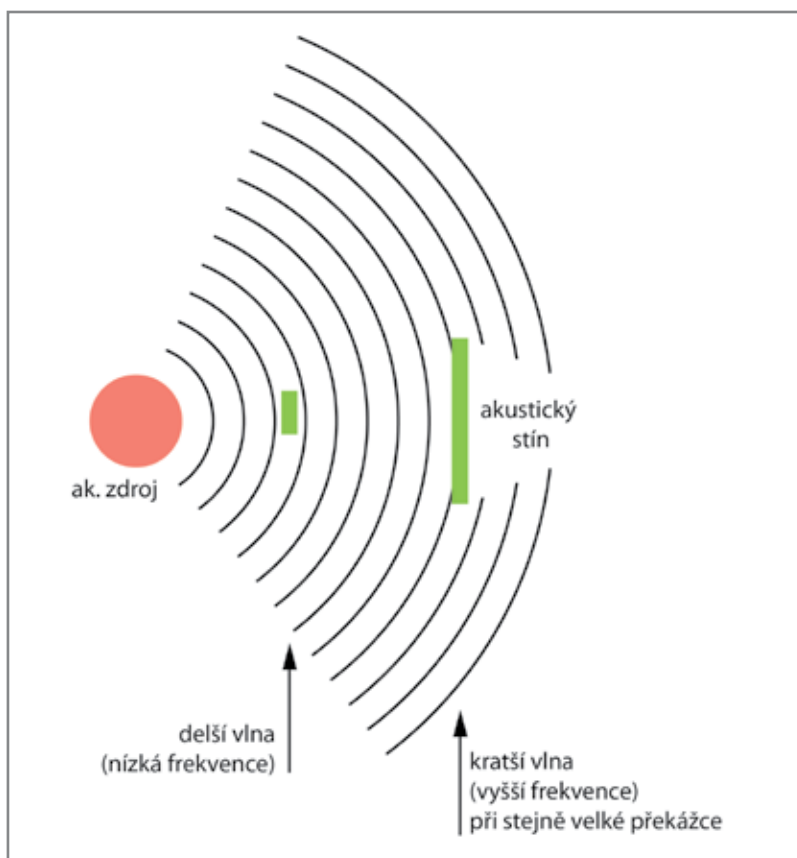
Akustické vlny se mohou šířit příčně, podélně a ohybově. V kapalinách a plynech je šíření vln pouze podélné, v pevných látkách je podélné, příčné i ohybové. Velikost rychlosti pak závisí mimo jiné i na modulu pružnosti materiálu, hustotě prostředí, tlaku, teplotě,.. (7, s. 11 - 13)

1.14 ODRAZ A PRŮCHOD ZVUKU, POHLCOVÁNÍ ZVUKU, OHYB ZVUKU

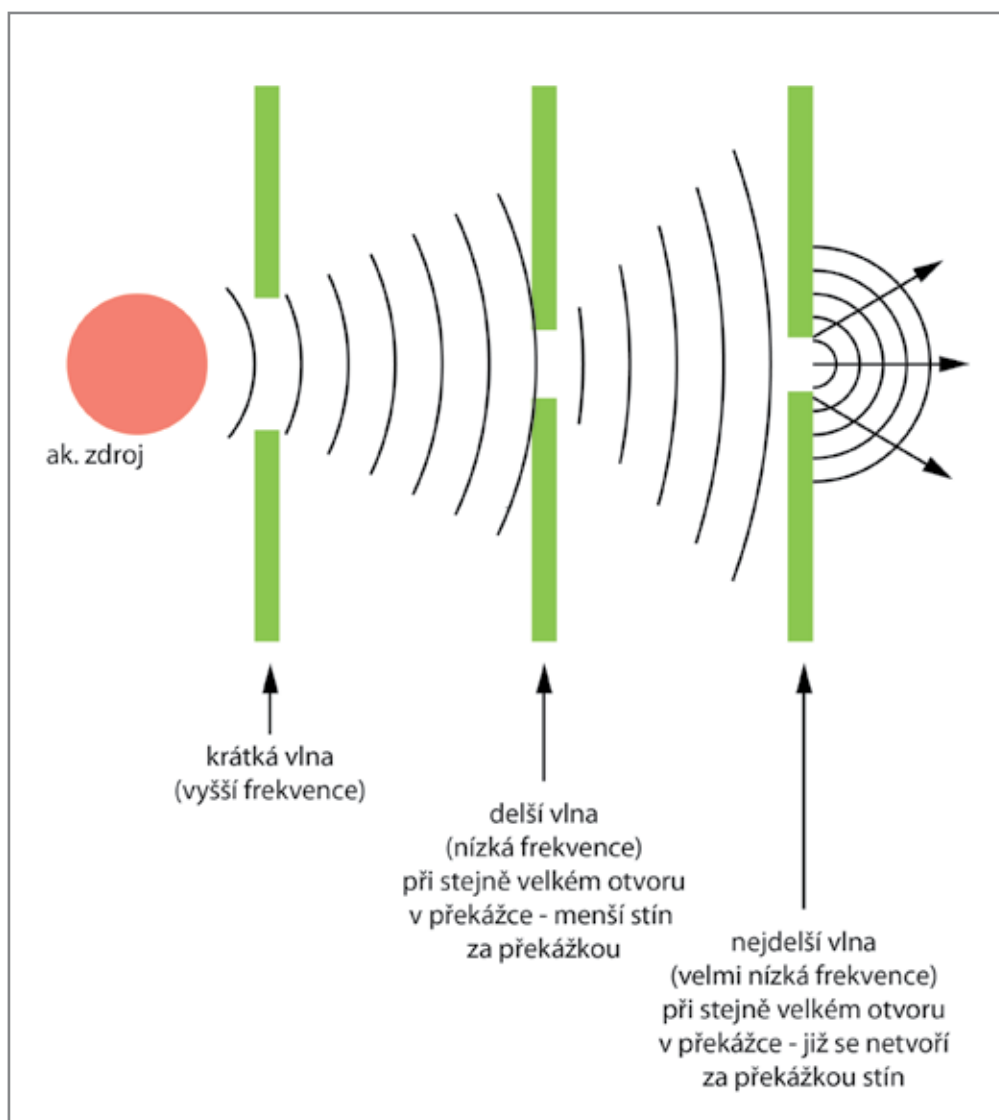
To, jak se zvuk odrazí a jaká část bude pohlcena, závisí na vlastnostech povrchu, na který zvuk dopadá. Povrch akusticky tvrdý odrazí akustickou vlnu podobně jako je odražen paprsek světla od zrcadla, avšak u jiného povrchu dochází k částečnému projití. Podíl odražené a pohlcené části vlnění závisí na úhlu dopadu vlny na plochu, rychlosti zvuku, hustotě obou materiálů, kterými vlna prochází. Součinitel odrazu je podíl akustických tlaků odražené a dopadající akustické vlny. (7, s. 18 - 19)

Při dopadu na určitý povrch (například pevného materiálu), se část energie vlnění může přeměnit na jinou energii (například tepelnou). Akustická absorbce (součinitel pohltivosti) je veličina udávaná jako podíl absorbované a dopadající energie. (7, s. 19)

Ohyb zvuku může nastat při nárazu akustické vlny na překážku určité délky. Každou vlnu lze chápat tak, že je složena z nekonečna bodů, které jsou bodovými zdroji vyzařujícími zvuk do všech směrů, proto je zvuk schopen se při nárazu na překážku ohnout. Toto nastává i při průchodu otvorem. Zvuk o vysoké frekvenci za překážkou vytvoří větší stín než zvuk s frekvencí nízkou (délka vlny u vyšších frekvencí je kratší než u nižších frekvencí). Pokud otvorem prochází zvuk s velmi nízkou frekvencí, projevuje se to tak, že akustický stín za překážkou mizí, takže další vlnění působí jako z nového akustického zdroje. Díky tomuto jevu se nízkofrekvenční zvuk snadno přenáší například malými otvory ve skříních strojů. (7, s. 20)



Obr. 9: Ohyb vlny (7, s. 20)



Obr. 10: Průchod vlny otvorem (7, s. 20)

1.15 DECIBEL (DB)

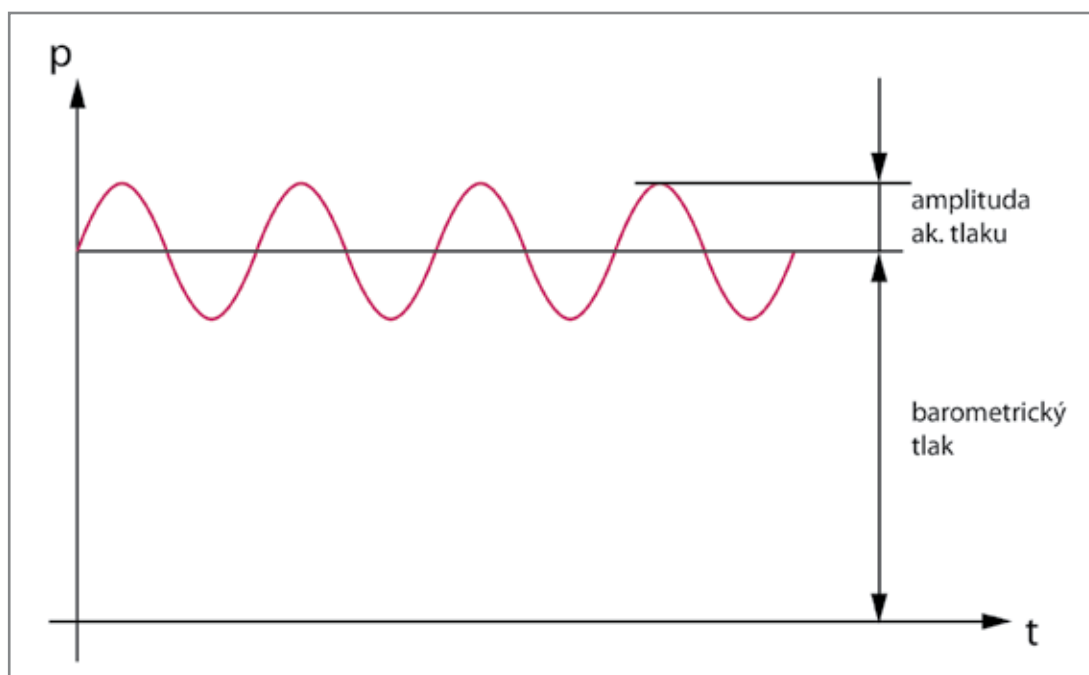
Tato bezrozměrná logaritmická jednotka se využívá pro vyjádření hodnoty naměřené hladiny intenzity zvuku. Běžně se nepracuje s belem (B), ale s decibelem (dB). Její vysoká hodnota může způsobit zdravotní problémy, proto je její maximální hodnota předepsána hygienickými limity. (2) Limity stanoví Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Zde záleží na typu zdroje, denní době, prostorách, délce expozice a dalších.

1.16 AKUSTICKÝ TLAK, VÝKON A INTENZITA

1.16.1 Akustický tlak

Značí se p [Pa]. Celkový tlak se v akustickém prostředí mění, a to díky zhušťování (nebo ředění) kmitajících částic. Tento tlak nabývá hodnot okolo hodnoty původního tlaku prostředí (ve vzduchu je to barometrický tlak ovzduší - přibližně $101,3 \cdot 10^3$ Pa). Hodnota akustického tlaku je odchylka celkového od původního tlaku. (7, s. 14 - 15)

Člověk tuto změnu vnímá, a to již od hodnoty $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (práh slyšení). Jeho hodnotu ovlivňuje změna tlaku vzduchu způsobená zvukovými vlnami. (2, 10)



Obr. 11: Průběh akustického tlaku (7, s. 14)

Efektivní hodnota akustického tlaku:

$$p_{\text{ef}} = p_0 \cdot 2^{-0,5} \quad (16)$$

U akustického tlaku se často uvádí právě jeho efektivní hodnota.

1.16.2 Akustický výkon

Značí se P [W]. Vyjadřuje množství energie, která za časovou jednotku projde prostorovou plochou. (7, s. 15)

Je dán vztahem:

$$W = p \cdot v \cdot S \quad (17)$$

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

Vztah platí pro rovinnou akustickou vlnu, akustický tlak a akustická rychlost jsou ve fázi. Jelikož akustický tlak je ovlivněn řadou faktorů prostředí (teplota, vzdálenost od zdroje a podobně), je lepším parametrem pro porovnávání, definování a hodnocení akustických zdrojů právě akustický výkon. (7, s. 15)

1.16.3 Akustická intenzita

Značí se I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Vyjadřuje množství a směr toku akustické energie v určitém akustickém prostředí, je to vektorová veličina (tedy má velikost a směr) - na rozdíl od akustického tlaku. (7, s. 15 - 16)

Je dána vztahem:

$$I = p(t) \cdot v(t) \quad (18)$$

kde je: $p(t)$ - časově průměrovaný součin okamžitého ak. tlaku,
 $v(t)$ - okamžitá rychlost kmitajících částic v tom samém místě.

Akustická intenzita, která má směr kolmo na směr vlnění, je rovna nule. Akustická intenzita klesá se vzdáleností od akustického zdroje. (7, s. 15 - 16)

1.17 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU, VÝKONU A INTENZITY

Člověk je schopen registrovat akustický tlak v hodnotách od $20 \cdot 10^{-5}$ Pa. Bolest začíná pociťovat okolo hodnoty 100 Pa. Rozmezí těchto hodnot je poměrně široké a navíc lidské ucho nemá na postupně rostoucí hodnotu akustického tlaku linéárně rostoucí reakci, ale toto vnímání je úměrné logaritmu akustického tlaku. Proto se zavedly tzv. hladiny, které jsou v logaritmických měřítkách (dekadický logaritmus). Podobné zákonitosti hladin platí i pro vibrace. (7, s. 27)

Vyjádření hladiny ak. veličin:

$$L = \log(A \cdot A_0^{-1}) \quad (19)$$

kde je: A - hodnota porovnávané veličiny,
 A_0 - hodnota referenční (nutno vždy uvést)

1.17.1 Hladina akustického výkonu

Značí se L_W [dB]. Číslo 10 v následujícím vztahu slouží k převedení [B] na [dB]. (7, s. 28)

Vztah:

$$L_W = 10 \cdot \log(W \cdot W_0^{-1}) \quad (20)$$

kde je: W - hodnocený ak. výkon,
 W_0 - referenční hodnota ak. výkonu.

Při $W_o = 10^{-12} \text{ W}$ je $L_w = 10 \cdot \log W + 120$.

1.17.2 Hladina akustické intenzity

Značí se L_I [dB]. Číslo 10 v následujícím vztahu slouží k převedení [B] na [dB]. (7, s. 29)

Vztah:

$$L_I = 10 \cdot \log(I \cdot I_o^{-1}) \quad (21)$$

kde je: I - hodnocená ak. intenzita,
 I_o - referenční hodnota ak. intenzity.

Při $I_o = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je $L_I = 10 \cdot \log I + 120$.

1.17.3 Hladina akustického tlaku

Značí se L_p [dB]. Číslo 10 v následujícím vztahu slouží k převedení [B] na [dB]. (7, s. 30)

Vztah:

$$L_p = 10 \cdot \log(p \cdot p_o^{-1}) \quad (22)$$

kde je: p - hodnocený ak. výkon,
 p_o - referenční hodnota ak. tlaku.

Při $p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ je $L_p = 20 \cdot \log p + 94$.

1.17.4 Výsledná hladina od více zdrojů hluku

Hodnoty celkových hladin jednotlivých veličin se získají součtem dílčích hladin, ze kterých se celková hladina skládá. Odvozením (obráceným postupem) pak lze získat neznámou hladinu dílčí (od celkové se odečtou známé dílčí hladiny dané veličiny). (7, s. 34)

1.18 SPEKTRA VIBROAKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ

Tato spektra udávají „rozložení amplitud jednotlivých frekvenčních složek v signálu (vibračním, akustickém).“ (Mišun, 2005, s. 22) (7) Časovému signálu (originálu) odpovídá ve frekvenční oblasti jeho spektrum (obraz). (7, s. 23)

Fourierova transformace:

Přímá a inverzní fourierova transformace vyjadřuje vztah mezi originálem (časovým signálem) $s(t)$ a jeho obrazem $S(f)$. (7, s. 23)

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (23)$$

$$S_p(f) = \bar{S}(f) \frac{\Delta f}{\Delta f_o} \quad (24)$$

„Spojité spektrum lze rovněž považovat za pásmové spektrum s frekvenčním krokem $\Delta f_o = 1$ Hz na frekvenční ose.“ (Mišun, 2005, s. 23) (7) Následující vztah vyjadřuje amplitudu pásma, pokud je část spojitého spektra nahrazena pásmem šířky Δf . (7, s. 23)

$$s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f t} dt \quad (25)$$

kde: $S(f)$ je střední hodnota amplitud spojitého spektra uvnitř pásma Δf

Základní typy spekter:

čárová (diskrétní): uplatnění - pokud časový signál „obsahuje pouze několik frekvenčních složek (periodické signály, ..)“ (7, s. 25)

spojitá: uplatnění - hluk a vibrace strojních zařízení (identifikace nejvýraznějších složek v signálu) (7, s. 25)

pásmová: uplatnění - analýza vibroakustických signál (7, s. 25)

oktávová pásma - významná skupina pásmových spekter (7, s. 25)

vícenásobná (multispektra)

trackingová: uplatnění - „při analýze vlivu některých zdrojů strojního zařízení během celého otáčkového provozního režimu stroje“ (Mišun, 2005, s. 25) (7, s. 25)

Campbellovy diagramy: uplatnění - „identifikace vlastních frekvencí sledovaného strojního zařízení“ (Mišun, 2005, s. 25) (7)

Oktávová pásma

Jsou významnou částí pásmových spekter. Z nich se dále odvozují další pásmová spektra (třetinooktávová, ..). (7, s. 26)

Frekvenční pásmo o šířce jedné oktávy:

$$f_2 \cdot f_1^{-1} = 2 \quad (26)$$

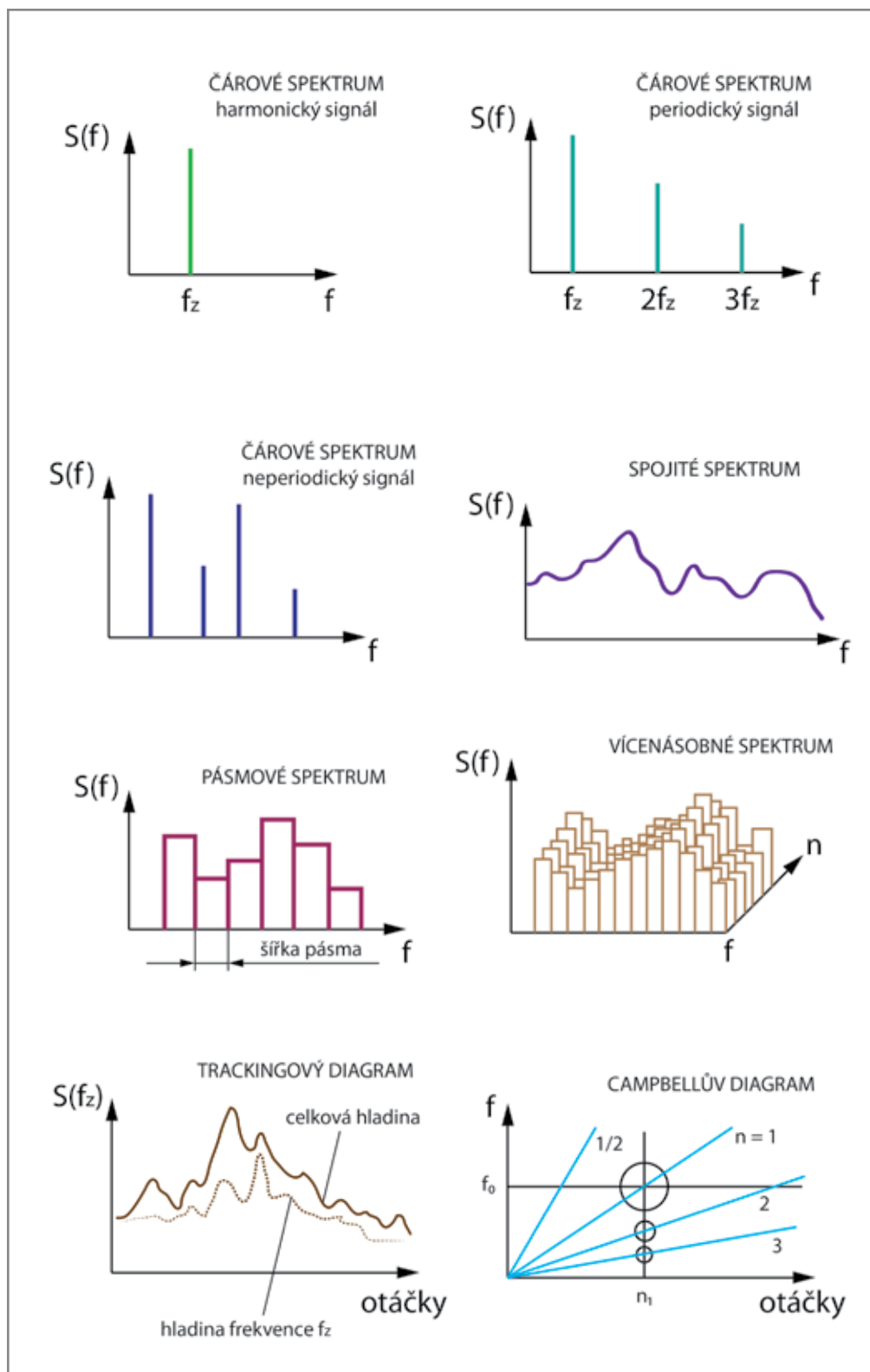
Střední frekvence oktávy:

$$f_{stř} = (f_1 \cdot f_2)^{0,5} \quad (27)$$

Třetina oktávy:

$$(f_2 \cdot f_1^{-1})^3 = 2$$

(28)



Obr. 12: Základní typy spekter (7, s. 24)

1.19 Váhové filtry

Každý člověk disponuje jinou citlivostí na zvuk a vibrace. Bylo však potřeba zavést jednoznačnou číselnou charakteristiku pro určení vibroakustických veličin na různých místech (pracoviště, domácnost a podobně). Proto se do měřících přístrojů zařadily tzv. váhové filtry, které přibližují naměřené veličiny vlastnostem lidského ucha. (7, s. 36) Tyto váhové filtry se zavádí ve vztahu ke zdroji vibrací (zvuku). U hlukoměrů je třeba vybrat a zadat váhový filtr ještě před samotným měřením, zatímco u přístrojů měřících vibrace se zavádí až při zpracování dat.

2 VIBRACE A HLUK STROJŮ, ZAŘÍZENÍ A VOZIDEL

2.1 VIBRACE STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Vibrace daného strojního zařízení souvisí s jeho pracovním procesem, pracovními podmínkami, ale také s jeho technickým stavem. Pokud jsou vibrace příliš velké, ovlivňují nepříznivým způsobem životnost stroje. (1, s.16)

2.2 PŮVOD VIBRACÍ

Jejich původ je mimo jiné v některých provozních parametrech a poruchách (nevyváženost, nesourodost, malá tuhost konstrukce, praskliny konstrukce, uvolnění, rezonance konstrukce a další). (3, s. 24 - 29)

2.3 ZÁKLADNÍ PORUCHY A JEJICH PROJEVY

2.3.1 Nevýváženost

Vzniká při výrobě nebo až při plnění funkce (nerovnoměrné opotřebení a podobně) a je způsobena nesouměrným rozmístěním hmoty mimo osu rotace. Způsobuje vznik mechanického kmitání, což vede k namáhání celého stroje. Dynamické namáhání, které je nevyvážeností způsobeno, krátí životnost takto namáhaného zařízení. Hodnota rychlosti vibrací roste spolu s otáčkami, a to kvadraticky. (3, s. 24)

Statická nevyváženost

Většinou se vyskytuje u rotujících kotoučů (průměr kotouče výrazně větší než šířka kotouče), celkově je to ale výjimečný jev. Osa rotace je u staticky nevyváženého kotouče posunuta mimo geometrickou osu kotouče - osy jsou spolu rovnoběžné. Projevem je „výrazná amplituda na otáčkové frekvenci v radiálním směru na obou ložiskách s nulovým nebo malým fázovým posunem ($\pm 30^\circ$). Tato amplituda bývá ve většině případů dominantní a je přítomná na základní rotorové frekvenci. Fázový posun mezi horizontálním a vertikálním směrem je přibližně $90^\circ (\pm 30^\circ)$. Přítomnost harmonických násobků otáčkové frekvence ukazuje na vysokou nevyváženost nebo na vymezování vůlí v ložiskách.“ (Blata, Juraszek, 2013, s. 24 - 25) (3)

Momentová nevyváženost

V tomto případě osa rotace a centrální osa setrvačnosti jsou vzájemně rovnoběžné a protínají se v těžišti rotoru. Díky tomuto na rotor působí při otáčení dvojice sil a ty způsobují vznik vibrací, což vede k momentovému namáhání. Nevývaha se projevuje jen při pohybu. „Momentová nevyváženost se projevuje výraznou amplitudou v radiálním směru na obou ložiskách s nulovým nebo malým fázovým posunem ($\pm 30^\circ$). Tato amplituda bývá ve většině případů dominantní a je přítomná na základní rotorové frekvenci. Fázový rozdíl mezi horizontálním a vertikálním směrem je přibližně $90^\circ (\pm 30^\circ)$. Přítomnost harmonických násobků otáčkové frekvence ukazuje na vysokou nevyváženost nebo na vymezování vůlí v ložiskách.“ (Blata, Juraszek, 2013, s. 26) (3)

Dynamická nevyváženost

Dynamická nevyváženost v sobě kombinuje nevyváženost statickou a momentovou a v praxi je nejčastějším případem nevyváženosti. Osy setrvačnosti a rotace

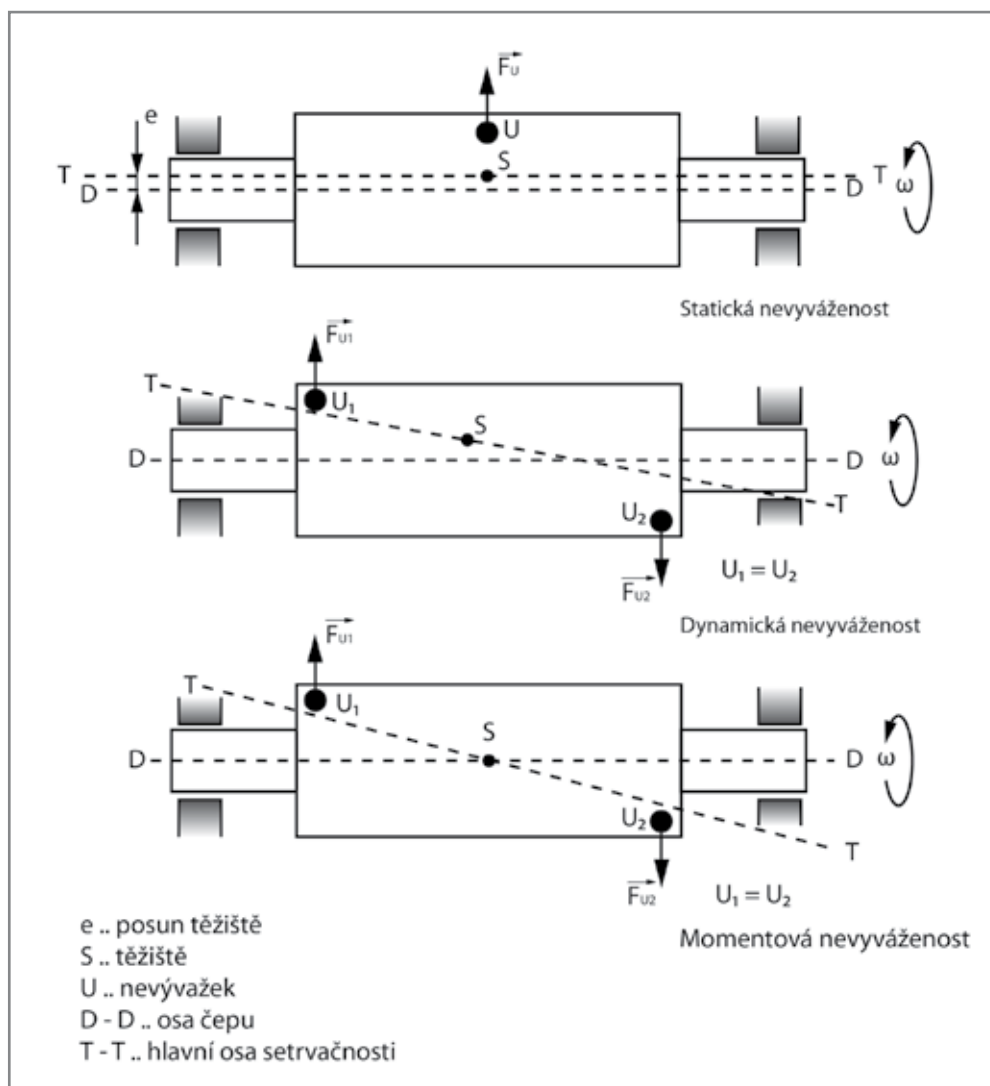
jsou různoběžné a protínají se mimo těžiště rotoru. Projevuje se „výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na obou ložiskách, při velké nevyváženosti se může vytvořit amplituda na druhém násobku otáčkové frekvence. Pro odstranění nevyváženosti je třeba vyvažovat ve dvou rovinách. Fázový rozdíl mezi vibracemi v horizontálním směru na vnitřním a vnějším ložisku se může pohybovat od 0° do 180° . Fázový rozdíl ve vertikálním směru musí být shodný s fázovým rozdílem v horizontálním směru.“ (Blata, Juraszek, 2013, s. 26) (3)

Kvazistatická nevyváženost

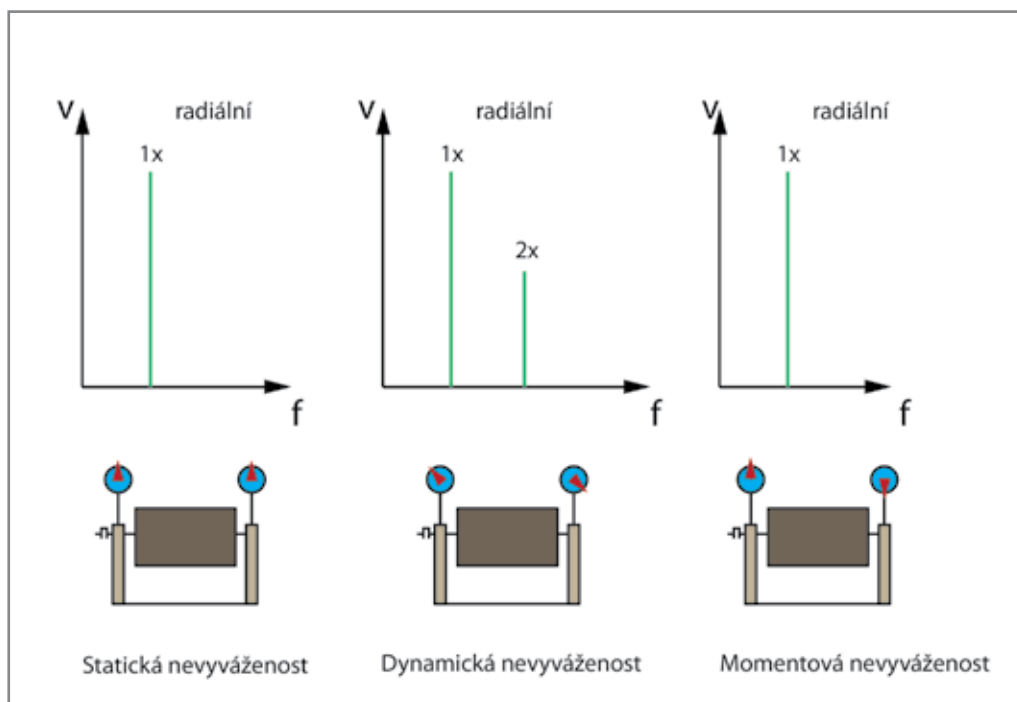
Kvazistatická nevyváženost nastává v případech, kdy „nevyvážené hmoty jsou rozloženy mimo těžiště a hlavní osa setrvačnosti protíná osu rotace mimo těžiště.“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 50) (8)

Vvažování

Spočívá v „přiblížení osy těžiště co nejpřesněji k ose rotace, zlepšení rozložení hmoty rotujícího tělesa natolik, aby se toto těleso otáčelo ve svém uložení bez půso-



Obr. 13: Druhy nevyváhy (8, s. 51)



Obr. 14: Projev nevyváhy ve frekvenčním spektru (8, s. 55)

bení volných odstředivých sil, a aby jeho ložiska nebyla namáhána periodickými silami s frekvencí otáček.“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 50) (8) Vyvažování zahrnuje zejména tyto činnosti: změření nevyvážku (jeho poloha) a kompenzace nevyvážku (hmotnost). (8, s. 50)

2.3.2 Nesouosost (přesazení)

Díky špatnému ustavení nebo špatné spoje strojního zařízení je stroj tepelně a silově namáhán (zejména spojka, hřídele, ložiska, převodovky) a zvyšují se jeho vibrace. To vede k poškození stroje. (3, s. 27)

Rovnoběžná (paralelní) nesouosost

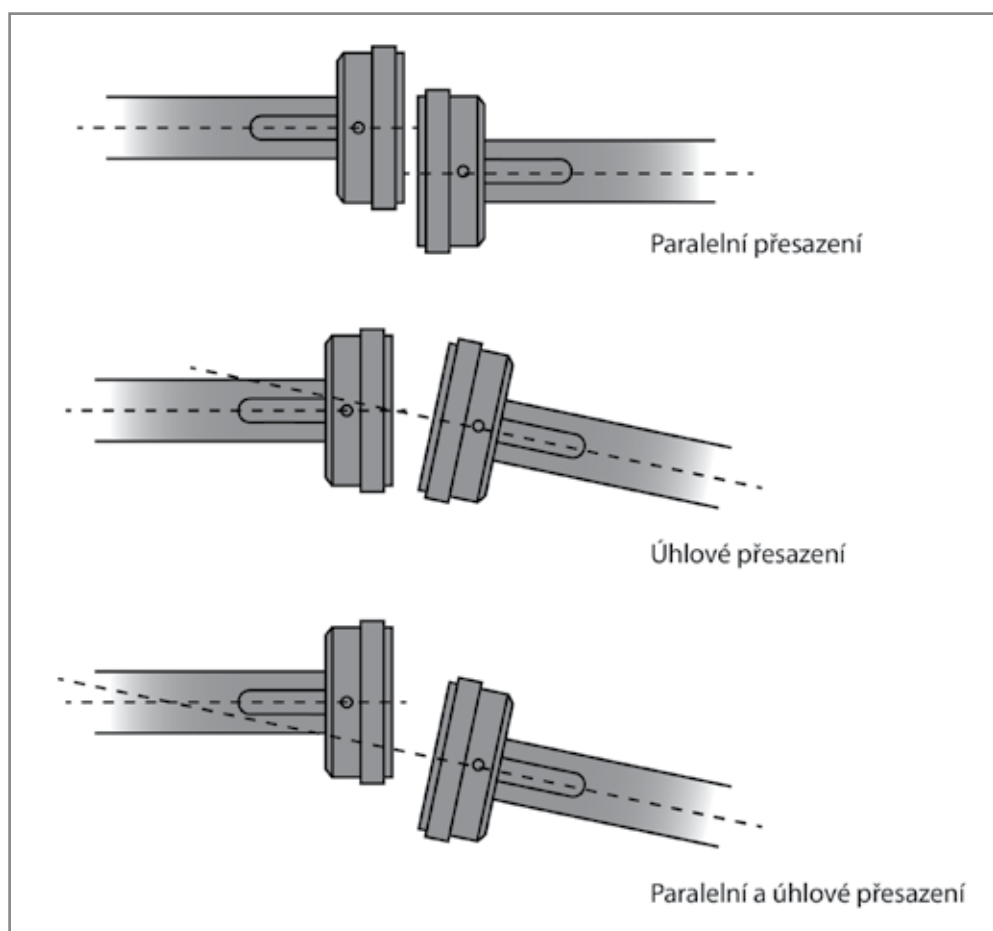
Původní osy rotací byly rovnoběžné. Při smontování dochází k velkému namáhání (hřídele a další součásti) a až opotřebení spojky. „Projevuje se velkými radiálními vibracemi. Nebývá výjimkou, že druhý harmonický násobek bývá často větší než otáčková složka. S rostoucím přesazením hřídelů se generují ve spektru amplitudy s čtvrtým až osmým harmonickým násobkem.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 27) (3)

Úhlová nesouosost

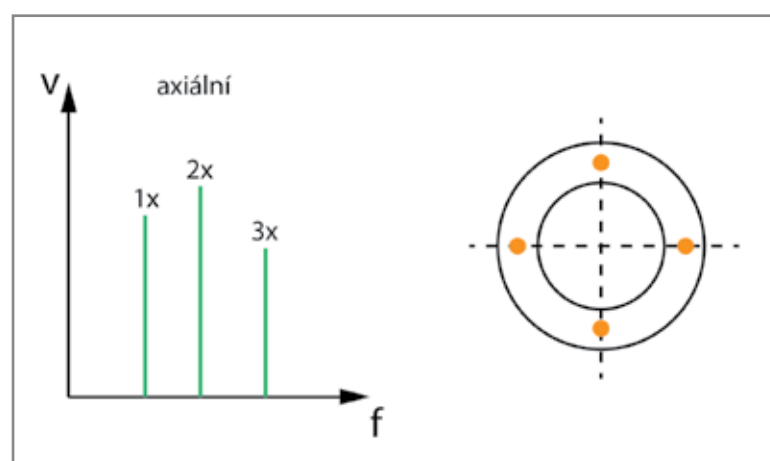
Původní osy hřídelů před smontováním nejsou rovnoběžné, protínají se. „Projevuje se velkými axiálními vibracemi. Ve spektru může dominovat amplituda na první, druhé nebo také třetí harmonické frekvenci. Fázový rozdíl na obou stranách spojky je opačný, tudíž fázový rozdíl je 180°.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 28) (3)

Rovnoběžná a úhlová nesouosost

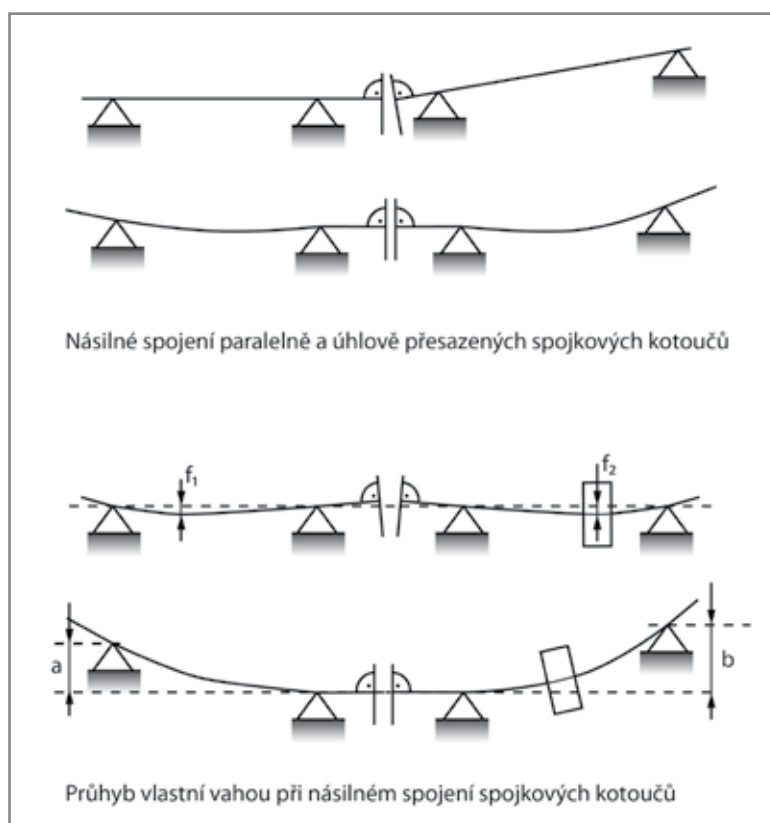
Vzniká kombinací předchozích dvou typů. (8, s. 52)



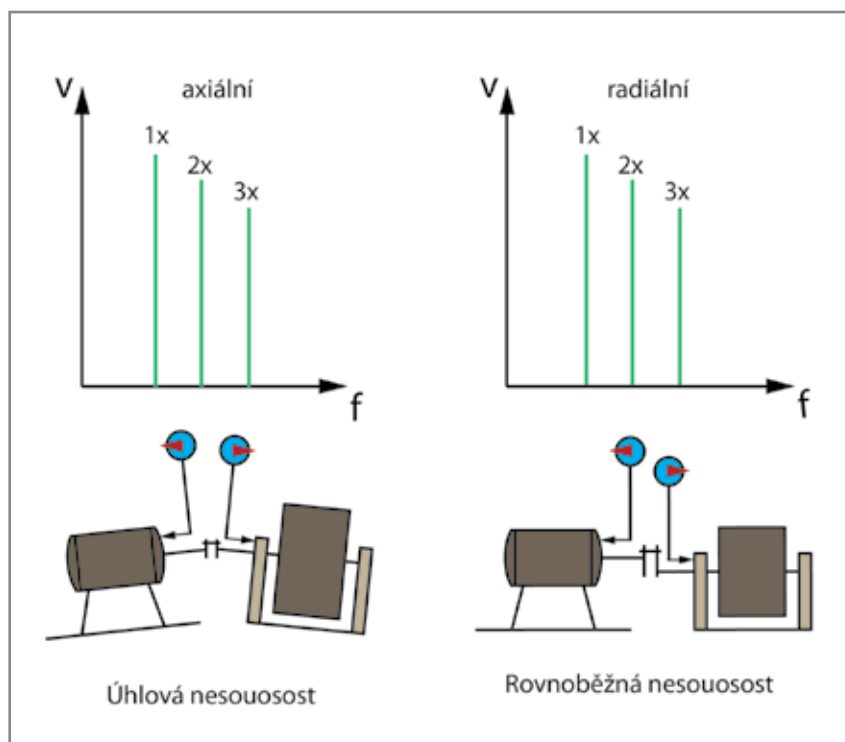
Obr. 15: Druhy nesouososti (8, s. 52)



Obr. 16: Projev nesouosého ložiska ve frekvenčním spektru (8, s. 164)

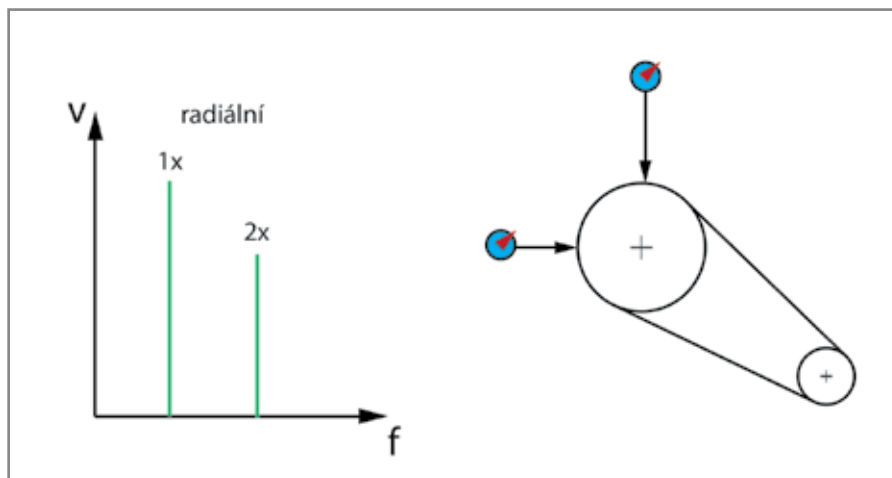


Obr. 17: Možné příčiny nesouososti (8, s. 52)

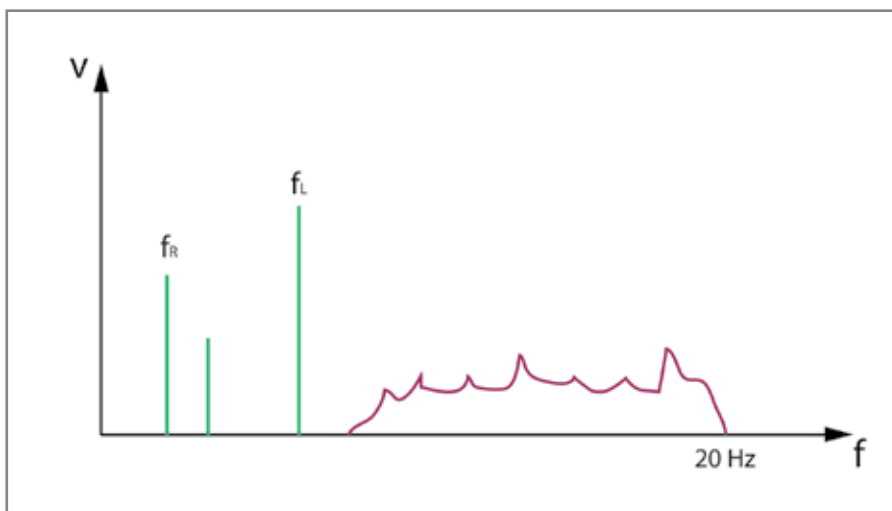


Obr. 18: Projev nesouososti ve frekvenčním spektru (8, s. 56)

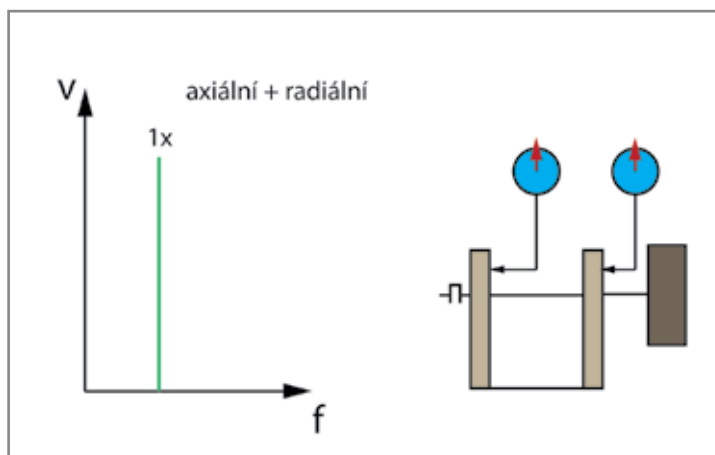
2.3.3 Další příklady poruch a jejich projevů ve frekvenčním spektru



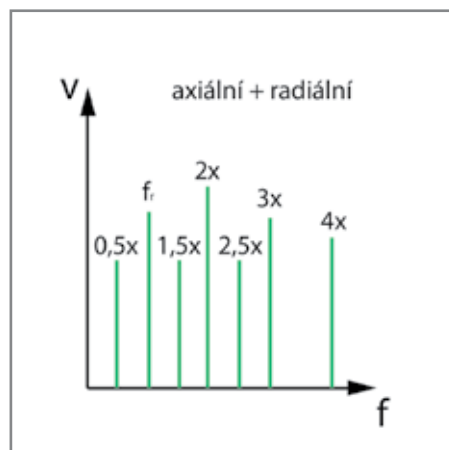
Obr. 19: Projev excentrického rotoru ve frekvenčním spektru (8, s. 164)



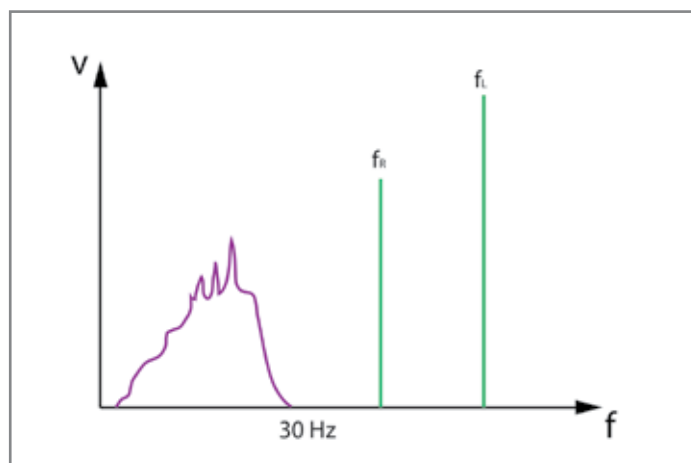
Obr. 20: Projev kavitace ve frekvenčním spektru (8, s. 167)



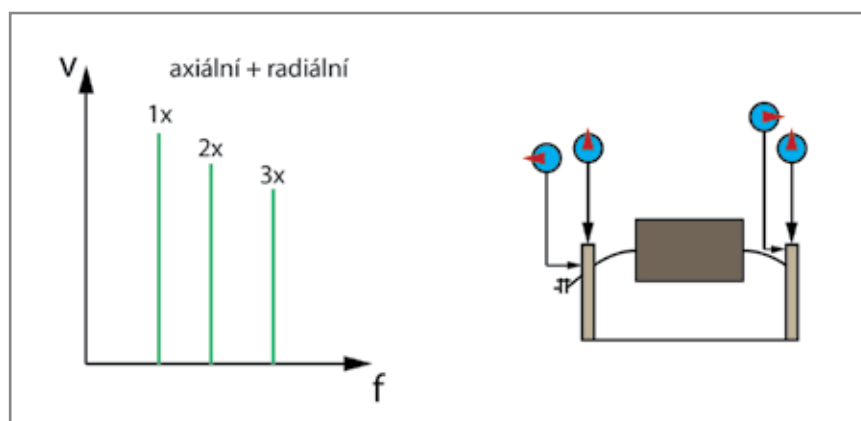
Obr. 21: Projev letmo uloženého rotoru ve frekvenčním spektru (8, s. 55)



Obr. 22: Projev mechanického uvolnění ve frekvenčním spektru (8, s. 165)



Obr. 23: Projev turbulence ve frekvenčním spektru (8, s. 167)



Obr. 24: Projev ohnuté hřídele ve frekvenčním spektru (8, s. 57)

2.4 VIBRACE SPALOVACÍCH MOTORŮ

U spalovacích motorů jsou největší vibrace způsobeny spalovacím procesem (silné detonace vznikající v důsledku stlačení a zažehnutí/vznícení směsi ve spalovacím prostoru) - zatímco u elektromotoru je největší amplituda na otáčkové frekvenci. Nejvýraznější projev bude při vznícení (zážehu) jedenkrát za dvě otáčky motoru u každého válce (čtyřdobý motor). Frekvenci spalování lze stanovit jednoduchým vztahem ($0,5 \cdot \text{poč. válců} \cdot \text{ot. frekvence klik. hřídele motoru [Hz]}$) - u dvoudobého motoru se frekvence vypočítá jako: $\text{poč. válců} \cdot \text{ot. frekvence klik. hřídele motoru [Hz]}$. Tato frekvence je ve spektru frekvencí dominantní. Velikost amplitudy je při nižších otáčkách výrazná, se zvyšujícím se počtem otáček se zmenšuje. (3, s. 55)

2.5 REZONANCE

„Zařízení, které je provozované v blízkosti vlastní rezonanční frekvence, je namáháno neúměrně vysokými vibracemi, které mohou vést k poškození nebo zničení celého zařízení.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 57) (3) Kvůli tomuto riziku jsou stroje navrhovány tak, aby pracovaly pod nebo mimo jejich rezonanční oblast. Amplitudy vibrací jsou o to větší, pokud je zde malé tlumení. Tlumením lze tedy omezit vibrace - jednou z forem tlumení je tření. (3, s.57 - 58)

Odstranění rezonance

Některé konstrukce nebyly navrženy s ohledem na jejich rezonanční vlastnosti, proto kvůli možným poškozením stroje je snaha snížit vibrace. (3, s.58)

Mezi možnosti patří:

Konstrukční úpravy: Jsou nejpoužívanější. Možností je zesílení konstrukce - ale může vést ke zhoršení, proto se k tomuto využívají programy pro určení vhodné nápravy (umístění podpor, úprava profilů, zesílení/ztenčení konstrukce, odstranění/přidání konstrukčních částí a další). (3, s.58)

Změna parametrů rezonanční síly: Jednoduchý způsob zabránění/odstranění rezonance. (3, s.58)

Jiné způsoby: Mezi další způsoby odstranění rezonance patří přeladění soustavy pružinami, tlumiči, silentbloky a dalšími, jde o kombinaci předchozích způsobů (3, s.58)

2.6 HLUK V DOPRAVĚ

Má negativní účinky na zdraví nejen lidí a ovlivňuje jejich chování. Dopravní prostředky mají dvě příčiny vzniku hluku: aerodynamický (působení proudu vzduchu) a mechanický (mechanické kmity částí strojů), často jsou obsaženy v jednom stroji obě příčiny. (9)

2.6.1 Hluk z letecké dopravy

Největší hluk způsobuje letecká doprava. Jejich vnějším hlukem jsou nejvíce postižena blízká okolí letišť. Tryskové letadlo při startu působí hluk přibližně 140 dB. Vnitřním hlukem jsou postiženy kabiny letadel s vrtulovým pohonem. Zde je potřeba trup navrhovat tak, aby došlo k co největšímu útlumu hluku. Dokonce od roku 2002 jsou na letištích Evropy zakázány určité typy letadel právě kvůli jejich vysoké hlučnosti. Nová letadla již nejsou sice tak hlučná, ale oblíbenost letecké dopravy roste, proto roste i počet letadel a s nimi i hluk. Letadla mají předepsány hlukové limity a letecké společnosti jsou za jejich nedodržování pokutovány. Také je snaha omezit noční lety. (9)

2.6.2 Hluk z železniční dopravy

Železniční doprava je na tom o něco lépe. Z výzkumu Ministerstva zdravotnictví vyplývá, že jen u velmi mála lidí žijících podél nejfrekventovanějších železnic je hlukový limit překročen (přibližně u 0,07% těchto lidí). Hluk z železniční dopravy je dán třením nerovných kol vagónů s povrchem kolejnic. Existují možnosti eliminace hluku od železniční dopravy, které snižují hluk asi o 8-10 dB (leštění kolejnic, tlumiče kolejnic - pružný materiál připevněný ke kolejnicím, brzdové čelisti z kompozitních materiálů). (9)

2.6.3 Hluk ze silniční dopravy

Hluk vznikající na povrchu komunikace

Tento hluk je ovlivněn strukturou vozovky a také vzorkem a strukturou pneumatik. Povrch vozovky je možné upravit protihlukově (například dvouvrstvý porézní povrch - možno vyrobit z recyklovaných pneumatik - snižuje hluk až o 12 dB), což snižuje hluk o více než polovinu oproti asfaltovému povrchu. Tento způsob tlumení hluku je sice dražší než protihlukové stěny, nicméně je estetičtější, a tím, že není třeba poté budovat stěny, izolovat domy proti hluku nebo případně platit léčbu nemocí z nadměrného hluku, se však dosáhne jistých úspor. Tyto tiché povrchy vozovek jsou preferovány právě v blízkosti zástavby. Obecně je hluk od povrchu vozovky patrnější až od rychlosti 50 km/h, při nižších rychlostech převládá hluk od motoru vozidla. (9)

Hluk z motorů a pneumatik

Tři složky tohoto hluku: aerodynamický (vozidlo rozráží při jízdě vzduch), od motoru a hluk z kontaktu pneumatik a povrchu vozovky. Hluk pneumatik převažuje v rychlostech nad 30 km/h (osobní automobily) a nad 50 km/h (nákladní automobily), u hodnot nižších převládá hluk od motoru. V EU platí pro celkový hluk od automobilu limity 74 dB (osobní) a 80 dB (nákladní). Pro pneumatiky platí čím širší, tím je hluk větší. Hluk od pneumatik lze snížit použitím tižších typů (nemají vliv na bezpečnost ani spotřebu paliva). Tižší pneumatiky snižují hluk od vozidel velice efektivně (přibližně na poloviční hodnotu celkového hluku). (9)

3 Vliv hluku a vibrací na lidský organismus

Tím, že se vibrace a hluk šíří do svého okolí, dostávají se do kontaktu i s živými organismy, na které většinou působí negativně.

Fechner-Weberův zákon: tělo vnímá podněty logaritmicky jejich intenzitě (velké změny podnětů způsobují pouze malé změny počitků). (2)

3.1 HLUK

Jak již bylo řečeno, hluk je zvuk, který je člověku nepříjemný a není žádoucí. Každý člověk vnímá zvuk trochu jinak, proto pro někoho je konkrétní zvuk žádoucí, pro někoho nežádoucí. Bohužel člověk se na vzniku zvuku podílí. Proto se tato kapitola týká jak vnímání, tak i vytváření zvuku lidským organismem.

Uvádí se, že hluk s časem narůstá až o 1 Db za rok. (7, s. 41)

Mezi nejčastější zdroje hluku tedy patří doprava, průmysl, stavební činnost, hudba, bydlení a rekreační hluk.

3.2 LIDSKÝ SLUCH

3.2.1 Vnímání hluku člověkem

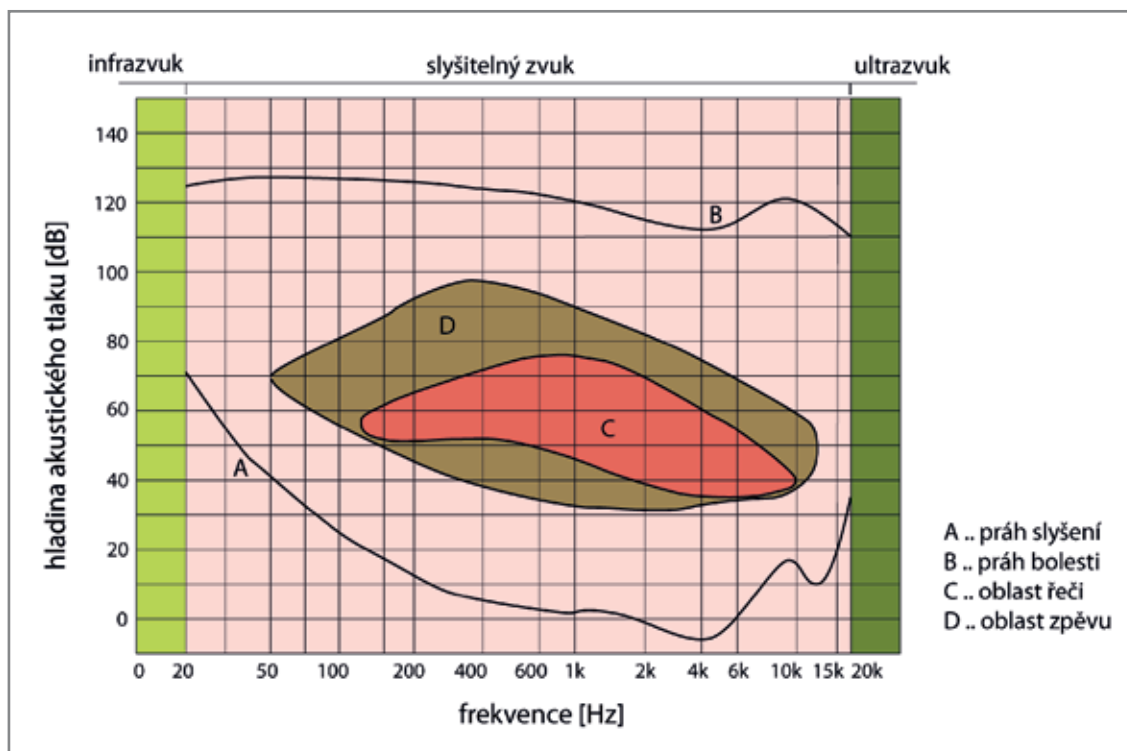
Na rozdíl od vibrací, které člověk může vnímat různými orgány, pro vněm zvuku jsou lidé vybaveni speciálním orgánem - sluchovým ústrojím. Toto ústrojí má dvě základní funkce: orientace a dorozumívání. Říká se, že ztráta sluchu je horší než ztráta jiného smyslu, protože člověka izoluje od okolí daleko více. Sluch nám umožňuje nejen vnímat pouhou existenci zvuku, ale také jeho vlastnosti (výška, barva, intenzita, směr a poloha jeho zdroje). (11, s. 18 - 19)

3.2.2 Oblast slyšitelnosti

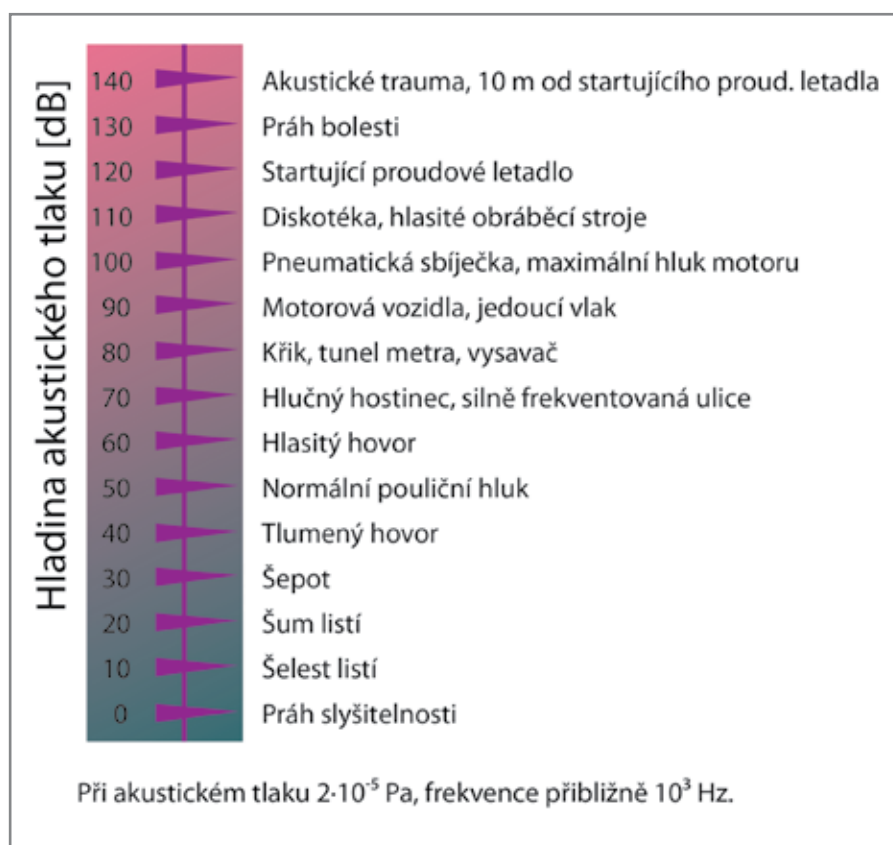
Pro člověka slyšitelný zvuk se nachází v rozmezí od 20 Hz do 20 kHz. Nejcitlivější zvuky pro lidské ucho jsou o frekvenci okolo 2 kHz. Z pohledu věku člověk nejlépe slyší okolo 20. roku, poté se po 30. roku u mužů a asi 45. roku u žen horní hranice slyšitelnosti snižuje, kupříkladu v 50 letech je to asi jen 13 kHz. (11, s. 19)

Lidé většinou považují hluboké ticho (přibližně kolem 20 dB) za nepříjemné. Více než 130 dB (dle jiných zdrojů 100 dB) však působí bolest sluchového orgánu a k jeho poruše dojde při hluku větším než 160 dB. (7, s. 6)

Následující obrázky zobrazují oblast slyšitelnosti, dále křivky prahu bolesti a prahu slyšení a pro ilustraci některé příklady představující hluk při různých hladinách akustického tlaku.



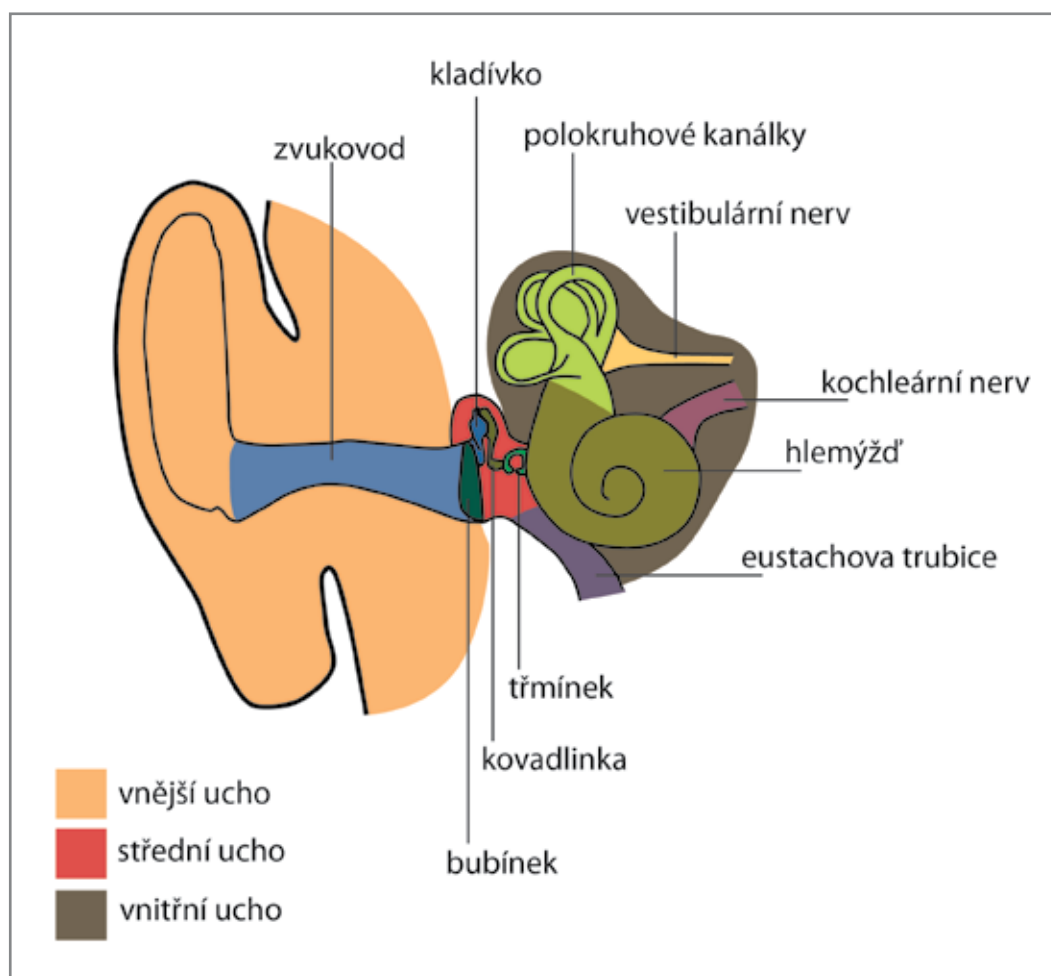
Obr. 25: Sluchová pole (12, s. 12)



Obr. 26: Příklady hluku (7, s. 43)

3.2.3 Sluchový orgán

Na následujícím obrázku jsou vidět základní části tohoto ústrojí. Zevní (vnější) ucho je uzpůsobeno pro postup zvukových kmitů k bubínkové blance. Skládá se ze dvou částí (ušní boltec a zevní zvukovod). Tvar ušního boltce má na rozdíl od zvířat jen malý vliv na úroveň slyšení (i po odstranění sluchový vjem zůstává víceméně beze změny). Pro zvířata je boltec významný hlavně pro vnímání směru a dovedou jím i pohybovat. Ze zvukovodu se přenášejí kmity přes bubínkovou blanku do středního ucha. Střední ucho je tvořeno třemi drobnými kůstkami: kladívko, kovádlíka a třmínek. Tyto kůstky pracují jako páky. Kmity zesilují a přenášejí je do vnitřního ucha. Dutina středního ucha je vyplněna vzduchem a pomocí sluchové trubice (Eustachovy) je spojena s nosohltanem. Při každém polknutí se stěny trubice rozevírají a tím se vyrovnává tlak ve středoušní dutině s tlakem v okolí. Ve vnitřním uchu se mechanické kmity mění na elektrické potenciály. Tuto změnu zajišťují vláskové buňky (sluchové). Sluchové buňky se dělí na vnitřní (smyslové) a vnější (zesilují nebo tlumí kmity dle potřeby). Nervová soustava poté zajistí, aby se tyto potenciály dostaly až do sluchového centra v mozku. Vnitřní ucho je vyplněno tekutinou. (12, s. 4 - 6)



Obr. 27: Řez lidským uchem - zjednodušený (7, s. 41 a 12, s. 5)

3.2.4 Zvukový projev lidského ucha

Není bez zajímavosti, že zdravé lidské ucho vydává zvuky. Tento jev, zvaný otoakustické emise, objevil angličan Kemp roku 1978. Nejdříve mu nikdo nevěřil, posléze se však ukázalo, že má pravdu. V uchu se nachází bubínek, jehož blanka při slyšení funguje podobně jako mikrofón, zatímco při vydávání zvuků pracuje podobně jako membrána reproduktoru. Zdrojem zvuku jsou s největší pravděpodobností zevní vláskové buňky v Cortiho ústrojí, které jsou zde obsaženy v přibližném počtu 15 000. Tyto buňky mají schopnost se smršťovat (podélně i příčně), čímž zeslabují silné nebo naopak zesilují slabé zvuky přiváděné středním uchem. Toho, že ucho vydává zvuk, si již dříve často všimaly matky kojenců a malých dětí, u kterých jsou zvuky nejsilnější. Zejména v noci je snadné zaslechnout je a lokalizovat. Zvuky se projevují jako vysoké pískavé tóny. Jejich hlasitost může být až o velikosti 55 dB (podobně jako lidská mluva). Obecně jsou tyto zvuky spontánní (samovolné), většinou velmi slabé, mají charakter tónů a jsou spíše neslyšitelné, proto je možné je zachytit často až po zesílení pomocí speciálních přístrojů. (12, s. 76 - 78)

Naproti těmto spontánním zvukům existují také zvuky evokované. Tyto jsou vyvolané zvukovým drážděním. Evokované zvuky se využívají například při zjišťování zdatnosti vnitřních vláskových buněk (smyslové sluchové buňky) - měření jsou prováděna a zaznamenána přístrojem, což zajišťuje objektivitu této metody. (12, s. 76 - 78)

3.2.5 Neslyšící řidiči

Za zmínku stojí i řidičské schopnosti neslyšících. Mezi řidiči je mnohem více slyšících než neslyšících. Neslyšící řidiči však mají lépe vyvinutý zrak a věnují řízení větší pozornost než slyšící, což vede k tomu, že počet nehod neslyšících je 3 - 4 krát menší než u slyšících. Je za tím také fakt, že nejsou rozptylováni vnějšími faktory, jako jsou například puštěné rádio, hluk vlastního vozidla, hluk z okolí a případný hovor. Díky tomuto sice neslyší projevy vozidla, vnímají ale o to lépe jeho vibrace. (12, s. 75 - 76)

3.3 LIDSKÝ HLAS

Hlas je podobně jako sluch důležitým nástrojem dorozumívání. Hlas je vytvářen orgánem zvaným hlasivky. Ty jsou uloženy v hrtanu. Hlas vzniká přerušováním vydechaného vzduchu dvojicí hlasivek. Při nádechu jsou přetlakem vzduchu tlačeny od sebe a směrem vzhůru, ale jakmile přetlak pomine, navrátí se k sobě. Postavení, kdy jsou hlasivky u sebe a mohou tvořit hlas, se nazývá fonační. Speciální typ mluvy je šepot - hlasivky nevibrují, částečně jsou sblíženy a částečně oddáleny. Šepot je pro hlasivky náročnější než mluva, proto se nedoporučuje. Délka hlasivek ovlivňuje výšku hlasu. Delší hlasivky pomaleji kmitají a vytváří hlas hlubší (muži), zatímco kratší hlasivky vibrují rychleji a hlas je tedy vyšší (ženy, děti). Na výšce hlasu se však podílí více faktorů (postavení hlasivkových chrupavek, napětí hlasivek, tlak výdechového vzduchu, práce svalů hrtanu). Zesílením výdechového proudu vzduchu dochází k zvýšení síly hlasu. Hlas, který vychází z hlasivek, se průchodem ven z hrtanu mění, hlásky vznikají až artikulačními pohyby mluvidel (jazyk, rty). Běžný člověk při mluvení využívá frekvenční rozsah přibližně jedné oktávy, zpěváci dosahují rozsahu dvou až tří oktáv. Ženský a mužský hlas mají každý tři základní typy (soprát, mezzosoprán, alt a tenor, baryton, bas). (7, s. 40)

3.4 VLIV HLUKU NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Hluk má na lidský organismus vliv nepříznivý. Sluch je jakýmsi varovným systémem, který spouští další mechanismy (zvýšení krevního tlaku, zrychlení tepu, stažení periferních cév, zvýšení hladiny adrenalinu, ztráty hořčíku). Hluk má nepříznivý vliv na psychiku člověka a způsobuje mimo jiné také únavu, deprese, rozmrzelost, agresivitu, zhoršení paměti a pozornosti, snížení výkonnosti a další. Dlouhodobě nadměrnému hluku vystavený jedinec může trpět vysokým krevním tlakem, poškozením srdce (riziko infarktu), horší imunitou, únavou a nespavostí. Špatný vliv má také hluk působící na člověka během spánku - zhoršuje jeho kvalitu a hloubku. Hluk může poničit sluchový orgán (například krátkodobý hluk nad 130 dB, časté/dlouhodobé vystavování se hluku nad 70 až 85 dB). Sluchovou ztrátu nespůsobuje stárnutí, nýbrž hluková zátěž. Bohužel poškození sluchu není vratné, pouze je možné zlepšit slyšení pomocí speciálních přístrojů. (9)

3.4.1 Měření hluku

Měření hluku při práci se provádí na různých místech. Na pracovním místě se provádí, pokud se *„pracovník zdržuje na jednom pracovním místě a zbývající expozice hluku je nepodstatná.“* (kolektiv autorů, 2005, s. 24) (13) Dále se provádí měření v pracovním prostoru, a to v případě, kdy *„v pracovním prostoru je rozmístěno větší množství obdobných zdrojů hluku a lidé při práci mění pracovní místa.“* (kolektiv autorů, s. 24) (13) Také se provádí přímé měření hlukové zátěže jednotlivce, pokud *„pracovník mění často místo a hluk na jednotlivých místech je značně rozdílný.“* (kolektiv autorů, 2005, s. 24 - 25) (13)

3.4.2 Situace v ČR, sluchově postižení

Jak již bylo zmíněno, hluk je jeden z mála škodlivých faktorů, které se stále nedaří zvládat, v ČR je situace velmi špatná: *„v ČR vykonává práce na pracovištích, na nichž ekvivalentní hladina akustického hluku v osmihodinové pracovní směně převyšuje hodnotu 85 dB, asi 150 000 pracovníků.“* (kolektiv autorů, 2005, s. 225) (13) Nejintenzivnějšímu hluku jsou vystaveni pracovníci v oblastech opracování kovových předmětů, práce s vibrujícími předměty, hornictví a stavebnictví. (13, s. 226)

Poruchou sluchu trpí nejvíce muži ve středním a vyšším věku. (13, s. 225)

Sluchová ztráta se uvádí v procentech (například dle Fowlera). *„Při celkové ztrátě sluchu do 20% si postižený poruchu zpravidla ani neuvědomuje, ztráty do 40% může kompenzovat zvýšenou pozorností a teprve při vyšších ztrátách má komunikační potíže.“* (Pelclová a kol., 2006, s. 31) (14)

3.5 VLIV VIBRACÍ NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Vibrace působící na člověka mohou způsobit vynucené kmitání některých částí lidského organismu nebo i celého těla, čímž dochází k dynamickému namáhání orgánů a to zhorší oběhový systém. Vlivem zhoršeného oběhového systému může člověk pociťovat únavu, poruchy vegetativní nervové soustavy a jiné. (7, s. 6 - 7)

Způsob vněmu vibrací působících na lidský organismus je ovlivněn hodnotou frekvence dané vibrace. Vibrace malých frekvencí (v rozsahu od 0,15 Hz do 0,3 Hz) vnímá člověk pomocí vestibulárního aparátu (smyslový orgán uložený ve vnitřním uchu, který registruje polohu a pohyb těla) a způsobují bolesti hlavy, kroutění hlavy, problémy s orientací a pohybem a také psychofyzické iluze. Vibrace s frekvencí kolem 1 Hz člověk může vnímat zejména zrakem. Do 10 Hz jsou vibrace vnímány opět vestibulárním systémem, nad 20 Hz jsou vibrace zachytitelné sluchem. (7, s. 6 - 7)

3.5.1 Dělení vibrací dle způsobu přenosu na člověka

„Celkové horizontální nebo vertikální vibrace (posuzované v kmitočtovém rozsahu 0,5 až 80 Hz), dále vibrace přenášené na ruce (posuzované v kmitočtovém rozsahu 8 až 1 000 Hz), vibrace přenášené zvláštním způsobem, na hlavu, páteř, rameno a podobně (posuzované v kmitočtovém rozsahu 1 až 1 000 Hz), celkové vertikální vibrace vyvolávající nemoci z pohybu (kmitočet nižší než 0,5 Hz), celkové vibrace v budovách (posuzované v kmitočtovém rozsahu 1 až 80 Hz).“ (kolektiv autorů, 2005, s. 28) (13)

3.5.2 Nemoci způsobené vibracemi při práci s vibrujícími nástroji

Nemoci cév rukou:

Projevují se tzv. Raynaudovým syndromem (syndrom bílých prstů). Nejčastěji se to týkalo horníků a pracovníků v těžkém strojírenství, kteří byli vystaveni nadlimitnímu působení vibrací na ruce. V dnešní době se podařilo počet nemocných snížit. Nástroje, které toto onemocnění způsobují, jsou typicky tyto: vrtací a sbíjecí kladiva, motorové pily a brusky, dříve i volanty nákladních automobilů. Příznakem onemocnění je zbělení prstů, které je způsobeno nedostatečným prokrvením prstů. Tato bílá místa jsou od prokrvených míst viditelně ohraničena, prsty nejsou citlivé, brní a mravenčí. Po prohřátí tato místa pálí. Ke zlepšení stavu pacienta dojde po odstranění expozice vibracemi. (13, s. 236 - 239)

Nemoci periferních nervů horních končetin charakteru ischemických a úžínových neuropatií:

Toto onemocnění vzniká v důsledku expozice nadlimitními vibracemi a má za následek poškození nervu medianu nebo ulnárního nervu. Ohroženou skupinou jsou lidé podobně jako u nemocí cév, dále pak lidé pracující s motorovou pilou (dřevorubci). Není dobře známo, jakým způsobem dochází k poškození nervů působením vibrací, existují pouze nepravděpodobné hypotézy. Tato nemoc se projevuje bolestí, brněním až necitlivostí, později i poruchou hybnosti svalů a v pokročilejším stadiu i jeho atrofií. Bolest se nejčastěji projevuje u pacienta v noci. Léčba spočívá ve vyřazení expozice vibracemi, lokální léčbě postiženého místa, podávání léků a vitaminů, také je možná fyzikální nebo chirurgická léčba. (13, s. 240 - 243)

Nemoci kostí a kloubů rukou, zápěstí nebo loktů:

Opět jsou tato onemocnění způsobena nadlimitním působením vibrací. Mohou se projevovat jako artrózy (nejčastěji), klinicky němé kostní cysty, nekrózy zápěstních nebo záprstních kůstek (vzácně). Postižení jsou pracovníci zmínění u předchozích dvou onemocnění a je pozitivní, že jich ubývá. Pravděpodobně jsou tato postižení způsobena hlavně otřesy a rázy. Pokud je postižení již rozvinuté, není možné jej léčit, jinak připadá v úvahu rehabilitace, léky a fyzikální léčba. Prevencí je samozřejmě odstranění expozice vibracemi. (13, s. 243 - 245)

3.3 ZÁKONNÉ LIMITY VIBRACÍ

Tuto problematiku řeší Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. (15)

3.3.1 Vibrace na pracovištích (část čtvrtá)

Tabulka č. 1: Vibrace na pracovištích

	Limitní hladina zrychlení vibrací (L_{aw})	Limitní zrychlení vibrací (a_{ew})
PŘÍPUSTNÝ EXPOZIČNÍ LIMIT VIBRACÍ		
Přípustný expoziční limit vibrací přenášených na ruce vyjádřený průměrnou souhrnnou váženou hodnotou	128 dB	2,5 m/s ²
Přípustný expoziční limit vibrací přenášených zvláštním způsobem na zaměstnance způsobujících intenzivní kmitání v horní části páteře a hlavy vyjádřený průměrnou váženou hodnotou	100 dB	0,1 m/s ²
Přípustný expoziční limit celkových vibrací přenášených na zaměstnance vyjádřený průměrnou váženou hodnotou	114 dB	0,5 m/s ²
HYGIENICKÝ LIMIT VIBRACÍ PRO JINOU NEŽ OSMIHODINOVOU PRACOVNÍ SMĚNU	k příp. expozič. limitu se přičte korekce $K_T = 10 \log(480/T)$ dB, T-doba směny v minutách	k příp. expozič. limitu se přičte korekce $k_T = \text{odm}(480/T)$, T-doba směny v minutách

	Limitní hladina zrychlení vibrací (L_{aw})	Limitní zrychlení vibrací (a_{ew})
Expozice celkovým vibracím po dobu 10 minut a kratší	131 dB	3,55 m/s ²
Expozice vibracím přenášeným na ruce po dobu 20 minut a kratší	142 dB	12,5 m/s ²
PRŮMĚRNÁ EXPOZICE (pracovní doba je ve sledovaném období proměnná, nebo když se vibrace v průběhu sledovaného období mění, avšak jednotlivé denní expozice se neliší o více než 10 dB (hladina zrychlení) nebo o násobek větší než 3 (zrychlení) - hladina zrychlení a zrychlení se určují dle vztahů	$10 \cdot \log \left(0,2 \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{aw}} \right)$	$\sqrt{0,2 \sum_{i=1}^n (a_{ew})^2}$
HYGIENICKÉ LIMITY CELKOVÝCH VERTIKÁLNÍCH VIBRACÍ O KMITOČTU NIŽŠÍM NEŽ 0,5 Hz		
Po dobu expozice nepřekračující 120 min	120 dB	1 m/s ²
Po dobu expozice delší než 120 min	114 dB	0,5 m/s ²

3.3.2 Vibrace v chráněných vnitřních prostorech staveb a na pracovištích (část pátá)

Tabulka č. 2: Vibrace v chráněných vnitřních prostorech staveb a na pracovištích

	limitní hladina zrychlení vibrací (L_{aw})	limitní zrychlení vibrací (a_{ew})
Hygienický limit vibrací v chráněných vnitřních prostorech staveb vyjádřený průměrnou váženou hodnotou (vztahuje se na horizontální a vertikální vibrace v místě pobytu osob a k době trvání vibrací T , korekce v závislosti na typu prostoru, denní době a povaze vibrací v příloze tohoto nařízení)	75 dB	0,0056 m/s ²

3.4 OCHRANA PŘED HLUKEM A VIBRACEMI

O ochranu před hlukem by se měl starat každý jednotlivec, ale také stát. Bohužel evropské státy tuto povinnost zanedbávají, takže nadměrným hlukem je způsobeno mnoho nezvratných ztrát (dokonce i mnohé samovolné potraty). (9)

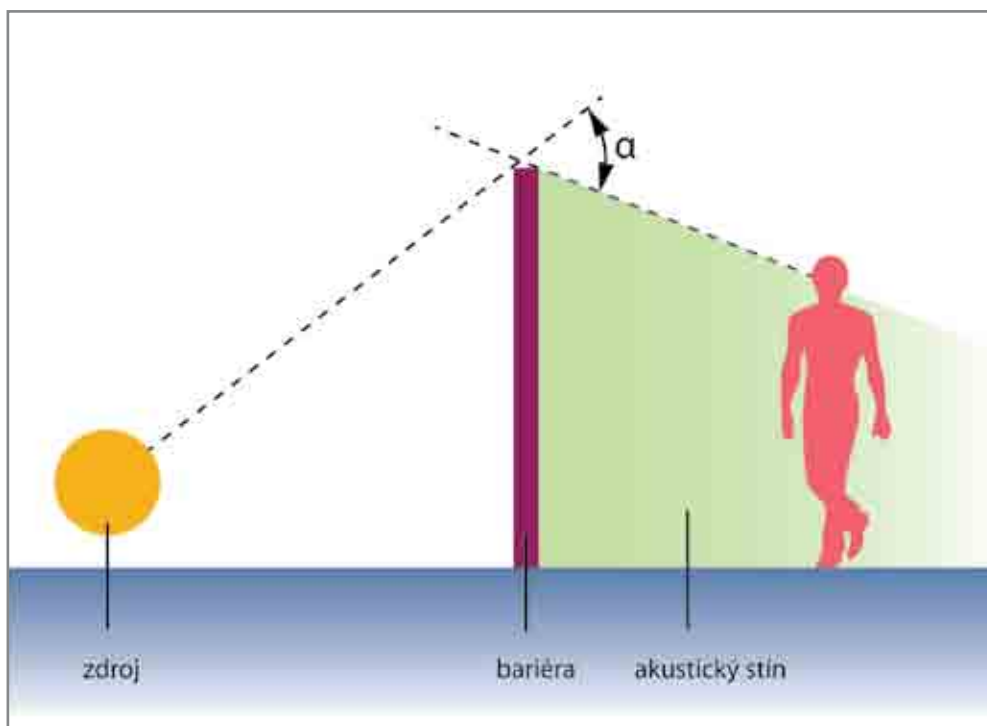
Ochrana hluku v pracovním prostředí je možná, ale bohužel není příliš efektivní a je drahá. Lze tedy vyloučit nebo částečně omezit emisi hluku přímo na zdroji (například protihlukový kryt), dále izolovat zvuk nebo omezit šíření zvuku, zlepšit akustické vlastnosti prostředí (velmi drahé a neefektivní), zavést opatření na snížení expozice hluku (střídáním zaměstnanců, přestávkami strávenými v méně hlučném prostředí) nebo lze pořídit osobní ochranné prostředky. (13, s. 26 - 27)

Ochrana (prevence) před vibracemi je velmi podobná ochraně před hlukem. Základem je „vyloučení nebo podstatné omezení emise vibrací přímo na zdroji.“ (kolektiv autorů, 2005, s. 30) (13) Toto lze například pomocí antivibračního nářadí, speciálních odpružených sedadel, dále pak je možné pružně uložit stroj. Dalšími způsoby ochrany jsou omezení cest šíření vibrací, snížení expozice vibracím (střídání pracovníků, přestávky) a použití osobních ochranných pomůcek. (13, s. 30)

3.4.1 Pasivní metody snižování hluku

Materiály pohlcující zvuk:

Tyto materiály se používají zejména ve strojírenství a stavební akustice. Tyto pohlcují zvuk (přeměna akustické energie na jinou energii). (7, s. 82)



Obr. 28: Zeslabení hluku za bariérou (7, s. 20)

Absorbce velkých plošných absorbérů:

„Vlastní absorpci zvuku lze vyšetřovat u velkých a rovných ploch absorbérů, aby tak byl vyloučen odraz a lom u hran ploch.“ (Mišun, 2005, str. 83) (7)

Rezonanční absorbéry:

Tyto absorbéry se využívají hlavně ve stavební akustice a pracují na principu Helmholtzova rezonátoru (dutina o určitém objemu opatřená hrdlem, v ní je určité množství vzduchu plnící funkci pístu). (7, s. 86 - 88)

Neprůzvučné desky:

Jsou tím myšleny různé desky, stěny a příčky, které jsou používány zejména v souvislosti s dopravou a v místnostech. (7, s. 89 - 91)

Bariéry v exteriérech (obr. 28) využívají efektu ohybu zvuku. Bariéra by měla být tak vysoká, aby úhel spojníc α byl co největší (bariéra co nejbližší k pozorovateli nebo ke zdroji hluku). (7, s.20)

Pružné vložky v konstrukcích:

Mají různý tvar a provedení, snižují přenos a chvění v konstrukcích (princip odrazu vlnění na rozhraní stykových ploch). (7, s.91)

Antivibrační nátěry:

Útlum materiálu je zvyšován přiložením dalšího materiálu. Tyto nátěry se využívají převážně u tenkých plechů a desek, jsou vyrobeny hlavně z umělých hmot. (7, s.93 - 95)

Absorbční tlumiče hluku potrubních systémů:

Pro potrubí, ve kterém proudí plyn. (7, s. 95 - 97)

3.4.2 Vibroizolace strojů a přístrojů

Vibroizolace znamená separování zdrojů vibrací přes pružná uložení. Pružný element má název vibroizolátor (izolátor vibrací). Izolací kmitů zařízení se dosáhne i snížení akustické energie, díky čemuž je izolované zařízení tižší. (7, s. 104)

Vibroizolace je **aktivní** (zdroj vibrací je izolován, čímž se zabrání šíření vibrací do okolí) a **pasivní** (zde je chráněno to dané zařízení od vibrací přiváděných okolím). Aktivní vibroizolace je efektivnější a má prioritu před pasivní vibroizolací. Je sice složitější než pasivní, ale poskytuje většinou lepší vibroizolaci okolního prostředí. (7, s. 104)

Vibroizolátory jsou různé (různý materiál a různé typy) a jsou navrženy pro namáhání na smyk, tlak, nebo jejich kombinaci. Nejpoužívanější bývají **kovové** (většinou ve tvaru šroubových spirál, jsou snadno vyměnitelné a jsou odolné vůči olejům a chemikáliím, snadno se stanoví tuhost potřebná pro daný systém) nebo **pružné z pryže** (jsou málo odolné vůči chemikáliím, mají nízkou životnost, ale výhodou je přítomnost tlumení vzniklým díky tření, jsou navrženy pro namáhání na smyk). Dále existují **vzduchové vaky** (namáhané na tlak, výhodou je menší výška oproti kovovým pružinám při dané tuhosti, je možné u nich měnit délku během provozu - například u vozidel, jsou však bočně málo stabilní, takže vyžadují boční vedení). (7, s. 107 - 108) „Pro vibroizolaci strojů a přístrojů proti vodorovným vibracím se ukazuje jejich vhodné zavěšení ve stylu fyzikálního kyvadla.“ (Mišun, 2005, str. 108) (7)

4 VIBRODIAGNOSTIKA

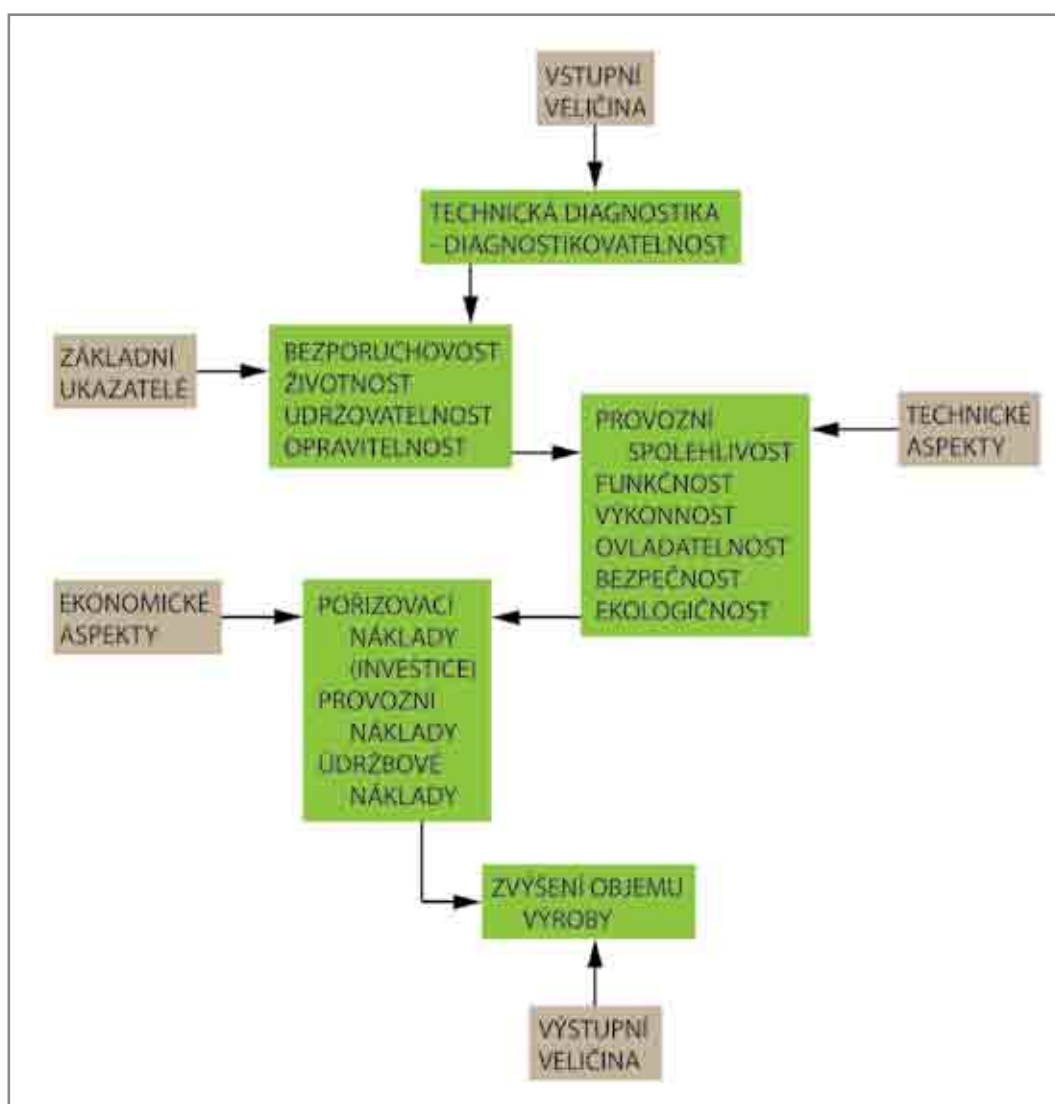
4.1 VIBRODIAGNOSTIKA, AKUSTICKÁ DIAGNOSTIKA

„Je jednou z nejpoužívanějších metod pro diagnostiku technického stavu strojních zařízení, je hojně používána především pro širokou možnost aplikace na různorodých strojních zařízeních. Pro vyhodnocení stavu využívá vibrační signál, který je dále zpracován a analyzován. Pro měření a následnou analýzu vibračního signálu využíváme rychlost, zrychlení nebo výchylku vibrací.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 2) (3)

Podobná této metodě je **akustická diagnostika**. Tato sleduje závady strojů pomocí akustického signálu, který vzniká díky vibracím (vibrace způsobí pohyb částic vzduchu a tímto se ak. signál šíří). Často se měří působení hluku na člověka. (3, s. 3)

„Cílem měření vibrací není vlastní měření, ale analýza vibrací, která je prostředkem k určení příčiny problému.“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 29) (8)

4.2 DIAGNÓZA A DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM



Obr. 29: Řetězec vlivu technické diagnostiky na objekt (8, s. 7)

Diagnóza je „analýza okamžitého technického stavu objektu resp. vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných podmínek.“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 5) (8)

Základní úkoly diagnózy:

detekce - „odhalení existence vznikající poruchy“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 5) (8)

lokalizace - určení místa poruchy (8, s. 5)

specifikace - stanovení příčiny poruchy a její geneze (8, s. 5)

predikace - prognóza zbytkové životnosti (8, s. 5)

Diagnostický systém „vyhodnocuje technický stav objektu“. (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 6) (8) Diagnostický systém je tvořen diagnostickými prostředky (technická zařízení, postupy, metody), diagnostickým objektem a obsluhou. (8, s. 6)

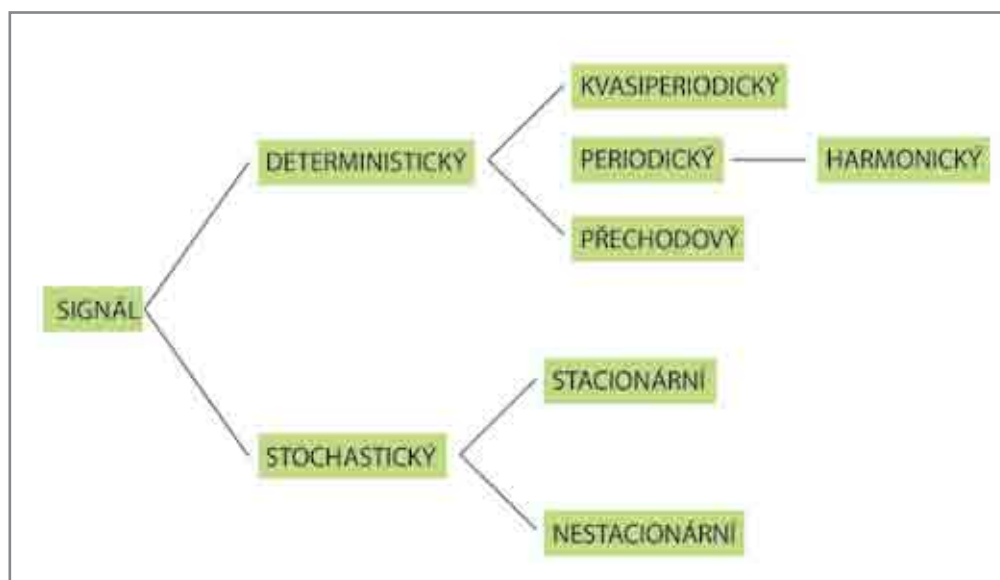
4.3 ROZDĚLENÍ SIGNÁLŮ

„Pojem signál vztahujeme na takové časové funkce, které reprezentují časové průběhy fyzikálních veličin a které obsahují, na rozdíl od šumu, smysluplné informace.“ (Stodola, 2003, str. 22) (1)

Deterministický: lze předvídat jeho průběh a popsat nebo definovat jej (3, s. 10)

Stochastický: je náhodný, nelze jeho průběh předvídat (3, s. 10)

Přechodový: je časově omezen (například impulz při rázové zkoušce nebo impulz od valivého elementu při přechodu vady) (3, s. 10)



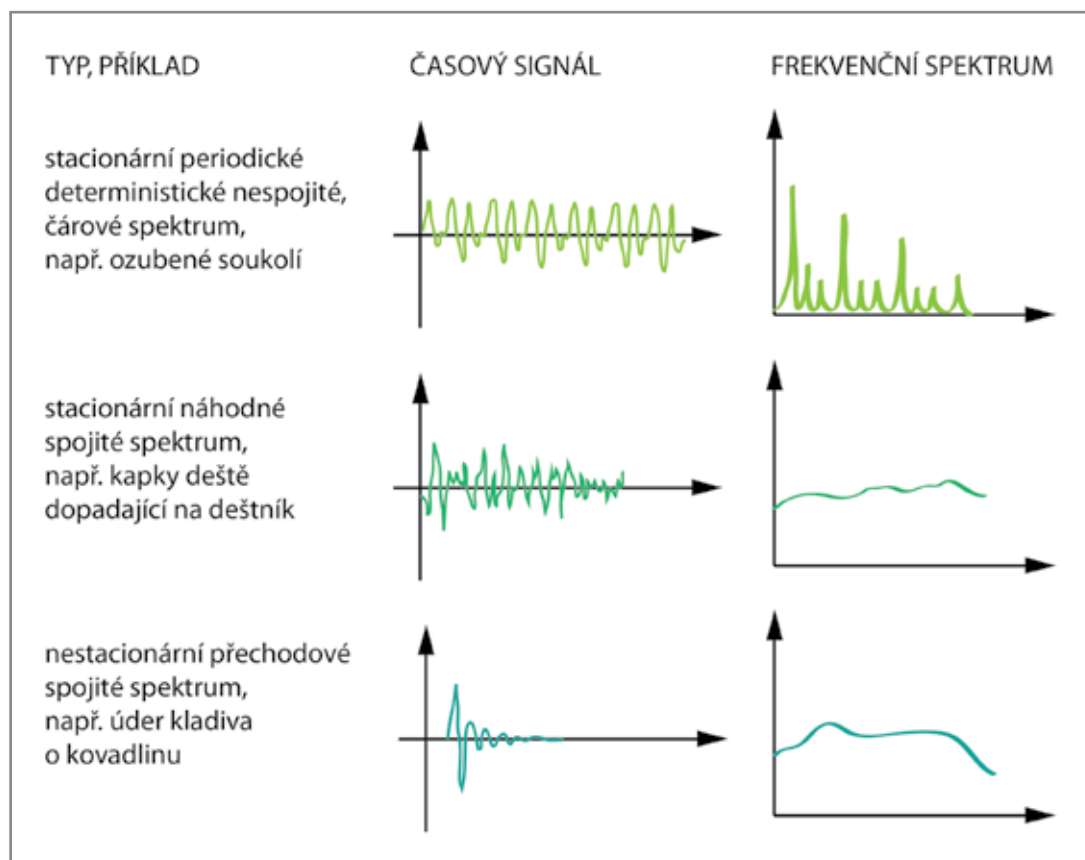
Obr. 30: Rozdělení signálů (3, s. 10)

Periodický: „tvořen harmonickými signály, které jsou násobkem základní frekvence (harmonické - celé násobky, a subharmonické - částečné násobky)“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 10) (3), použití ve vibrodiagnostice (3, s. 10)

Kvasiperiodický: „signál je také složený z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou násobky alespoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 10) (3)

Stacionární: průběh signálu je ustálený charakter, posouzení závisí na časové délce záznamu signálu (3, s. 10)

Nestacionární: průběh signálu se v čase mění, posouzení závisí na časové délce záznamu signálu (3, s. 10)



Obr. 31: Typy signálů a jejich příklady (1, s. 23)

4.4 METODY VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY

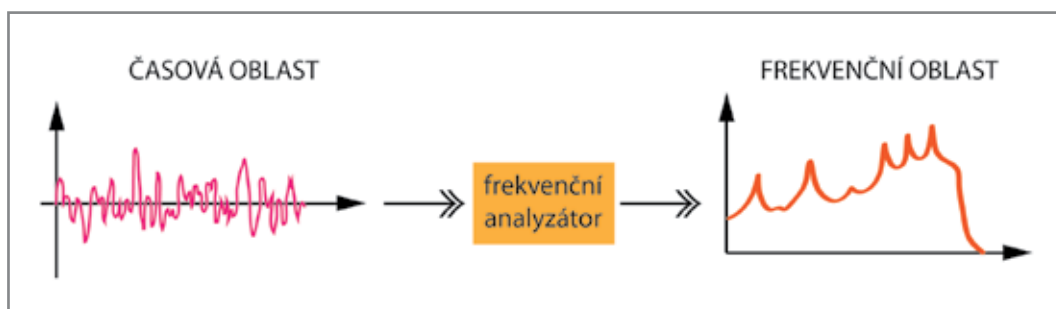
4.4.1 Frekvenční analýza pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT)

Patří mezi analytické metody a je z nich nejčastěji užívaná. Pomocí ní lze vyhledat ve vibračním signálu periodické děje, zobrazit je ve frekvenčním spektru a přiřadit jim patřičnou frekvenci. Využívá se při diagnostice strojů s rotačním pracovním cyklem, kde vibrační signál způsobují periodické děje. Kvůli složité identifikaci jednotlivých složek signálu se využívají frekvenční spektra. (3, s. 21)

Pro rozklad periodické funkce se spojitým časem se využívá Fourierova řada. V případě obecných neperiodických funkcí je vhodné použít rychlou Fourierovu transformaci. (8, s. 24 -25)

V dnešní době je rychlá Fourierova transformace automatickou funkcí řady počítačových programů a zde není pro svou složitost vylíčena podrobněji.

Tato metoda tedy převede časový průběh (souřadný systém os čas - amplituda) na frekvenční spektrum (souřadný systém os frekvence - amplituda). FFT je oblíbená díky rychlosti, přesnosti, srozumitelnosti a snadné realizovatelnosti (univerzální elektrický obvod). (8, s. 31)



Obr. 32: Frekvenční analýza (8, s. 31)

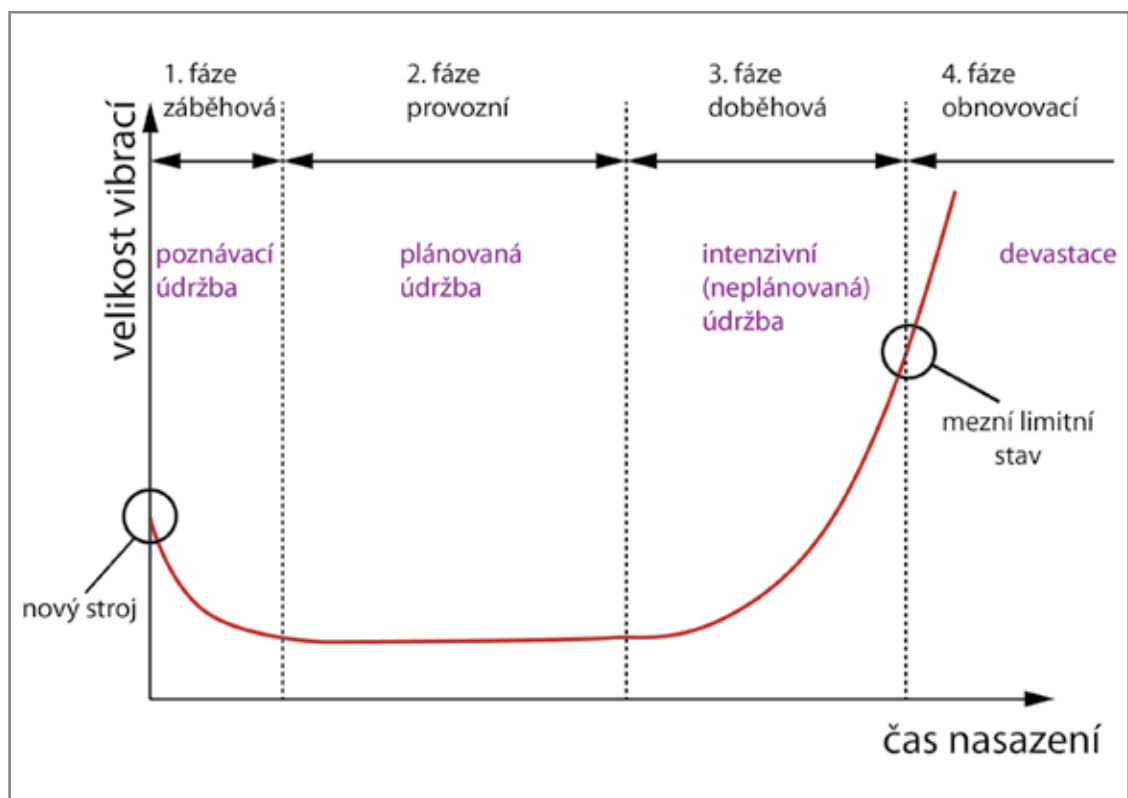
4.4.2 Kepstrální analýza

Zatímco FFT hledá v časovém průběhu periodické děje, které poté zobrazí ve frekvenčním spektru, Kepstrální analýza hledá periodické děje ve frekvenčním spektru. Je tedy jakousi frekvenční analýzou frekvenčního spektra. Pomáhá diagnostikovi orientovat se ve frekvenčním spektru. Používá se při určení poškození u valivých ložisek, boků zubů (pro včasné zjištění závady u ozubení je velmi užitečná). (8, s. 37 -38)

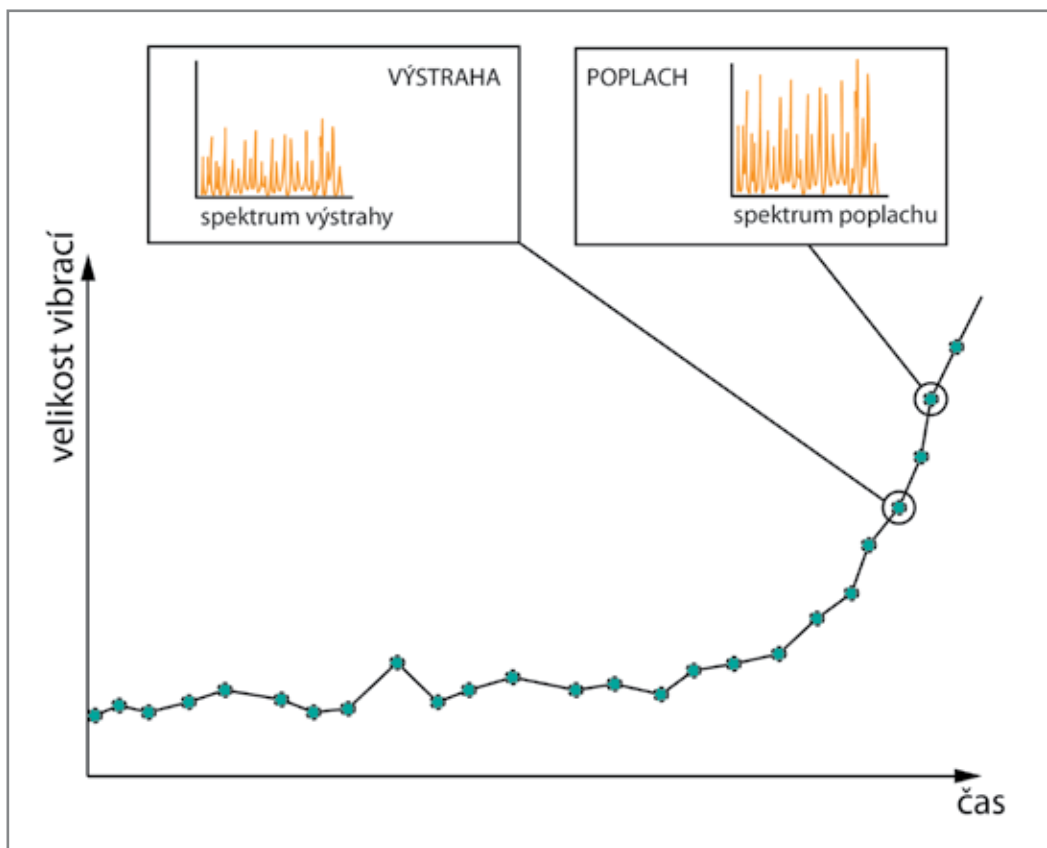
4.4.3 Trendování vibrací (celková mohutnost kmitání)

Velice používaná a jednoduchá metoda. Měření se provádějí v pravidelných intervalech a hodnoty se porovnávají s předchozím trendem. Ve vibrodiagnostice se měří a trendují veličiny výchylka, rychlost a zrychlení vibrací (je výhodné měřit zrychlení vibrací, protože oproti rychlosti vibrací se zrychlení v závislosti na zatížení stroje nemění, v závislosti na otáčkách se ale mění). Rychlost vibrací odhalí poruchy typu mechanického (nevyváženost, nesouosost, ..), ve zrychlení vibrací se projeví vysoko-frekvenční problémy (opotřebení ložisek, ozubení, ..). (3, s. 30)

Vytvořený trend vibrací tvoří vanovou křivku. Jakmile se měřená hodnota oproti ustálenému stavu zvyšuje, znamená to závěrečnou fázi života stroje (a s tímto i výskyt poruch). Limitní (nebo varovné) hodnoty jsou zaznamenány v normách (například ČSN ISO 10 816) - díky těmto hodnotám se pak pro konkrétní stroj nastavují alarmující hodnoty upozorňující na zhoršující se technický stav stroje. Je důležité vědět, že normy mají pouze informační charakter, protože v sobě nezahrnují všechny podmínky ovlivňující výslednou veličinu. Měří a trendují se hodnoty veličin naměřené vždy za stejných podmínek (zatížení stroje, jeho otáčky a další). (3, s. 30)



Obr. 33: Vanová křivka (8, s. 36)



Obr. 34: Trendování vibrací (8, s. 37)

4.4.4 Stanovení alarmových hodnot

Naměřené hodnoty předchozí metody mohou být ovlivněny a zkresleny (například nečistotami v mazivu), proto je vhodné použít i jiné metody. V této metodě je důležitá alarmová úsečka (nebo hodnota, je zakreslena v grafu závislosti efektivní hodnoty zrychlení na otáčkách zařízení), která se definuje na základě řady měření a zkušeností. Jakmile je překročena, znamená to, že v dané části stroje (většinou ložisko) vznikají již první opotřebení. Úsečka (hodnota) má tedy za úkol na tento možný stav upozornit s co největším předstihem. Na tuto informaci pak navazují plány údržby. Metodu nelze využít při nízkých otáčkách (nižších než 500 až 600 ot/min), jelikož zde je rozdíl mezi dobrým ložiskem a ložiskem v nesprávném technickém stavu velmi nevýrazný. Tato metoda vyžaduje dobrou znalost konstrukce stroje, aby nebyla přiřazena naměřená hodnota zrychlení jiné části, než které odpovídá. (3, s. 33)

4.4.5 Stanovení aktuálních otáček ze spektra vibrací

Pro stanovení alarmových hodnot je důležitá znalost aktuálních otáček. U zařízení s proměnnou hodnotou otáček to ale není vždy snadné a často není možné změřit otáčky pomocí běžných zařízení (laserový snímač otáček, stroboskop, mechanické snímače a podobně). Proto se aktuální otáčky stanoví pomocí spektra rychlosti vibrací (rychlost vibrací se měří v efektivní hodnotě). Pro správnou interpretaci vyhodnocení frekvenčního spektra je třeba mít jisté zkušenosti a znát konstrukci daného strojního zařízení. (3, s.35)

4.4.6 Identifikace technického stavu při využití časového záznamu

Pomocí této metody lze identifikovat některé ze závad, které nelze odhalit v předchozích metodách (nebo jen velmi obtížně). Vadu lze pozorovat na grafu časového záznamu vibrací. Mezi vady takto odhalitelné patří například porucha přídírání rotoru (místní tření rotoru o stator), prasklý (nebo ulomený) zub u převodovky, poškození vnitřního kroužku ložiska. (3, s.36)

4.4.7 Metoda Kurtosis

Tato metoda je matematická. „Vyhodnocuje statistické rozdělení amplitud chvění se zřetelem na odchylku od normálního rozdělení, většinou ve frekvenčním rozsahu 2,5 - 80 kHz. Kurtosis faktor se většinou sleduje v pěti frekvenčních pásmech. Výsledné hodnocení je provedeno formou K-faktoru.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 38) (3) Předpokladem je generování pouze náhodného šumu nepoškozeným ložiskem s náhodným (Gaussovým) rozdělením. Při vzrůstajícím poškození také vzrůstá počet vyšších špiček. (3, s. 38)

4.4.8 Crest faktor

Jedna z metod pro identifikaci technického stavu ložisek. Výhodou je její jednoduchost a velmi brzká reakce na poškození ložiska (reaguje dříve než ostatní metody), nevýhodou je snižování číselné hodnoty s výrazněji rozvinutým poškozením. Hodnota je vyjádřena poměrem amplitudy a efektivní hodnoty. I zde je stanovena alarmující hodnota. (3, s. 39)

4.4.9 Další metody

Obálková:

Detekce poškození vytvářející opakující se, ale velmi malý signál, který by nebyl při běžném měření odhalen. (8, s. 40)

Technologie SEE:

Měří akustickou emisi generovanou kovem, včasná detekce poruch ložisek a převodů ozubených kol. Patří sem Numerická analýza SEE a Spektrální analýza SEE. (8, s. 40 - 41)

Vysokofrekvenční detekce:

„Dává číselnou hodnotu celkové úrovně vibrací generovaných ve vysokofrekvenčním pásmu malými vadami.“ (Helebrant, 2005, s. 41) (8)

Metod je velké množství, proto zde ani nejsou všechny vyjmenovány.

4.5 VIBRACE STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Vibrace jsou tedy mimo jiné i obrazem technického stavu strojního zařízení. Pro jejich měření a zkoumáním lze tento stav určit, odhalit konstrukční chybu, vzniklou nebo vznikající závadu a díky tomu naplánovat údržbu nebo odstavení zařízení.

4.6 ZÁKLADNÍ VELIČINY POUŽÍVANÉ VE VIBRODIAGNOSTICE

Měří se a později vyhodnocují výchylka, rychlost a zrychlení vibrací.

Výchylka:

Má nepříliš velké užití (například pro monitorování technického stavu turbín - snímání vibrač. signálu z bezdotykových sond, které pracují na principu vířivých proudů), [μm] (3, s. 10)

Rychlost:

Pro identifikaci poruch, které se projevují při nízkých a středně rychlých frekvencích (například v pásmu 10 - 1 000 Hz se často projevuje nevývaha, nesouost, uvolnění a další). (3, s. 10)

Zrychlení:

Pro identifikaci poruch, které se projevují při vysokých frekvencích (jednotky až desítky kHz, například počáteční závady ložisek, převodů, mazání a dalších), jednotkou často bývá $m \cdot s^{-2}$, g nebo G - odvozené od gravitačního zrychlení. (3, s. 10)

4.7 SNÍMAČE VIBRACÍ

Základní rozdělení

Seismická zařízení (připevňují se na konstrukci stroje, výstup: míra absolutních vibrací stroje) (3, s. 12)

Snímače relativní výchylky (měří relativní vibrační výchylku mezi rotujícími a nerotujícími díly) (3, s. 12)

4.7.1 Rozdělení dle měřené veličiny

Snímače výchylky: například pomocí bezdotykové sondy (princip vířivých proudů), dále se používají i jiná zařízení (akcelerometry, velometry) - zde se naměřená hodnota matematicky převádí na výchylku (integrace) (3, s. 12)

Snímače rychlosti: „na principu indukce napětí při změně magnetického pole“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 14) (3), snímače mají však velké rozměry, jsou drahé a horní kmitočet je omezen (do 2 - 3 kHz) (3, s. 14)

Snímače zrychlení - akcelerometry: výsledné zrychlení lze převést na výchylku a rychlost, vyhodnocují absolutní vibrace měřeného zařízení, mají poměrně nízkou cenu, jsou lehké, fungují na principu tzv. piezoelektrického jevu (piezoelektr. krystal), jeho frekv. rozsah závisí na seismické hmotnosti závaží působícího na krystal, zmenšení rychlosti vede k zúžení rozsahu a ke zvýšení citlivosti snímače, existují akcelerometry tlakové, smykové a ohybové (3, s. 14 - 15)

4.7.2 Akcelerometr a jeho důležité vlastnosti

Dynamický rozsah: maximální změřitelná amplituda, než se přístroj poškodí, uváděn v násobcích gravitačního zrychlení (3, s. 17)

Frekvenční odezva: „frekvenční rozsah, v němž výstupní hodnota signálu akcelerometru má dovolenou odchylku $\pm 5\%$ “ (Blata, Juraszek, 2013, str. 17) (3), je určena vlastnostmi snímače (hmotnost, piezoelektr. vlastnosti krystalu, rezonanční frekvence krytu) (3, s. 17)

Horní frekvenční limit: „frekvence, při níž výstupní signál překročí dovolenou odchylku“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 17) (3), vždy souvisí s mechanickou rezonancí snímače (3, s. 17)

Dolní prahová frekvence: „frekvence, při níž výstupní signál začíná klesat nebo jeho přesnost překračuje dovolenou mez. Není to zcela nulový signál, avšak citlivost velmi rychle s nižší frekvencí klesá.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 17) (3)

Rušení: generováno v obvodech zesilovače, je širokopásmové nebo spektrální, šum specifikován v násobcích gravitačního zrychlení (šum klesá s frekvencí, proto je rušení na nižších frekvencích větší problém než na vysokých) (3, s. 17)

Rezonanční frekvence: snímač při ní rezonuje a tím se zkreslí měření, měření se provádějí tedy pod hodnotou této frekvence (3, s. 17)

Citlivost: „je to výstupní napětí snímače při měření určité síly vyjádřené v g“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 17) (3), citlivost akcelerometrů většinou $10 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$ nebo $100 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$ (3, s. 17) Citlivost snímače lze také popsat jako „poměr výstupní veličiny ke stanovené vstupní veličině.“ (Helebrant, Ziegler, 2005, s. 156) (8)

Teplotní vliv (citlivost na teplotu): „je to výstupní napětí na stupeň Celsia měřené teploty. Snímače jsou teplotně kompenzovány s cílem udržení změn výstupního signálu v daných limitech v daném rozsahu teploty.“ (Blata, Juraszek, 2013, str. 17) (3)

Teplotní rozsah: snímač je schopen pracovat v určitém teplotním rozsahu bez hrozby jeho poškození, bývá -50 až 120°C (3, s. 18)

Hmotnost akcelerometru by měla být přibližně minimálně desetkrát menší než hmotnost měřeného objektu. (3, s. 18)

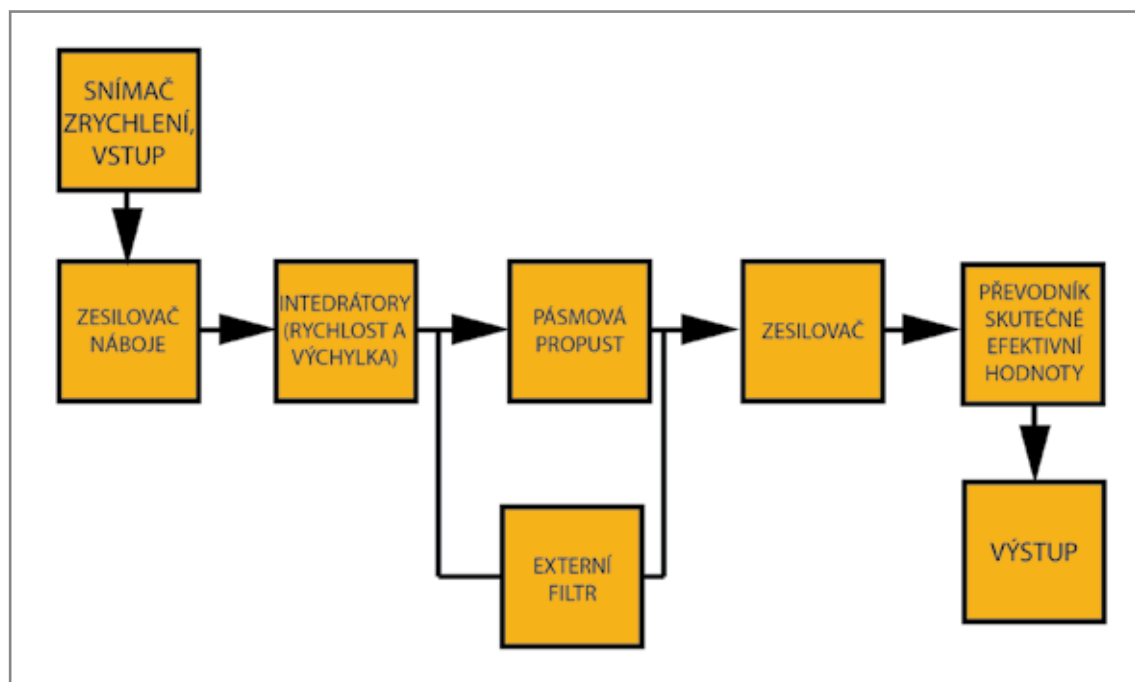
Další důležité údaje pro správný výběr akcelerometru: amplituda a frekvence měřených vibrací, rozsah teploty dané instalace a okolí, velikost a tvar měřeného signálu, úroveň elektrického a elektromagnetického rušení v oblasti měření, uzemnění měřeného povrchu a další. (3, s. 18)

4.7.3 Umisťování snímačů, provozní pokyny

Nesprávné použití snímače může vést ke zkreslení výsledků měření. Snímač by měl být co nejbližší měřenému místu. Dále by neměl být na místě přechodu materiálů. Pokud je měření opakované, mělo by se měřit vždy za stejných podmínek (otáčky, zatížení stroje a další). Plocha, na kterou se snímač umisťuje, by měla být čistá, nejlépe také bez silné vrstvy laku/barvy, aby mezi snímačem a vlastním materiálem nebyl další materiál (způsobuje tlumení kmitů). Je dobré umístit snímač a měření provést v každém bodě ve všech třech směrech (horizontální, vertikální, axiální). Metoda připevnění snímače má vliv na výkonnost snímače. (3, s. 19)

Při měření vlivu kmitající části na člověka (nebo jinou část stroje a podobně), je nutné snímač připevnit na místo, kde dochází ke kontaktu s tímto člověkem, a to i za stejných podmínek provozu (v tomto případě se tedy neodstraňují vrstvy tlumící kmity, ale zachovávají se provozní podmínky).

4.7.4 Blokové schéma měřicího řetězce



Obr. 35: Blokové schéma měřicího řetězce (1, s. 42)

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ VYBRANÝCH KONSTRUKČNÍCH CELKŮ VOZIDLA

5.1 1. SKUPINA EXPERIMENTŮ (MĚŘENÍ 1)

5.1.1 Cíl měření

Cílem měření je určit, které vibrace jsou normální nebo mezní, a které vibrace již symbolizují vadu na některé z částí vozidla, a to podle vibrací naměřených na volantu. Pro měření bylo použito zařízení měřící vibrace (jednosložkový měřič vibrací s jedním snímačem), který vlastní ÚSI VUT v Brně, díky čemuž bude mít ÚSI možnost v měření pokračovat za podobných podmínek. Snímač byl po celou dobu měření umístěn na volantu a celý záznam je zachycen také na videu (včetně komentářů ohledně rychlosti a stavu povrchu vozovky, viz příloha na CD).

5.1.2 Měřicí zařízení (měřič vibrací)

K měření byl použit měřič vibrací - model BVB - 8207SD, který vlastní ÚSI VUT v Brně. Přístroj disponuje čtyřmi kanály pro měření dat označených jako CH1, CH2, CH3 a CH4 (snímač má ve výbavě ovšem pouze jeden, proto byl použit pouze jeden kanál). Měřič je tedy dodáván s vibračním senzorem (VB-83) a magnetickým nástavcem sondy.

Technické parametry a další informace:

Frekvenční rozsah: 10 Hz - 1 kHz

Mikroprocesový obvod, vysoká přesnost

Napájení: pomocí 8 ks baterií UM3/AA (1,5 V) nebo adaptér DC 9V

Komunikační rozhraní: RS232/USB

Měřené veličiny a jednotky:

rychlost: mm/s, cm/s, inch/s

zrychlení: m/s², g, ft/s²

okamžitá výchylka (dislokace): mm, inch

Nabíjení: 8x baterie AA (1,5 V)

Funkce:

pro zrychlení a rychlost: měření efektivní hodnoty (RMS), špička (max výchylka, PEAK), hodnota MAX HOLD

pro dislokaci (výchylku): vzdálenost „peak-peak“ (špička-špička ..vzd. mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny), hodnota MAX HOLD

Další funkce:

MAX HOLD, vynulování, nastavení data, času, jednotek a dalších, zobrazení času, záznam dat, záznamník dat ukládající naměřená data na SD kartu (čas vzorkování lze nastavit od 1 do 3600 s), manuální záznam dat (vzorkování 0s), podsvícení LCD SD karta: nastavení času, doby odběru dat, správa automatického vypnutí, zap./vyp. pípnutí, nastavení desetinné čárky, formát paměťové karty, nastavení jednotek

Ukládání dat a výstup:

Karta ukládá data ve formátu *.XLS (datum, čas, číslo záznamu, hodnota - vše pro jednotlivé kanály). V MS EXcel lze z těchto hodnot zpracovat graf závislosti měřené hodnoty na čase (časové úseky).

Další informace včetně podrobného návodu na měření lze najít v uživatelské příručce.

5.1.3 Nastavení měřícího zařízení

Zařízení bylo nastaveno pro měření efektivní hodnoty zrychlení vibrací (ACC, RMS) v jednotkách $[m/s^2]$. Doba vzorkování 2 s (časový úsek, ze kterého se z průběhu okamžitého zrychlení integrací počítá RMS). Data byla uložena na SD kartu v souboru ve formátu *.XLS (MS Excel).



Obr. 36: Měřič vibrací BVB - 8207SD

5.1.4 Objekty měření (vozidla)

Škoda Fabia (pracovní název JK)

Počet ujetých km: 88 000

Model: Škoda Fabia 2

Výbava, karoserie: Fabia 2 Combi Ambiente, Combi

Motor: zdvihový objem 1,4 MPI 16V, benzin, 63 kW (86 PS), otáčky 5000/min,
132 Nm při ot. 3800/min., DOHC, EU-4

Rok výroby: 2010

Airbag: 2 přední, 2 boční

Místo výroby: Mladá Boleslav (Czech Republic)

Výrobce: Škoda Auto a. s.

Servisní práce: Na tomto vozidle nebyly provedeny žádné významné servisní práce. Vozidlo je vzhledem k počtu ujetých kilometrů a době provozu opotřebeno úměrně. V době měření bylo vozidlo bez vad a poruch.

Škoda Fabia (pracovní název OT)

Počet ujetých km: 13 300

Model: Škoda Fabia 2

Výbava, karoserie: Fabia 2 Combi Elegance, Combi

Motor: zdvihový objem 1,2 MPI, benzin, 63 kW, otáčky 4800/min

Rok výroby: 2013

Airbag: 2 přední, 2 boční

Místo výroby: Mladá Boleslav (Czech Republic)

Výrobce: Škoda Auto a. s.

Servisní práce: Na tomto vozidle nebyly provedeny žádné významné servisní práce. Vozidlo je poměrně nové, vzhledem k počtu ujetých kilometrů a době provozu opotřebeno úměrně. V době měření bylo vozidlo bez vad a poruch.

Škoda Octavia (pracovní název LZ)

Počet ujetých km: 185 500

Model: Škoda Octavia (Tour)

Výbava, karoserie: Elegance (SLX), Combi

Motor: 1.9 TDI 8V turbo, diesel, 66 kW (90 PS), otáčky 4000/3750/min,
210 Nm při ot. 1900/min, SOHC, EU2 (EU3*)

Rok výroby: 2004

Airbag: 2 přední

Místo výroby: Mladá Boleslav (Czech Republic)

Výrobce: Škoda Auto a. s.

Servisní práce:

06/2004 výměna třecích segmentů – zadní brzdy

12/2008 výměna podtlak. posilovače, výměna spodního víka motoru

05/2010 výměna ložiska před. kola a čepu řízení

01/2011 výměna brzdových čelistí a brzdových válečků

05/2012 výměna řemenů, kladek, čerpadla podtlakového a chladící kapaliny

06/2012 nová trubka výfuku a vlnovec

02/2013 nové brzdové kotouče a destičky
02/2013 brzdy (čelisti vč. držáků, bubny, válečky, lano ruční brzdy)
02/2014 zadní doraz tlumiče

Vozidlo je vzhledem k počtu ujetých kilometrů a době provozu opotřebeno úměrně.
V době měření bylo vozidlo bez vad a poruch.

5.1.5 Umístění snímače

Bylo využito magnetického nástavce snímače. Okolo volantu byla připevněna kovová objímka (utažená), na které byl snímač pomocí magnetu uchycen. Je dobré volit trasu se zatáčkami s větším poloměrem nebo bez zatáček, protože kabel vedoucí od snímače v přístroji není příliš dlouhý a snímač by se mohl při prudší zatáčce uvolnit. Také je nebezpečí, že se kabel obtočí kolem hřídele volantu. Umístění snímače je zachyceno na následující fotografii.



Obr. 37: Umístění snímače

5.1.6 Podmínky měření

Trasa měření je vyznačena na přiložené mapě. Měření proběhlo dne 17. 5. 2014. Provoz byl poměrně malý, jelikož byla sobota a měření proběhlo cca od 10 do 13 hodin. Počasí: zataženo, 10°C. Vozovka suchá.

Každé ze tří vozidel projelo trasou (na mapce). Z každé jízdy na trase je v příloze na CD vyhotoven videozáznam. Do tohoto záznamu bylo komentováno sepnutí snímače (začátek měření), stav vozovky (hrboly, plátování, příčné spáry), rychlost, otáčky a zařazený rychlostní stupeň. Každá jízda zahrnuje rychlosti 50 km/h, 70 km/h, 90 km/h a 130 km/h.



Obr. 38: Trasa měření

Pro simulaci vibrací, které jsou již prokazatelně neúnosné (jak vzhledem k řidiči, tak i jako stav vozidla), bylo měření také provedeno na cestě ve velmi špatném stavu (viz videozáznam) na místní komunikaci v Bosonohách u Brna.

5.2 2. SKUPINA EXPERIMENTŮ (MĚŘENÍ 2)

5.2.1 Cíl měření

Měření bylo provedeno za účelem zjištění velikosti vibrací na vybraných částech vozidla a jejich porovnání. Dále by mělo měření ukázat, která ze tří složek vibrací (podélná, příčná, svislá) je nejvýraznější a jak se velikost vibrací mění v závislosti na rychlosti vozidla. Měřeno bylo pět vozidel v různém stádiu. Dále by mělo být posouzeno, zda vybrané vozidlo vyhovuje z hlediska norem (vliv na zdraví člověka). Měření využívá měřicí zařízení s větším počtem tříoskových snímačů okamžitého zrychlení kmitání. Tato měření probíhala vždy na úseku, kdy na vozovce nebylo příčné drážkování, záplatování nebo jiné výrazné nerovnosti, vozidlo po dobu měření jelo konstantní rychlostí a samotné zaznamenávání dat probíhalo pouze do 10 s (jelikož tato doba je pro danou metodiku měření dostačující).

5.2.2 Měřicí zařízení

Jedná se o Kapacitní vibrometr s INAX 300/30 (citlivost) s příslušenstvím a dále program OSCILO ke zpracování naměřených výsledků. Tento přístroj byl mimo jiné vypůjčen i pro malou velikost snímačů a větší počet snímačů. Malá velikost umožňuje snímač připojit na volant, sedadlo i řadící páku tak, aby při řízení příliš neprekážely. Zároveň větší počet snímačů umožňuje tato tři místa měřit současně, takže je možné výsledky měření porovnávat při zachování stejných podmínek měření.

Výstupem je graf závislosti okamžité velikosti zrychlení kmitání na čase. Program OSCILO umožňuje z daného úseku zpracovat efektivní hodnoty zrychlení kmitání jednotlivých složek a frekvenční analýzu (spíše orientačně).

Kapacitní vibrometr INAX 300/30:

Kapacitní vibrometry INAX 300/30 jsou tříoskové snímače zrychlení kmitání (akcelerometry) tvořené jedním jednosložkovým (pro svislý směr) a jedním dvousložkovým (pro vodorovné směry) monolitickým akcelerometrem firmy Analog Devices s pevně připojeným zesilovačem (zároveň odstraňujícím offset primárního dynamického signálu) s vestavěným integrátorem.

Tyto vibrometry mají vyvedeny jednak zesílený a frekvenčně korigovaný výstup zrychlení (oranžový kabel), jednak frekvenčně korigovaný výstup rychlosti kmitání (šedý kabel - po hardwareové integraci zrychlení).

Technické parametry:

Použitelný frekvenční rozsah : 10 Hz až 300 Hz

Jmenovitá citlivost výstupu zrychlení : 300 mV/m/s²

Jmenovitá citlivost výstupu rychlosti kmitání : 30 mV/mm/s

Maximální amplitudový rozsah měření zrychlení ve vodorovných směrech : ± 17 m/s²

Maximální amplitudový rozsah měření zrychlení ve svislém směru : ± 7 m/s²

Naměřené špičkové hodnoty šumu na výstupu zrychlení : $\pm 0,1$ m/s²

Naměřené špičkové hodnoty šumu na výstupu rychlosti kmitání : $\pm 0,3$ mm/s

Napájení : 12 V, 10 mA

Přístroj je pravidelně kalibrován.

Princip měření dynamických účinků:

Spočívá v použití indukčních snímačů, kde pohybem cívky v magnetickém poli v závislosti na intenzitě vibrací dochází ke změně el. signálu, který je AD převodníkem

digitalizován a následně zpracován interně vytvořeným speciálním programem.

Sledovanou veličinou je zrychlení kmitání (složky rychlosti kmitání a_x , a_y , a_z [m/s^2]) a frekvence maximálních kmitů [Hz] jednotlivých složek zrychlení kmitání. Efektivní hodnota zrychlení kmitání a_{ef} je zjištěna numerickou integrací záznamu zrychlení kmitání $a = f(t)$ použitím vztahu:

$$a_{\text{ef}}^2 = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} a^2(t) \cdot dt$$

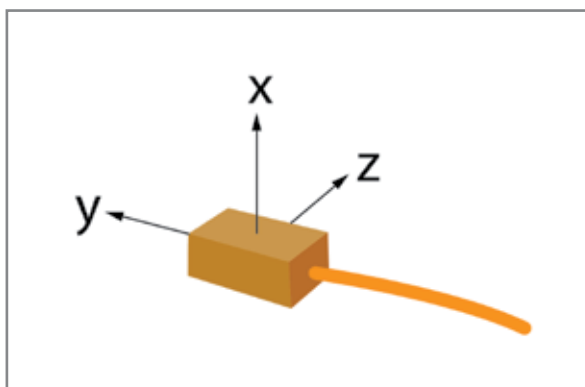
K měření zrychlení kmitání byl použit přenosný měřicí počítač osazený převodníkovou kartou National Instruments AT-MIO-64E-3 a ovládaný měřícím a zároveň vyhodnocovacím programem OSCILO a dále trojosé snímače, každý umístěný ve společném pouzdru a doplněný zesilovačem typu 300S. Uplatněn byl systém jednotlivých ručně ovládaných měření (režim „roll mode“).



Obr. 39: INAX 300/30

Všechny snímače mají tyto kanály:

1. kanál - svislá složka „x“
2. kanál - horizontální podélná složka (orientovaná směrem ke zdroji) „y“
3. kanál - horizontální příčná složka „z“



Obr. 40: Jednotlivé složky snímače

Měření je prakticky vždy prováděno s použitím zesilovače signálu, který je vložen mezi akcelerometr a měřicí počítač.

Použitá měřicí linka (akcelerometry se zesilovači signálu, měřicí počítač vybavený měřicí kartou, propojovací datová a napájecí kabeláž, napájení) byly zapůjčeny firmou INSET s.r.o., jejíž Technická zkušebna INSET CZ (laboratoř č. 1242, akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025) má mezi svými 21 akreditovanými činnostmi zařazeny i tyto zkušební postupy týkající se vibrací:

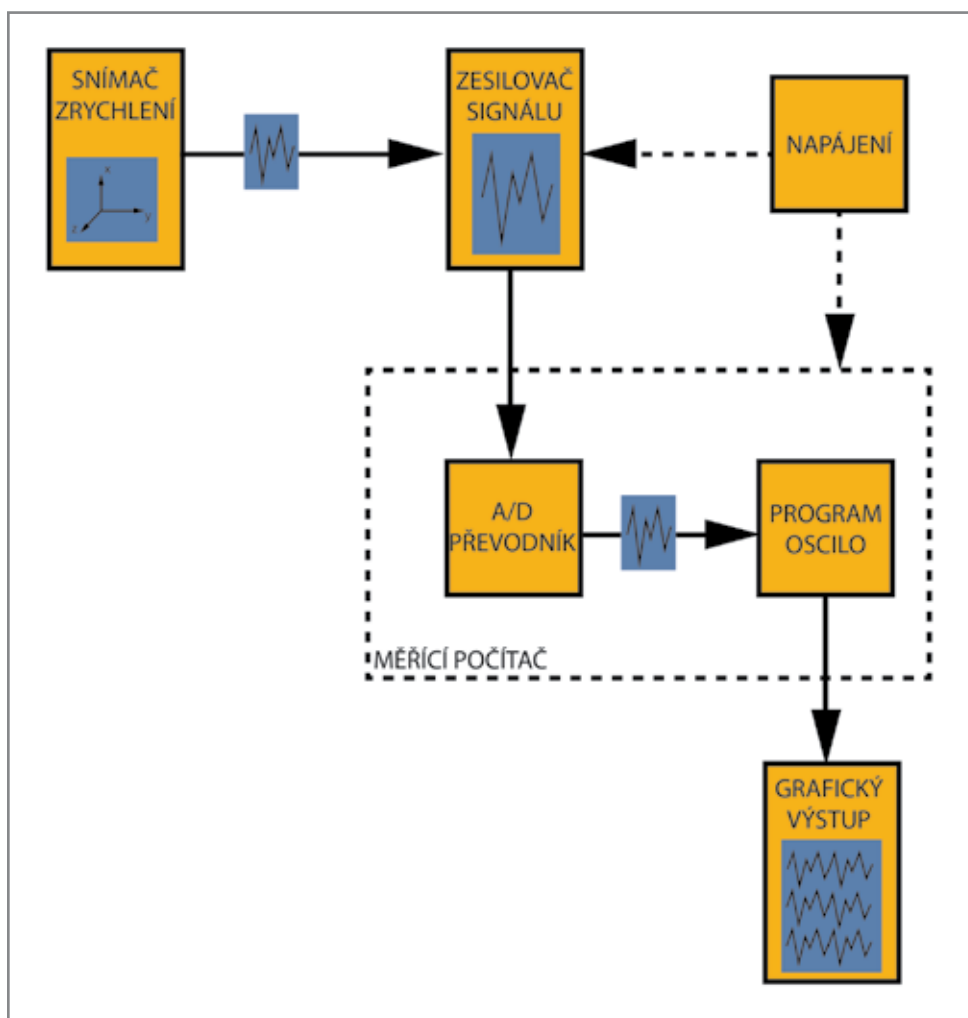
Měření technické seismicity a odezvy stavebních objektů

Měření vibrací působících na člověka

Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí a jejich částí

Experimentální ověřování dynamických účinků strojů, strojního zařízení a dynamických vlastností stavebních konstrukcí.

Zmíněná technická zkušebna zároveň zajišťuje metrologické zabezpečení (kalibrace, ověření) všech měřidel používaných ve firmě INSET s.r.o.



Obr. 41: Blokové schéma měřicího řetězce (měření 2)

5.2.3 Objekty měření (vozidla)

K měření byla použita totožná vozidla jako u měření 1 a navíc ještě tato vozidla:

Škoda Yeti (pracovní název B)

Počet ujetých km: 1 600

Model: Škoda Yeti

Výbava, karoserie: LHD, 4x2, MPV (5 doors)

Motor: 1.2 TSI 8V turbo, benzín, 77 kW (105 PS) otáčky 5000/min, 175 Nm při ot. 1500..3500/min, SOHC, EU5

Rok výroby: pravděpodobně 2014

Airbag: 2 přední, 2 boční, 1 hlavový, 1 kolenní

Místo výroby: Kvasiny (Czech Republic)

Výrobce: Škoda Auto a. s.

Vozidlo bylo vypůjčeno od prodejce automobilů. V době měření bylo vozidlo bez vad a poruch.

Škoda Yeti (pracovní název S)

Počet ujetých km: 43 000

Model: Škoda Yeti

Výbava, karoserie: LHD, 4x4, MPV (5 doors)

Motor: 2.0 CR-TDI 16V turbo, DPF, diesel 103 kW (140 PS), otáčky 4200/min, 320 Nm při ot. 1750..2500/min, DOHC, EU5

Rok výroby: 2011

Airbag: 2 přední, 2 boční, 1 hlavový, 1 kolenní

Místo výroby: Kvasiny (Czech Republic)

Výrobce: Škoda Auto a. s.

Vozidlo bylo vypůjčeno od prodejce automobilů. V době měření bylo vozidlo bez vad a poruch.

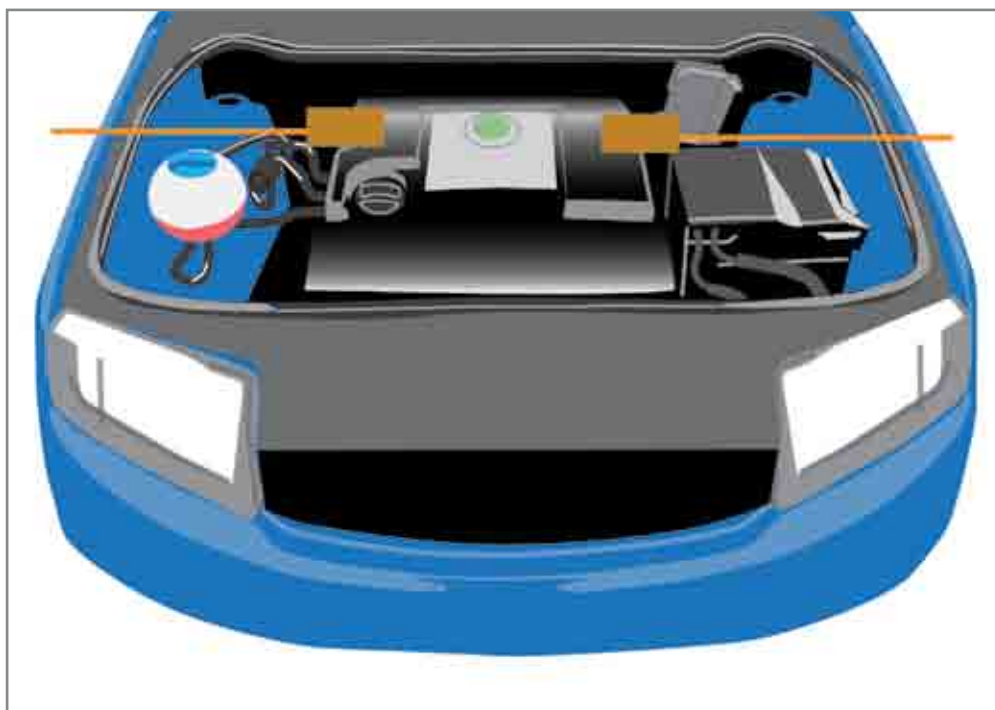
5.2.4 Umístění snímačů

Při jízdních režimech snímače byly umístěny na třech místech: volant, řadící páka a sedadlo (obr. 42). K volantu a řadící páce byly snímače uchyceny lepící páskou a aby byl zajištěn přitlak, byla umístěna mezi pásku a snímač pěnová hmota a pásky byla napnutá. Tímto byl zajištěn neustálý kontakt snímače a měřeného místa. Na sedadle snímač zajišťoval přímo řidič.

Při volnoběhu byly navíc měřeny i vibrace na motoru. Na motoru byl snímač přidržen ručně na příhodném místě (proto směry umístění snímače na motoru se u jednotlivých vozidel různí, znázorněny na obr. 43).



Obr. 42: Umístění snímačů v interiéru vozidla



Obr. 43: Směry umístění snímačů na motoru



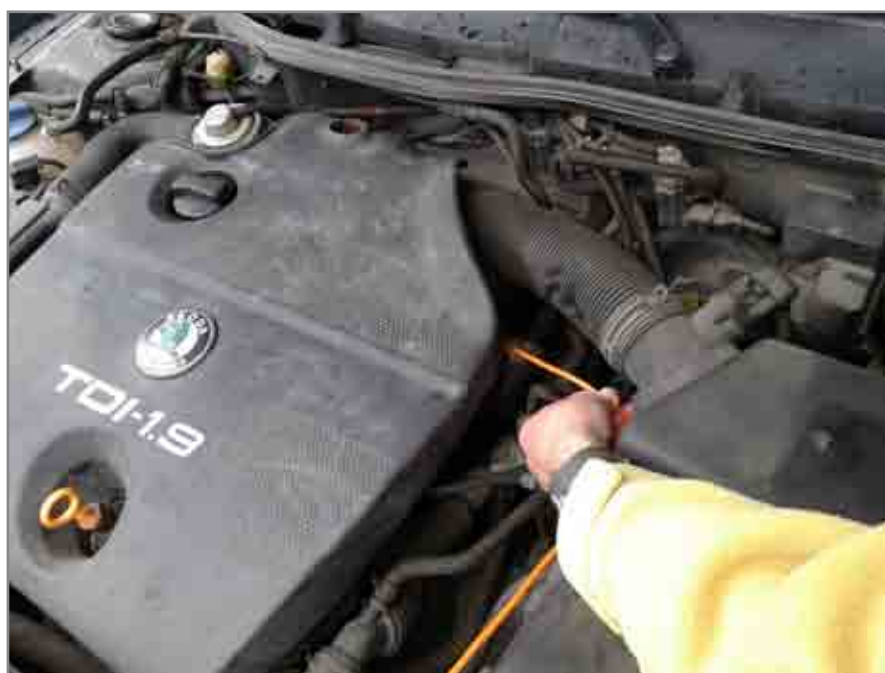
Obr. 44: Fotografie umístění snímačů v interiéru vozidla



Obr. 45: Umístění snímače na motoru (JK)



Obr. 46: Umístění snímače na motoru (OT)



Obr. 47: Umístění snímače na motoru (LZ)



Obr. 48: Umístění snímače na motoru (S)



Obr. 49 Umístění snímače na motoru (B)

5.2.5 Podmínky měření

Trasa měření 2 je totožná s trasou měření 1. Měření neproběhla všechna v jednom dni, proto jsou podrobnější údaje uvedeny k vozidlům jednotlivě:

Škoda Fabia (pracovní název JK):

50 km/h po ul Vídeňská 4. rychlost. stupeň, ostatní na D1 5. rychl.st

Měřeno 27. 3. 2014. Počasí: sucho, slunečno, 15°C. Vozovka suchá.

Škoda Fabia (pracovní název OT):

Vše bylo naměřeno na D1, 50 a 70 km/h na 4. rychl. st., 90 a 130 km/h 5. rychl. st.

Měřeno 10. 4. 2014. Počasí: proměnlivo, občasné dešťové přeháňky, 10°C. Mokrý vozovka.

Škoda Octavia (pracovní název OCT_LZ):

50 a 70 km/h na ul. Vídeňská na 4. rychl. st., 90, 120 a 130 km/h na D1 na 5. rychl. st.

Měřeno 10. 4. 2014. Počasí: proměnlivo, občasné dešťové přeháňky, 10°C. Mokrý vozovka.

Škoda Yeti (pracovní název Y_B):

50 a 70 km/h na ul. Vídeňská na 4. rychl. st., 90 km/h na D1 na 5. rychl.st., 130 a 135 km/h na D1 na 6. rychl. st. Měřeno 7. 5. 2014. Počasí: zataženo, sucho 16°C, suchá vozovka.

Škoda Yeti (pracovní název Y_S):

Vše na D1, 50 a 70 km/h na 4. rychl. st., 90 km/h na 5 rychl.st., 130 a 140 km/h na 6. rychl. st. rychl. st. Měřeno 7. 5. 2014. Počasí: zataženo, sucho 16°C, suchá vozovka.

Motory:

Škody Fabie a Octavia měřeny 10. 4. 2014. Počasí: proměnlivo, občasné dešťové přeháňky, 10°C.

Škody Yeti měřeny 7. 5. 2014. Počasí: zataženo, sucho 16°C, ke konci měření mírný déšť.

6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

6.1 1. SKUPINA EXPERIMENTŮ (MĚŘENÍ 1)

Jak již bylo zmíněno v 5. kapitole, tato měření probíhala na předem určené trase třemi vozidly. Byl použit přístroj pro měření vibrací BVB - 8207SD.

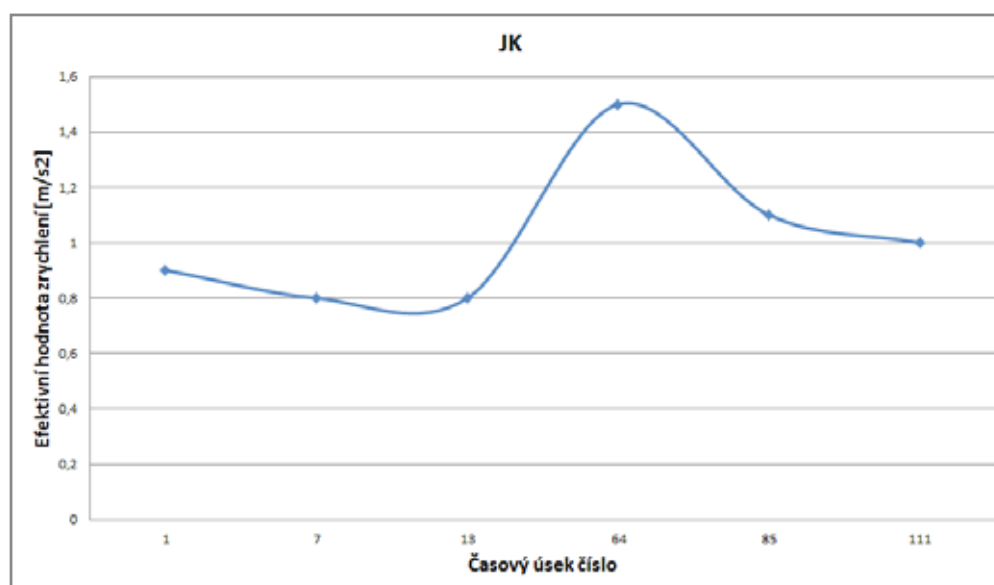
6.1.1 Efektivní hodnoty zrychlení při rychlostech ve vybraných časových okamžicích

Měřič vibrací byl nastaven tak, aby měřil efektivní hodnotu zrychlení. Jelikož je efektivní hodnota počítána vždy z určitého časového úseku, byla nastavena i délka tohoto časového úseku (na 2 s). Časové úseky jsou v tabulkách pojmenovány jejich pořadovým číslem (stejně tak jsou pojmenovány i v příloze 1 a v souboru na CD).

Vozidlo Škoda Fabia (JK)

Tabulka č. 3: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla JK

Rychlost [km/h]	Časový úsek číslo	Ef. hodnota zrychlení [m/s^2]
50	1	0,9
60	7	0,8
70	13	0,8
80	64	1,5
130	85	1,1
90	111	1



Obr. 50 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo JK

Ze záznamu byly vybrány okamžiky, kdy byla popsána velikost rychlosti vozidla. Tyto okamžiky jsou spolu s rychlostí a efektivní hodnotou zrychlení kmitů zaznamenány v tabulce č. 3, časový průběh naznačuje graf na obrázku č. 50.

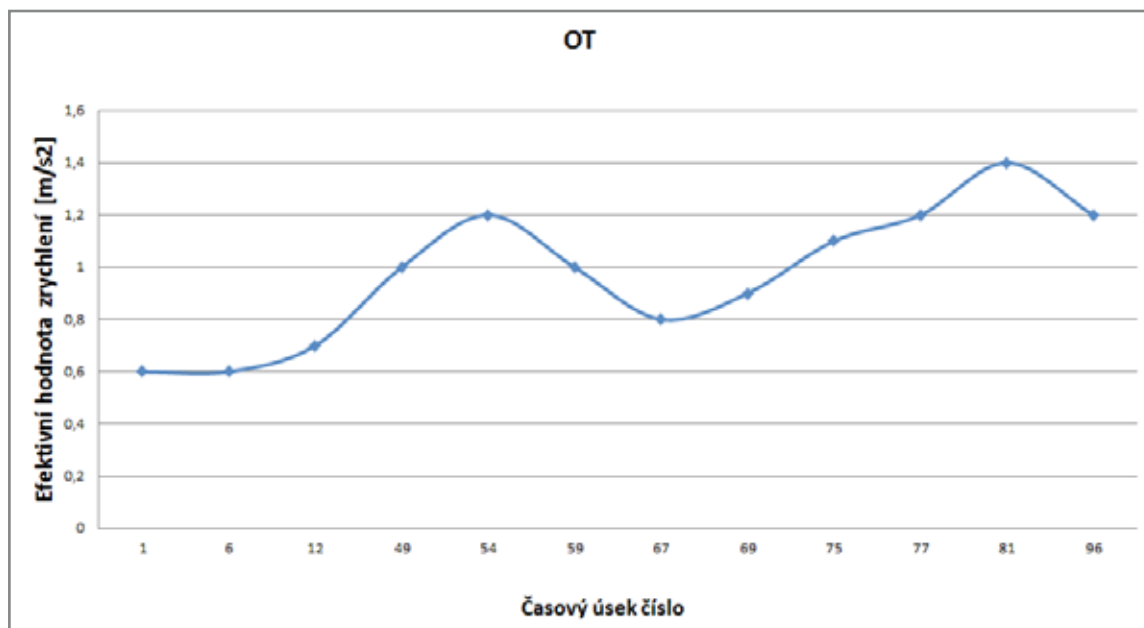
Nejvyšší efektivní hodnoty dosáhlo v rychlosti 80 km/h. Toto by mohlo být způsobeno faktem, že v daném okamžiku jelo vozidlo po vozovce s příčnými drážkami.

Výpis z průběhu měření je uveden v Příloze 1, celý záznam a naměřené hodnoty v příloze na CD.

Vozidlo Škoda Fabia (OT)

Tabulka č. 4: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla OT

Rychlost [km/h]	Časový úsek číslo	Ef. hodnota zrychlení [m/s ²]
50	1	0,6
60	6	0,6
70	12	0,7
80	49	1
100	54	1,2
90	59	1
80	67	0,8
90	69	0,9
110	75	1,1
120	77	1,2
130	81	1,4
120	96	1,2



Obr. 51 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo OT

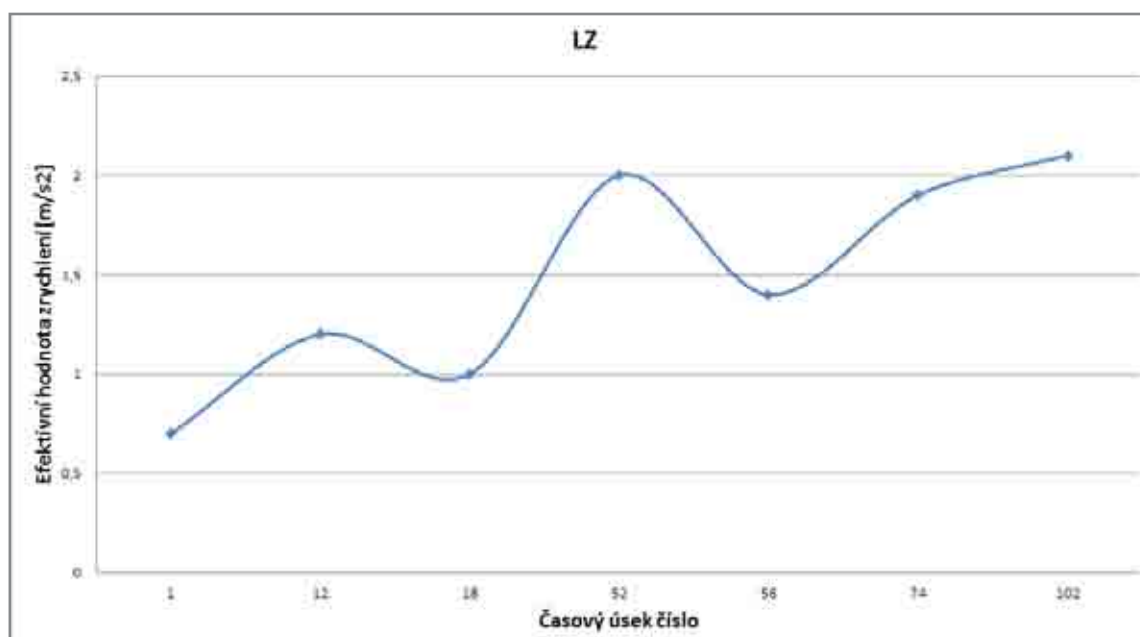
Tabulka č. 4 byla vytvořena stejným výběrem hodnot jako tab. č. 3. Zde je vidět, že efektivní hodnota zrychlení kmitání roste s rychlostí. Vyšší hodnota u rychlosti 90 km/h v časovém úseku č. 59 oproti časovému úseku č. 69 je dána pravděpodobně opět příčným drážkováním vozovky, kde se v daném okamžiku vozidlo nacházelo.

Výpis z průběhu měření je uveden v Příloze 1, celý záznam a naměřené hodnoty v příloze na CD.

Vozidlo Škoda Octavia (LZ)

Tabulka č. 5: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla LZ

Rychlost [km/h]	Časový úsek číslo	Ef. hodnota zrychlení [m/s ²]
50	1	0,7
60	12	1,2
70	18	1
80	52	2
90	56	1,4
130	74	1,9
100	102	2,1



Obr. 52 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo LZ

Podobným způsobem jako u předchozích byla zpracována i tato tabulka č. 5. Nejvyšší efektivní hodnoty zrychlení bylo dosaženo při rychlosti 100 km/h. Mohlo by to být způsobeno nevhodnými otáčkami (2000 ot/min).

Výpis z průběhu měření je uveden v Příloze 1, celý záznam a naměřené hodnoty v příloze na CD.

6.1.2 Efektivní hodnoty zrychlení v průběhu celého měřeného úseku

Následující graf zobrazuje časový průběh efektivních hodnot zrychlení měřených vozidel. Vybrané rychlosti jsou zaznamenány v tabulkách č. 3, 4, a 5.

Je třeba si uvědomit, že čas je měřen od spuštění měřicího zařízení a v určitém čase se každé vozidlo nacházelo na jiném místě a jelo jinou rychlostí. Tedy nelze porovnávat efektivní hodnoty různých vozidel ve stejném čase.

Graf má za cíl ukázat srovnání celkového průběhu efektivní hodnoty zrychlení pro různá vozidla, která projela stejnou trasou.

Na první pohled je zřejmé, že nejvyšší ef. hodnoty zrychlení, největší výkyvy těchto hodnot a také největší rozsah hodnot byly naměřeny na vozidle Škoda Octavia (LZ). Mohlo by to být způsobeno tím, že je z vozidel nejstarší a má najeto největší počet kilometrů.

Ze zbylých dvou vozidel byla nejnižší (0 m/s^2) i nejvyšší ($2,2 \text{ m/s}^2$) ef. hodnota zrychlení naměřena na vozidle Škoda Fabia (JK).

Ef. hodnoty vozidla Škoda Fabia (OT) se nachází v nejmenším rozmezí (přibližně $0,2 - 4,8 \text{ m/s}^2$), toto vozidlo má nejmenší výkyvy hodnot, což je asi způsobeno nejmenším stářím vozidla a nejnižším počtem ujetých kilometrů.

Vozidlo Škoda Fabia (JK)

První vyšší hodnota ($1,1 \text{ m/s}^2$) váže k úseku (č. 25), kde došlo k odbočování z ulice Vídeňské na odbočku na dálnici.

Propad hodnot až na 0 m/s^2 v časovém úsecích č. 49 a 50 se týká okamžiku stání, kdy se vozidlo chystalo připojit na dálnici.

Příčné drážkování vozovky pravděpodobně způsobilo růst efektivních hodnot (od čas. úseku č. 64, hodnoty až $2,2 \text{ m/s}^2$). Nejvyšší hodnota (čas. úsek 74, hodnota $2,2 \text{ m/s}^2$) by mohla být způsobena větším předělem na povrchu vozovky, kterým je ukončena oblast drážkování.

Hodnoty jsou mírně zvýšeny asi také díky hrbolům (od čas. úseku č. 83) a zaplátování vozovky (od čas. úseku č. 105).

Vozidlo Škoda Fabia (OT)

Opět je první vyšší hodnota zaznamenána v časovém úseku č. 25 ($1,2 \text{ m/s}^2$). Přibližně zde došlo k odbočení z ulice Vídeňské na odbočku na dálnici.

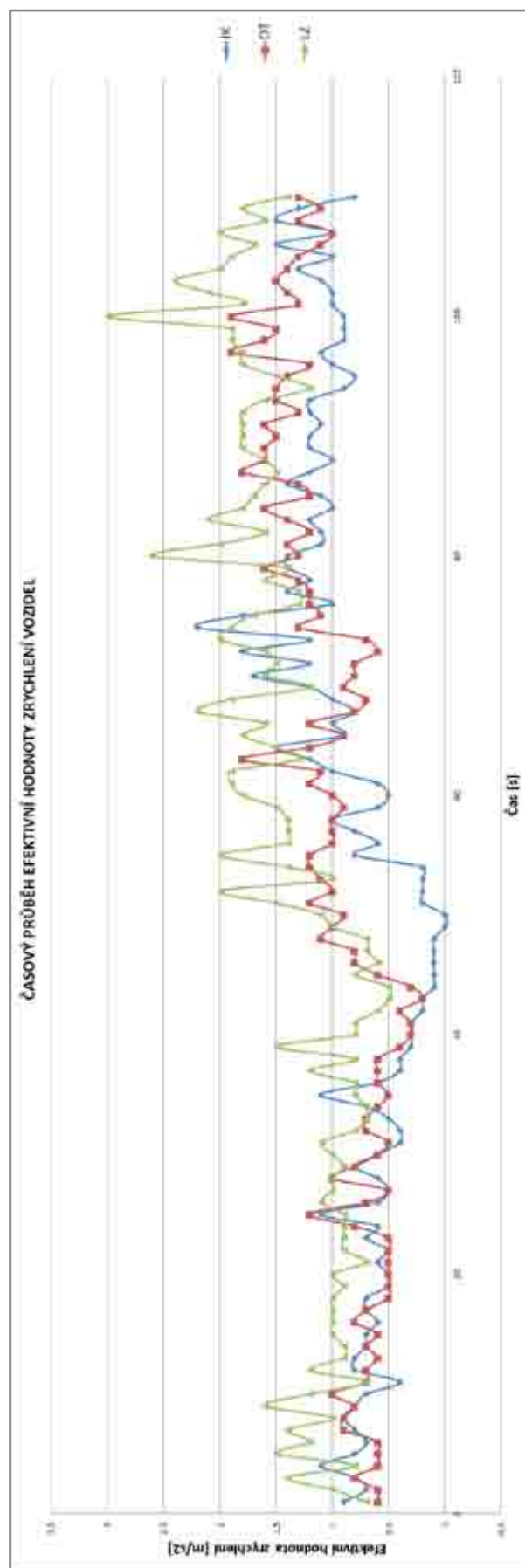
Nejnižší hodnota byla naměřena v časovém úseku č. 43 ($0,2 \text{ m/s}^2$). V tomto úseku vozidlo stálo a vjíždělo přímo na dálnici.

Jedna z nejvyšších hodnot se váže k čas. úseku č. 63 ($1,8 \text{ m/s}^2$). V tomto úseku vozidlo jelo po vozovce s příčnými drážkami, proto i předchozí hodnoty jsou zvýšené. Na konci úseku s drážkami (čas č. 63) je příčný předěl ve vozovce, který způsobil hodnotu ještě vyšší (stopáž na videozáznamu přibližně 02:14).

Další vysoké hodnoty se objevují v časových úsecích č. 87 ($1,8 \text{ m/s}^2$), 97 ($1,9 \text{ m/s}^2$) a 100 ($1,9 \text{ m/s}^2$). Všechny tyto úseky vozidlo zpomaluje, takže vyšší hodnoty by mohly způsobit nevhodné otáčky a zařazený rychlostní stupeň. Navíc se od čas. úseku č. 96 na vozovce objevují další výrazné nerovnosti, které efektivní hodnotu zrychlení rovněž zvyšují.

Vozidlo Škoda Octavia (LZ)

Vozidlo má vyšší hodnoty než ostatní vozidla. Jak již bylo řečeno, může to být způsobeno stářím vozidla a počtem ujetých kilometrů.



Obr. 53 Časový průběh efektivních hodnot všech vozidel

První výkyv se nachází opět v okamžiku odbočování z ulice Vídeňské na odbočku na dálnici.

Nejnižší hodnota byla naměřena v čas. úseku č. 43 a 44 (obe $0,5 \text{ m/s}^2$). V tuto dobu vozidlo stálo a připravovalo se k připojení na dálnici, efektivní hodnota je tedy asi způsobena chodem vozidla při volnoběhu a mírně také chvěním vozovky způsobené projíždějícími vozidly.

První z nejvyšších hodnot se objevují v čas. úsecích č. 52 a 55 (2 m/s^2). Pravděpodobně jsou způsobeny příliš vysokými otáčkami.

V čas. úseku č. 61 je další vysoká hodnota. Zde začala být vozovka příčně drážkovaná, drážkování končí výrazným příčným předělem, kde je hodnota opět vyšší (čas. úsek č. 65, $1,8 \text{ m/s}^2$).

V čas. úseku č. 73 vozidlo zrychlilo na rychlost 130 km/h , což pravděpodobně způsobilo zvýšení ef. hodnoty na 2 m/s^2 .

Dále vozidlo zpomaluje na 100 km/h , kdy byl zařazen stále 5. rychlostní stupeň. Možnou nevhodnost zařazení tohoto stupně a vyšší rychlost vozidla dokazují zvýšené efektivní hodnoty zrychlení kmitání, které mají od tohoto okamžiku velký výskyt. Další dlouhodobé zvýšení hodnot může být výsledkem zaplátování vozovky od čas. úseku č. 96 (videozáznam cca 03:37), hodnoty dosahují až 3 m/s^2 (čas. úsek č. 100).

6.1.3 Závěr měření 1

Nárůst ef. hodn. zrychlení kmitání je pravděpodobně zapříčiněn zejména vyšší rychlostí a nerovnostmi povrchu. Dalším důvodem by mohly být nevhodné otáčky a převodový stupeň.

Nejnižší hodnoty byly u všech vozidel zaznamenány v okamžiku stání (před připojením na dálnici), což je docela pochopitelné. Na měřené hodnoty neměl vliv povrch vozovky, který je velmi výrazný.

Nejnižší hodnoty během jízdy byly naměřeny na povrchu vozovky bez větších nerovností, při nižších rychlostech. Také by mohly ukazovat stav, kdy jsou otáčky a rychlostní stupeň vhodně zvolené.

Výše efektivní hodnoty zrychlení kmitání by mohla být rovněž ovlivněna stářím vozidla a počtem ujetých kilometrů, případně by tím mohl být ovlivněn také rozsah jejích hodn. Nejvyšších hodnot totiž dosahuje nejstarší Škoda Octavia (LZ). Nejmenší rozsah hodnot má nejmladší měřené vozidlo - Škoda Fabia (OT).

Veškeré podklady jsou v příloze na CD.

6.2 2. SKUPINA EXPERIMENTŮ (MĚŘENÍ 2)

Jak již bylo zmíněno, měření bylo provedeno současně na třech místech interiéru vozidla při různých jízdních režimech a na motoru při volnoběhu. Použité trojosé snímače umožňují zajímavější náhled na výsledky než při měření vibrací celkových (vektorový součet složek).

6.2.1 Způsob zpracování dat

Byly provedeny desetisekundové záznamy jednotlivých rychlostí. Z těchto záznamů bylo vybráno pět výřezů o délce 1 s , kde byl průběh okamžitého zrychlení

kmitání rovnoměrný. Bylo získáno pro každý režim pět efektivních hodnot, které byly zprůměrovány a dále zpracovány do grafů.

Měření poukazuje na poměr jednotlivých složek zrychlení kmitání a jeho efektivní hodnoty při různých jízdních režimech, podklady jsou v příloze na CD.

6.2.2 Složky zrychlení/efektivní hodnoty zrychlení kmitání:

Je dobré umisťovat snímač na místo měření tak, aby byl pevně připevněn a nejlépe byl v kontaktu s tímto místem po celé své dosedací ploše. I tak byla snaha umisťovat snímače pokud možno stejným směrem. Výjimku tvoří řadící páka.

Složky snímače tedy neodpovídají směřům vozidla. Při popisu výsledků měření budou tyto pojmy tedy rozlišovány, aby nedošlo k záměně (složky snímače jsou označeny písmeny x, y a z, směry na vozidle jsou pojmenovány slovně podélný - ve směru jízdy, příčný - kolmý na směr jízdy a svislý - kolmý k vozovce).

Platí tedy:

Motor: podélný směr - složka z, příčný směr - složka y, svislý směr - složka x

Volant: podélný směr - složka z, příčný směr - složka y, svislý směr - složka x

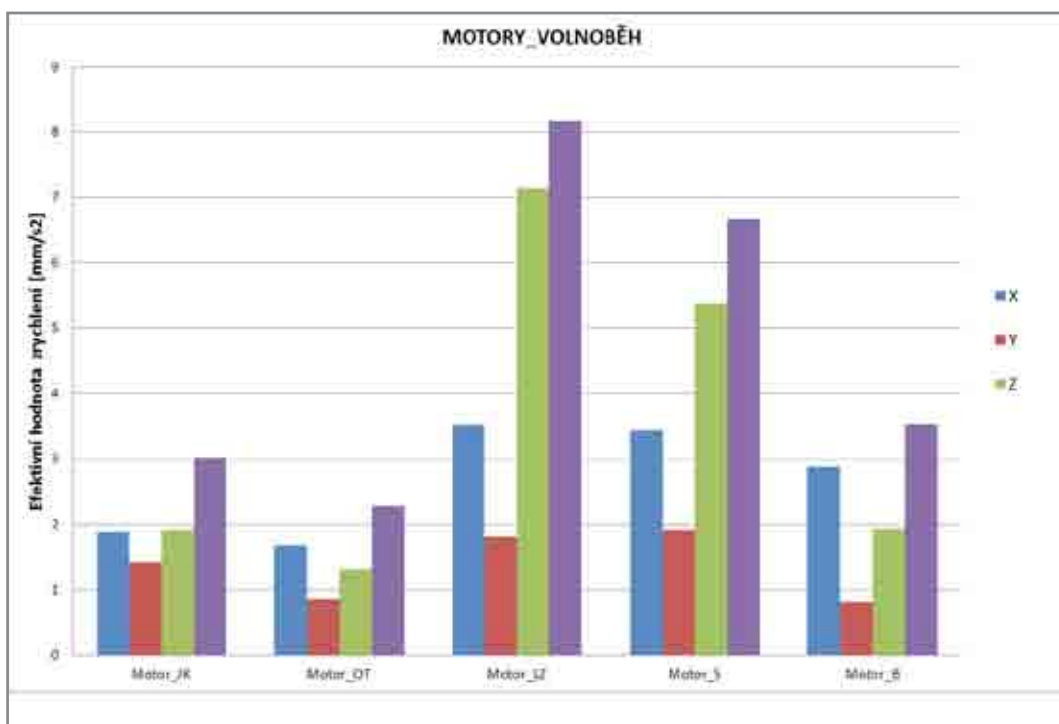
Řadící páka: podélný směr - složka y, příčný směr - složka z, svislý směr - složka x

Sedadlo: podélný směr - složka z, příčný směr - složka y, svislý směr - složka x

6.2.3 Motory při volnoběhu

Celkové vibrace ukazuje fialový sloupec na následujícím grafu (obr. 54).

Největší celkové vibrace byly naměřeny na vozidle Škoda Octavia (LZ) a Škoda Yeti (S). Oproti ostatním vozidlům mají výrazně největší složku z (tedy kmitají v podélném směru). Tato složka se výrazným způsobem podílí na velikosti celkových vibrací. Ostatní složky jsou v porovnání s ostatními vozidly přibližně dvojnásobně větší.



Obr. 54 Výše efektivních hodnot zrychlení kmitání všech vozidel na motoru

U ostatních vozidel je viditelně nejmenší složka mapující příčné kmitání motoru, ostatní složky jsou srovnatelné (JK) nebo je svislá složka větší.

Na obr. 55 lze vidět náhled okna v programu OSCILO. Jedná se zde o časový průběh okamžitého zrychlení kmitání pro složky x, y, z a prostorovou (průměrná největší okno) naměřené u vozidla Škoda Octavia při volnoběhu, díky čemuž je průběh docela pravidelný.

V vpravených oknech na obr. 55 jsou zpracována frekvenční spektra. Nejčastější frekvence je cca 30,3 Hz a násobky, které vypovídají o aktuálních otáčkách (přibližně 90 ot/min).

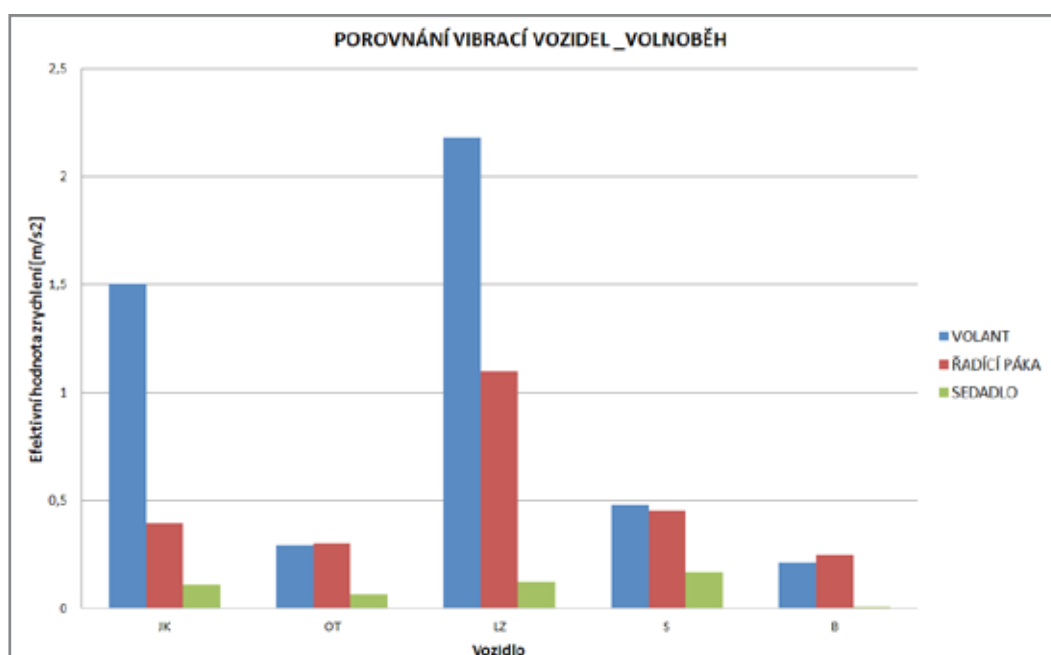
Levá okna na obr. 55 ukazují část úseku s nejvyššími naměřenými hodnotami zrychlení kmitání. V pravém horním rohu prostředního okna je uvedena efektivní hodnota zrychlení kmitání. Zcela vlevo jsou další informace (největší amplituda zrychlení, rychlosti a výchylky kmitání, frekvence a další).

Všechny grafy z programu OSCILO jsou ke shlédnutí v příloze práce na CD. Jedná se o časové průběhy zrychlení kmitání na všech měřených místech při různých rychlostních režimech. Jsou to výřezy o délce 1 s, díky čemuž je graf čitelnější. Nejpravidelnější záznamy byly naměřeny při volnoběhu - u některých lze z frekvence odhadnout aktuální otáčky motoru. Soubory jsou pojmenovány podle rychlosti vozidla (číslo) nebo VB (volnoběh).

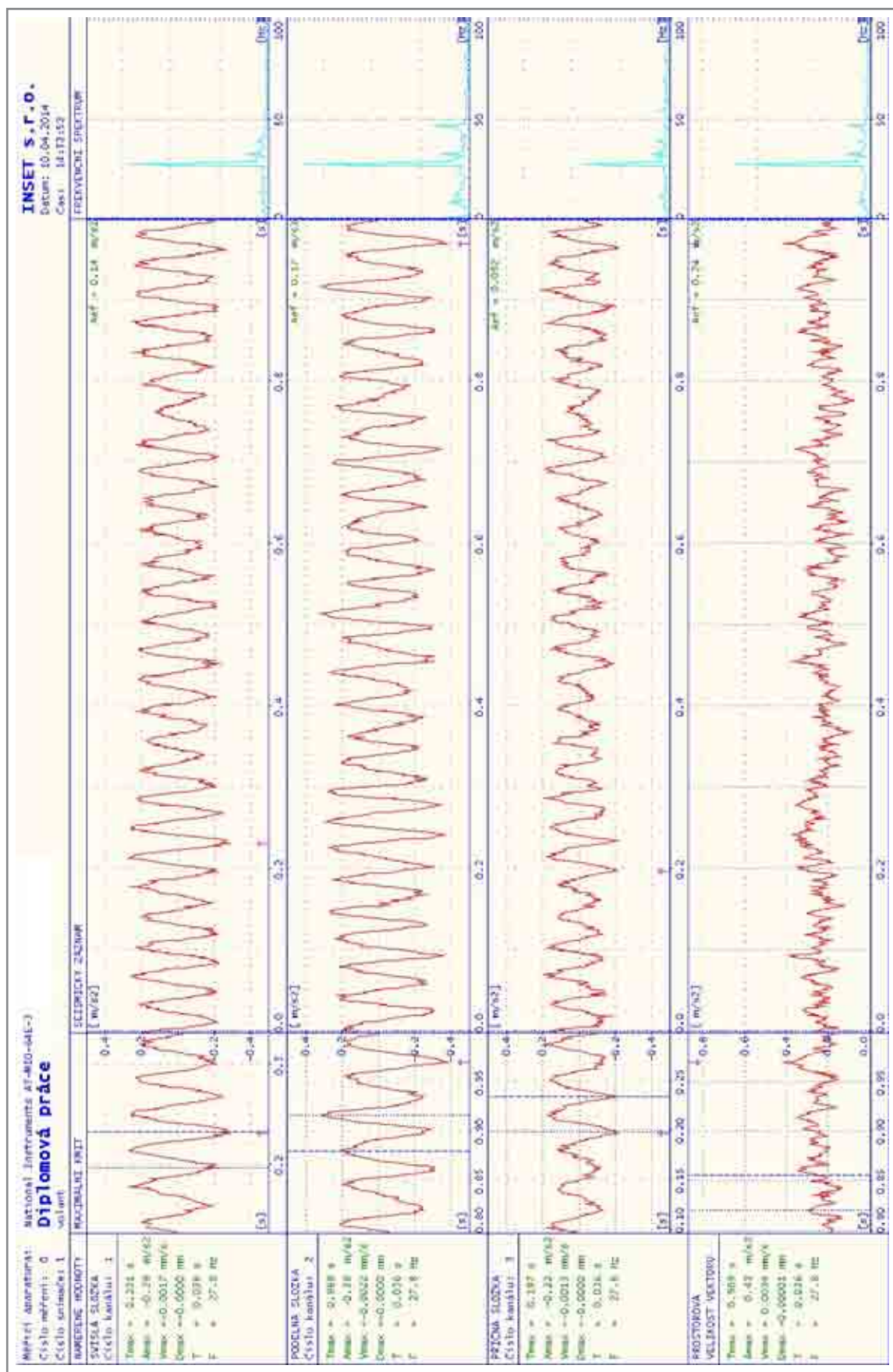
6.2.4 Části vozidel v interiéru při volnoběhu

Graf (obr. 56) zobrazuje prostorové složky vibrací (tedy celkové vibrace) na volantu, řadicí páce a sedadle vozidel. Další grafy v Příloze 2.

Největší kmity na volantu byly naměřeny u vozidel Škoda Fabia (JK) a Škoda Octavia (LZ), což se i vzhledem k ujetému počtu kilometrů a stáří vozidel dalo předpokládat. Vibrace na volantu jsou zde oproti ostatním místům výrazně největší. U nejmladších vozidel (Škoda Fabia (OT) a Škoda Yeti (B)) jsou vibrace na volantu nejmenší, přibližně jejich dvojnásobku dosahují vibrace vozidla Škoda Yeti (S).



Obr. 56 Výše efektivních hodnot zrychlení kmitání všech vozidel v interiéru vozidla



Obr. 57 Časový průběh zrychlení kmitání na volantu vozidla OT při volnoběhu

Vibrace řadící páky jsou krom Škody Octavie (LZ) srovnatelné (všechny jsou menší než $0,5 \text{ m/s}^2$). Řadící páka Škody Octavie má kmity více než dvojnásobné oproti ostatním vozidlům.

Sedadlo je pro komfort člověka při řízení velmi důležité, protože vibrace přenáší na celé tělo od hlavy až po dolní končetiny. Z grafu je jasně viditelné, že u všech vozidel má sedadlo několikanásobně nižší vibrace než na ostatních částech. Velice nízké hodnoty byly naměřeny na sedadle Škody Yeti (B).

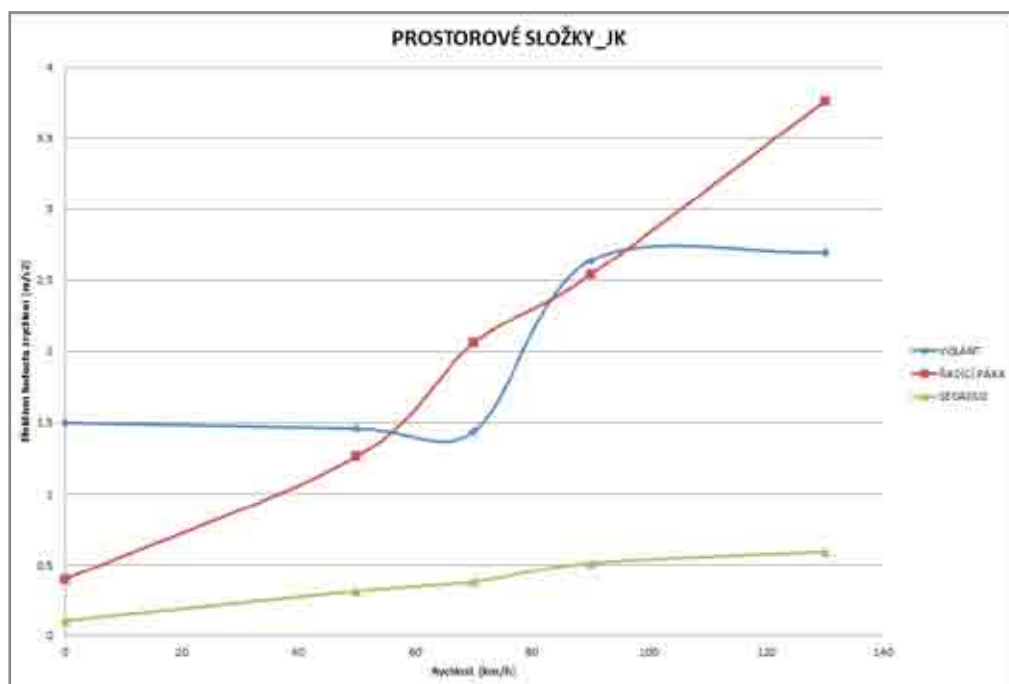
Ob. 57 se týká vozidla OT. Je na něm zaznamenaný časový průběh zrychlení kmitání na volantu. Nejvýraznější je frekvence přibližně $27,8 \text{ Hz}$, která by mohla ukazovat na aktuální otáčky 834 ot/min .

Ostatní grafy (zrychlení vibrací - čas) vozidel při volnoběhu jsou v příloze na CD.

6.2.5 Jednotlivá vozidla při jízdních režimech

Vzhledem k velkému množství grafů závislostí vibrací na rychlosti a grafů vyexportovaných z programu OSCILO jsou zde pouze některé. Všechny jsou ke shlédnutí v příloze na CD, grafy závislosti jednotlivých složek ef. hodnoty zrychlení na rychlosti vozidla jsou i v Příloze 2.

Škoda Fabia (JK)



Obr. 58 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla JK

Celkové vibrace jsou pro všechny režimy nejmenší na sedadle vozidla.

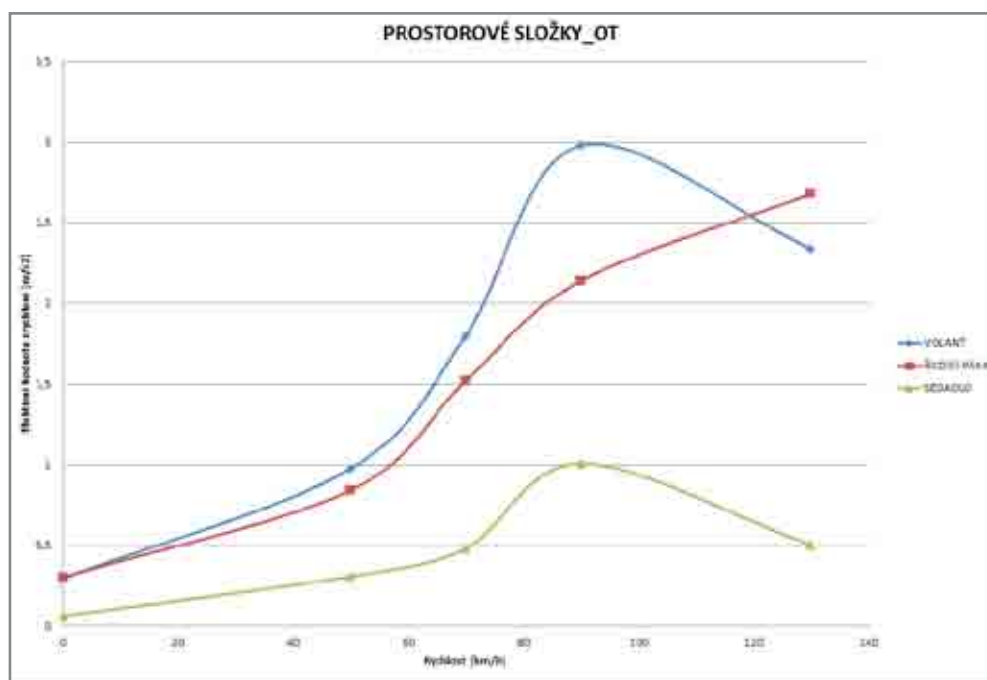
Na grafu celkových vibrací (obr. 58) lze pozorovat víceméně pozvolný růst vibrací řadící páky a skokový růst vibrací volantu při rychlosti 90 km/h .

Volant: Graf (příloha 2) vypovídá o zmíněném skokovém růstu vibrací na volantu. Tvoří jej složka z (podélná), která při rychlosti 50 km/h a 70 km/h klesá a poté při rychlosti 90 km/h zaznamenala velký růst. Největší hodnoty má podélná složka vibrací.

Řadící páka: Jak je vidět z grafu (příloha 2), složky x (svislá) a z (příčná) plynule rostou s přibývajícím rychlostí, složka y (podélná) má výkyv (pokles) v rychlosti 70 km/h, jinak je její růst také rovnoměrný. Největší vibrace jsou v příčném směru, nejmenší ve svislém. Sedadlo (příloha 2): Složky sedadla mají podobný průběh jako u řadící páky, pouze zmíněný pokles se týká příčné složky.

Při rychlosti 70 km/h je u všech snímačů patrný jakýsi zlom (pokles podélné složky volantu a příčné složky sedadla, růst u podélné složky řadící páky).

Škoda Fabia (OT)



Obr. 59 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla OT

Celkové vibrace jednotlivých částí jsou největší při rychlosti 90 km/h u volantu a sedadla a při rychlosti 130 km/h na řadící páce.

Volant (příloha 2): Největší vibrace jsou zaznamenány u všech složek při rychlosti 90 km/h. Největší vibrace jsou v podélném směru (krom volnoběhu).

Řadící páka (příloha 2): Největší vibrace zaznamenány v příčném směru (u volnoběhu v podélném směru), nejmenší ve svislém směru. S rostoucí rychlostí roste i velikost vibrací, nejstrměji roste od rychlosti 50 km/h do rychlosti 90 km/h v příčném směru, u ostatních je růst pozvolnější.

Sedadlo (příloha 2): Největší vibrace opět většinou v podélném směru, při rychlosti 90 km/h velký nárůst, rychlost 130 km/h je srovnatelná s rychlostí 70 km/h.

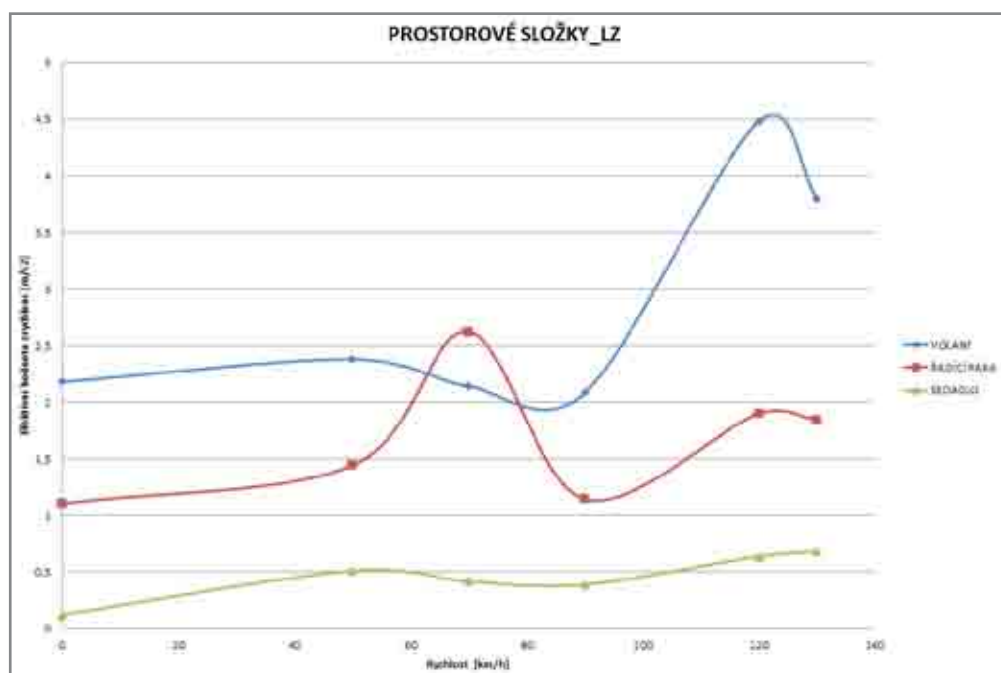
Škoda Octavia (LZ)

Celkové vibrace jsou nejmenší opět na sedadle. Největší vibrace vykazuje volant - kromě rychlosti 70 km/h, kde jsou větší vibrace řadící páky.

Volant: Graf celkových vibrací ukazuje na volantu velký nárůst při rychlosti 120 km/h, což je způsobeno velkým nárůstem vibrací v podélném směru. Vibrace v podélném směru jsou u všech jízdních režimů největší, v ostatních směrech jsou vibrace velmi podobné (příloha 2).

Řadící páka: Největší celkové vibrace na řadící páce při rychlosti 70 km/h jsou způsobeny výrazným kmitáním podélným směrem. Vibrace v příčném a svislém směru mají

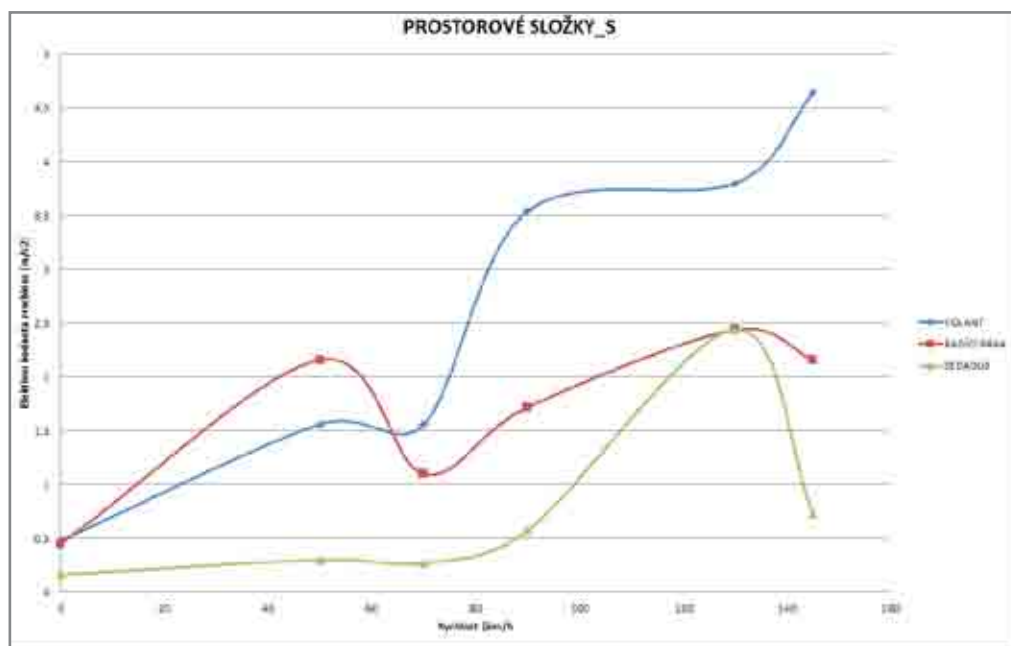
velmi podobný průběh - vibrace v příčném směru jsou však větší (příloha 2).
 Při rychlosti 130 km/h mají vibrace všech složek téměř stejnou velikost.
 Sedadlo: Jednotlivé složky mají velmi podobný průběh, svislá složka je při volnoběhu nejmenší, v ostatních jízdních režimech největší (příloha 2).



Obr. 60 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla LZ

Škoda Yeti (S)

Celkové vibrace u všech složek při rychlosti 70 km/h jsou (krom volnoběhu) nejmenší, poté rostou a při rychlosti 145 km/h jsou na volantu a sedadle zaznamenány největší kmity, na řadící páce jsou největší kmity při rychlosti 130 km/h.



Obr. 61 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla S

Volant: Svislý a příčný směr kmitání mají velice podobný průběh a blízké hodnoty, při rychlosti 70 km/h je u obou zaznamenán pokles. Tento pokles se týká i podélné složky, která má ovšem od rychlosti 90 km/h výrazně vyšší hodnoty, což se promítá na průběhu celkových vibrací volantu. největší hodnoty má vždy podélná složka (příloha 2).
 Řadící páka: Nejvýraznější jsou vibrace v příčném směru. Při rychlosti 50 km/h jsou v příčném směru vibrace největší. Při rychlosti 70 km/h všechny složky vykazují nejmenší vibrace. Při rychlosti 130 km/h jsou hodnoty vibrací jednotlivých složek téměř stejné (příloha 2).

Sedadlo: Všechny složky mají velice podobný průběh (příloha 2). Vibrace mají při rychlostech 50, 70 a 90 km/h velice podobné hodnoty, při rychlosti 145 km/h jsou mírně větší. Velký nárůst všech hodnot znamená rychlost 130 km/h. Také je zajímavé, že kromě rychlostí 90 a 145 km/h jsou hodnoty všech složek téměř stejné.

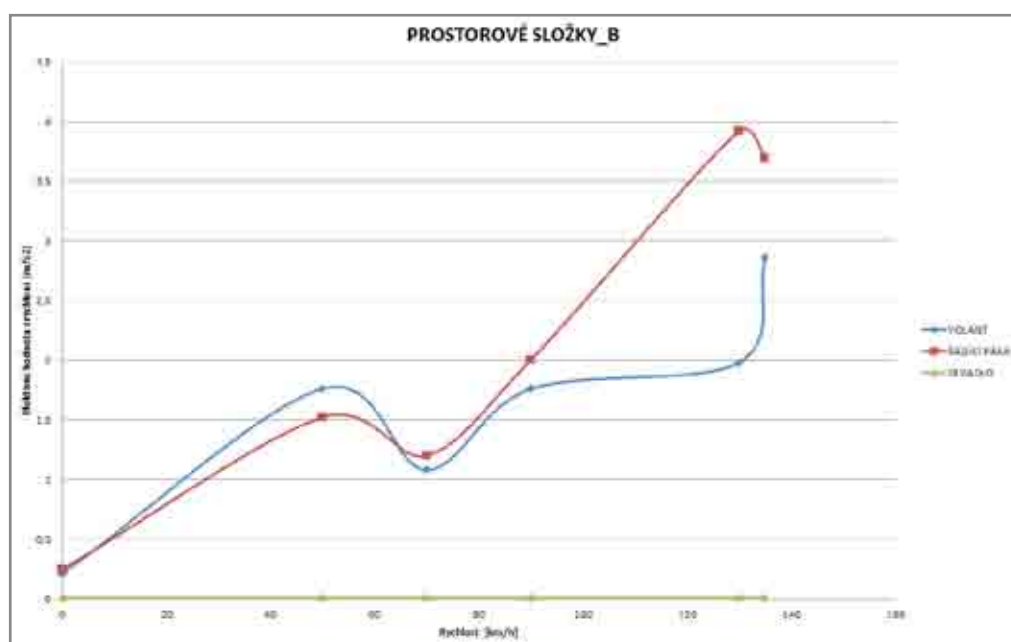
Škoda Yeti (B)

Celkové vibrace jsou výrazně malé na sedadle - v porovnání s ostatními jsou téměř nulové. Vibrace volantu a řadící páky rostou spolu s rychlostí (na řadící páce poměrně strmě), pouze rychlost 70 km/h znamená pokles.

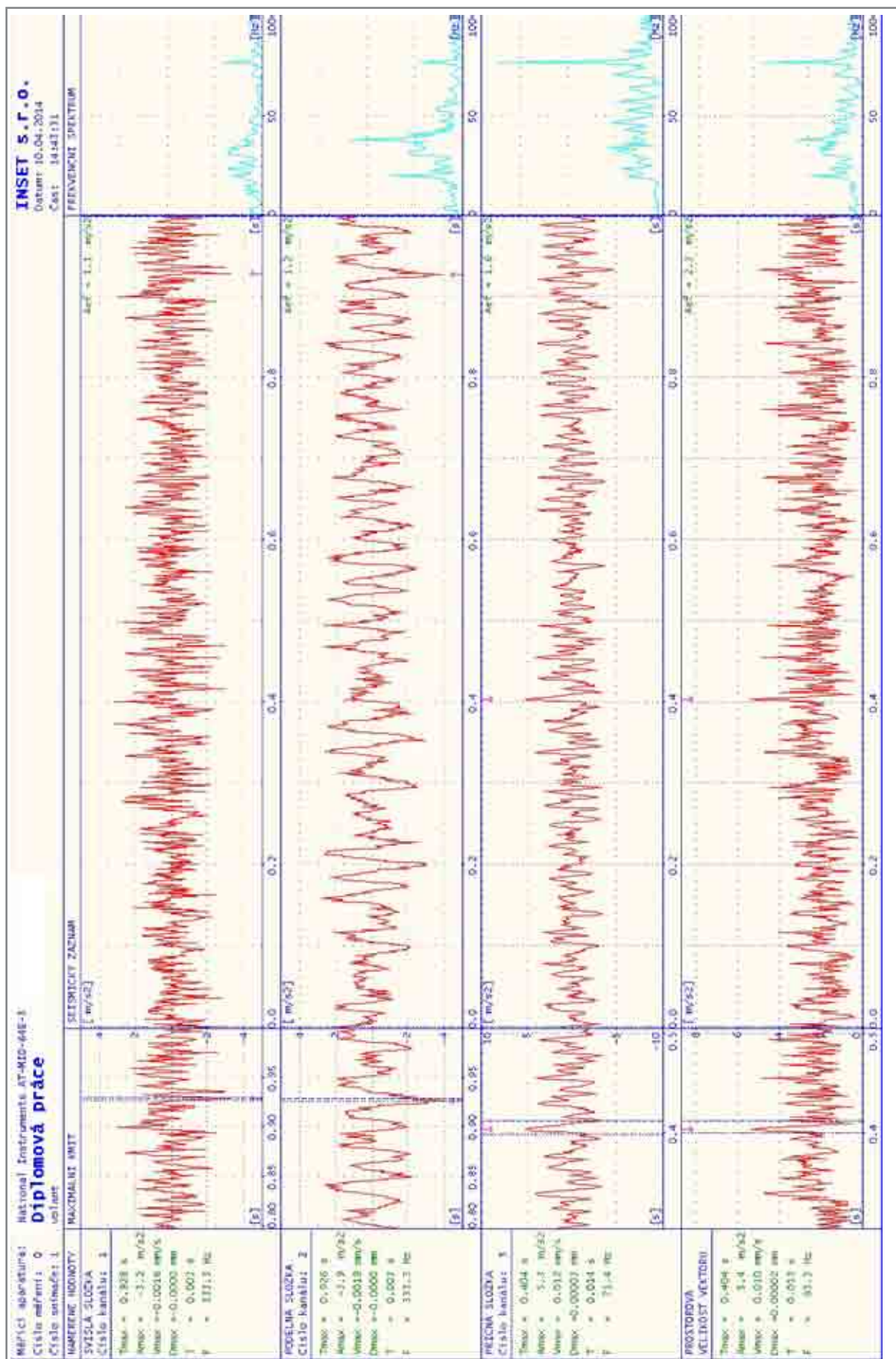
Volant: Průběh vibrací jednotlivých složek (příloha 2) je velmi podobný, nejvíce volant kmitá v podélném směru. Všechny složky vykazují největší vibrace při rychlosti 135 km/h, nejmenší (krom volnoběhu) při rychlosti 70 km/h.

Řadící páka: Složky mají opět velmi podobný průběh (příloha 2), pouze v příčném směru vibrace z rychlosti 130 km/h na 135 km/h rostou (u ostatních směrů vibrací je zde patrný pokles) - tedy největší vibrace jsou při rychlosti 130 km/h ve svislém a podélném směru, při rychlosti 135 km/h v příčném směru. Nejmenší vibrace (krom volnoběhu) jsou opět při rychlosti 70 km/h. Po většinu jízdních režimů nejvíce kmitá řadící páka v příčném směru.

Sedadlo: Tvar křivky průběhu celkových vibrací je silně ovlivněn vibracemi složky x, jak naznačuje graf (příloha 2). V ostatních směrech se vibrace při rychlostech (a volnoběhu) příliš nemění.

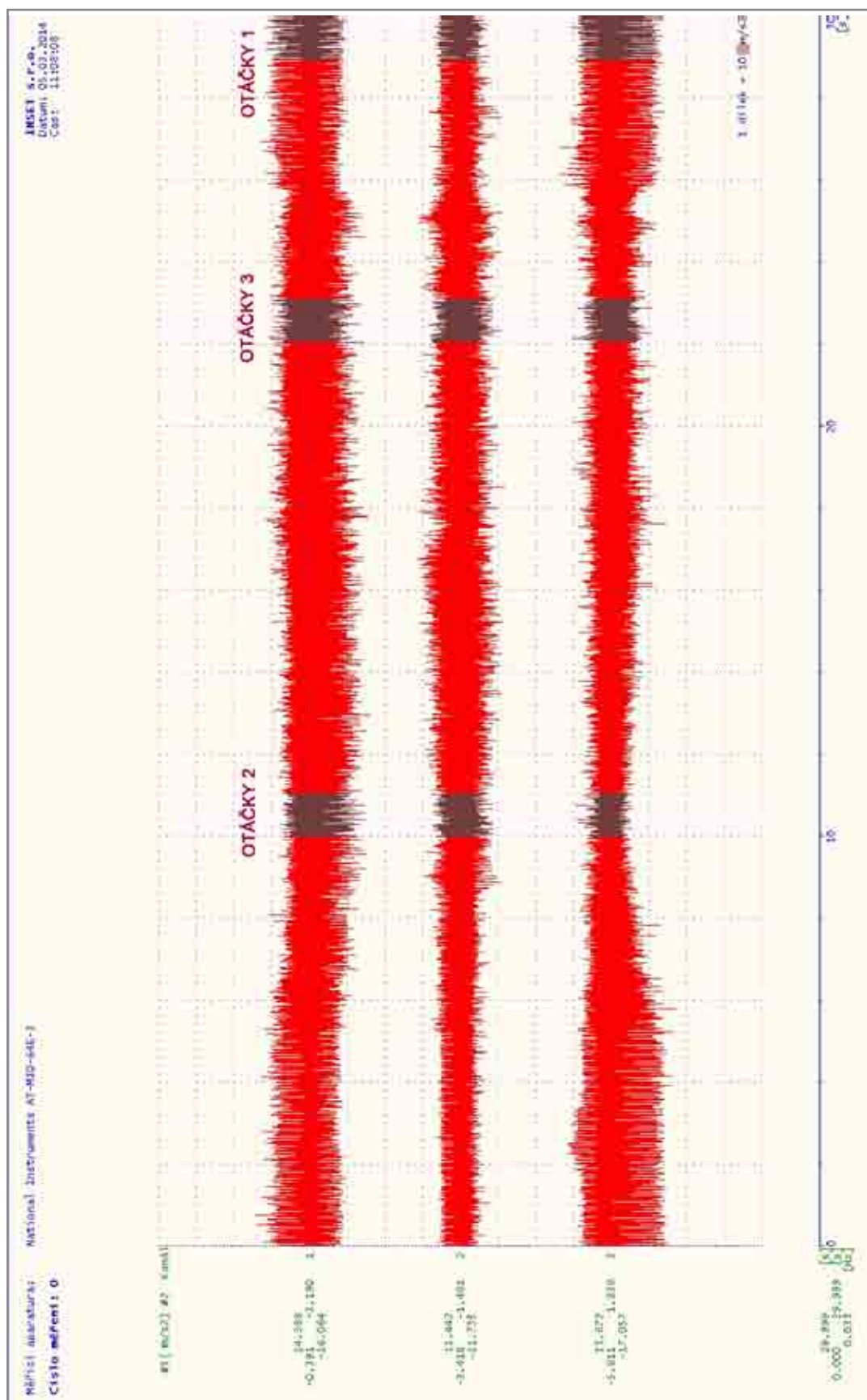


Obr. 62 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla B



Obr. 64 Časový průběh zrychlení kmitání na volantu vozidla B při rychlosti 130 km/h

6.2.6 Otáčky motoru ve vztahu k velikosti amplitudy okamžitého zrychlení kmitání



Obr. 65 Časový průběh zrychlení kmitání na motoru vozidla LZ při různých otáčkách motoru

Měření 1 naznačuje možnou souvislost mezi otáčkami motoru a výší vibrací na volant. V rámci měření 2 bylo provedeno měření vibrací motoru při různých otáčkách. Vibrace při různých otáčkách byly měřeny pouze na vozidle Škoda Octavia (LZ). Postupně byly zvyšovány otáčky motoru. Na každé ze tří úrovní otáček bylo setrváno několik sekund. Průběh byl zaznamenán v grafu na obr. 65 (závislost okamžitého zrychlení kmitání na čase), kde jsou vyznačeny tři oblasti různé výše otáček. Grafy, které zachycují časový průběh zrychlení kmitání v jednotlivých vyznačených úsecích (z obr. 65) jsou ke shlédnutí v příloze na CD.

Na počátku a na konci jsou otáčky stejné (což je poměrně dobře viditelné, označeny jsou jako otáčky 1). Pozvolný nárůst otáček je velmi dobře rozeznatelný na složce z (přibližně od 6. do 10. s).

Tabulka č. 6: Efektivní hodnoty při různých otáčkách na motoru vozidla LZ

Otáčky [ot/min]	ef. hodnota zrychlení, složka x [m/s ²]	ef. hodnota zrychlení, složka y [m/s ²]	ef. hodnota zrychlení, složka z [m/s ²]	ef. hodnota zrychlení celkem [m/s ²]	frekvence [Hz]	otáčky vy- počítané z frekvence (f·60/2) [ot/min]
okolo 900	3,9	2,8	4,7	6,7	30,3 a její násobky	909
okolo 2000	4,4	3,2	2,2	5,9	66,7	2001
okolo 3000	4,1	3,3	3,2	6,2	100	3000

O výši celkového zrychlení kmitání se nedá říci, že by s otáčkami rostla nebo klesala. Měření 1 však ukazuje možnou souvislost mezi výší zrychlení kmitání a otáčkami motoru v kombinaci s rychlostí vozidla a rychlostním stupněm. Pokud je tato kombinace vhodná, zrychlení kmitání by mohlo mít nižší hodnoty.

Na obr. 65 a v tab. 6 lze pozorovat, že s přibývajícimi otáčkami se nijak výrazně nemění složka y (tedy vibrace v příčném směru). Vibrace ve svislém směru (složka x) mají rovněž velice podobné hodnoty pro otáčky cca 900 a 3000 ot/min, při 2000 ot/min jsou vibrace ve svislém směru mírně vyšší.

Ze všech tří složek vykazuje největší změny vibrací složka z (podélný směr). Při 900 ot/min dosahuje nejvyšších hodnot, nejnižších při 2000 ot/min.

6.2.7 Nerovnosti na vozovce

Měření 1 ukazuje zvýšené efektivní hodnoty zrychlení vibrací také v úsecích výskytu nerovností (hrboly, drážky, záplyty a další) na vozovce. Tento vliv nerovností byl pozorován už při samotných měřeních při průběžné kontrole hodnot na měřicím přístroji. Rovněž při měření 2 se každá nerovnost projevila na monitoru měřícího zařízení zvětšením amplitudy na grafu okamžitého zrychlení v čase.

Je tedy jasné, že nerovnosti na vozovce zvyšují celkovou efektivní hodnotu zrychlení kmitání. Není však zcela jasné, zda za toto zvýšení mohou všechny tři složky kmitání, nebo jen některé.

Byly tedy vybrány dva úseky naměřené na nejnovějším vozidle, tedy Škoda Yeti (B), kde jsou krátkodobě zvýšeny hodnoty okamžitého zrychlení - předpokládá se, že je způsobeno právě nerovnostmi, jelikož rychlost byla udržována konstantní, stejně tak i otáčky a rychlostní stupeň. Jde o úseky naměřené při rychlostech 50 a 130 km/h.

V tabulkách č. 7 a 8 jsou uvedeny ef. hodn. zrychlení kmitů při rychlostech 50 a 130 km/h na povrchu vozovky bez výrazné nerovnosti a s nerovností.

Rychlost 50 km/h

Tabulka č. 7: Efektivní hodnoty zrychlení kmitání při 50 km/h, různé povrchy

Vozovka bez výrazných nerovností, rychlost 50 km/h											
Volant složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Řadící páka složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Sedadlo složky x, y, z a prostorová [m/s ²]			
0,39	0,86	0,8	1,2	0,37	0,65	0,72	1,0	0,0058	0,0057	0,0068	0,011
Vozovka s výraznou nerovností, rychlost 50 km/h											
Volant složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Řadící páka složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Sedadlo složky x, y, z a prostorová [m/s ²]			
1,3	3,0	2,4	4,0	0,39	0,76	0,74	1,1	0,0071	0,006	0,0066	0,011

Na volantu došlo přibližně k trojnásobnému a vyššímu navýšení ef. hodn. při jízdě na nerovnosti v porovnání z jízdou na vozovce bez takto výrazné nerovnosti. Nejvíce se změnila složka y (příčný směr vozidla).

Na řadící páce byly naměřeny na nerovnosti vozovky vibrace jen lehce zvýšené oproti vozovce bez nerovnosti, což se týká všech složek.

Na sedadle výraznější zvýšení vibrací postihuje pouze složku x - tedy nerovnost má vliv na výši vibrací ve svislém směru, ostatní složky jsou v toleranci.

Rychlost 130 km/h

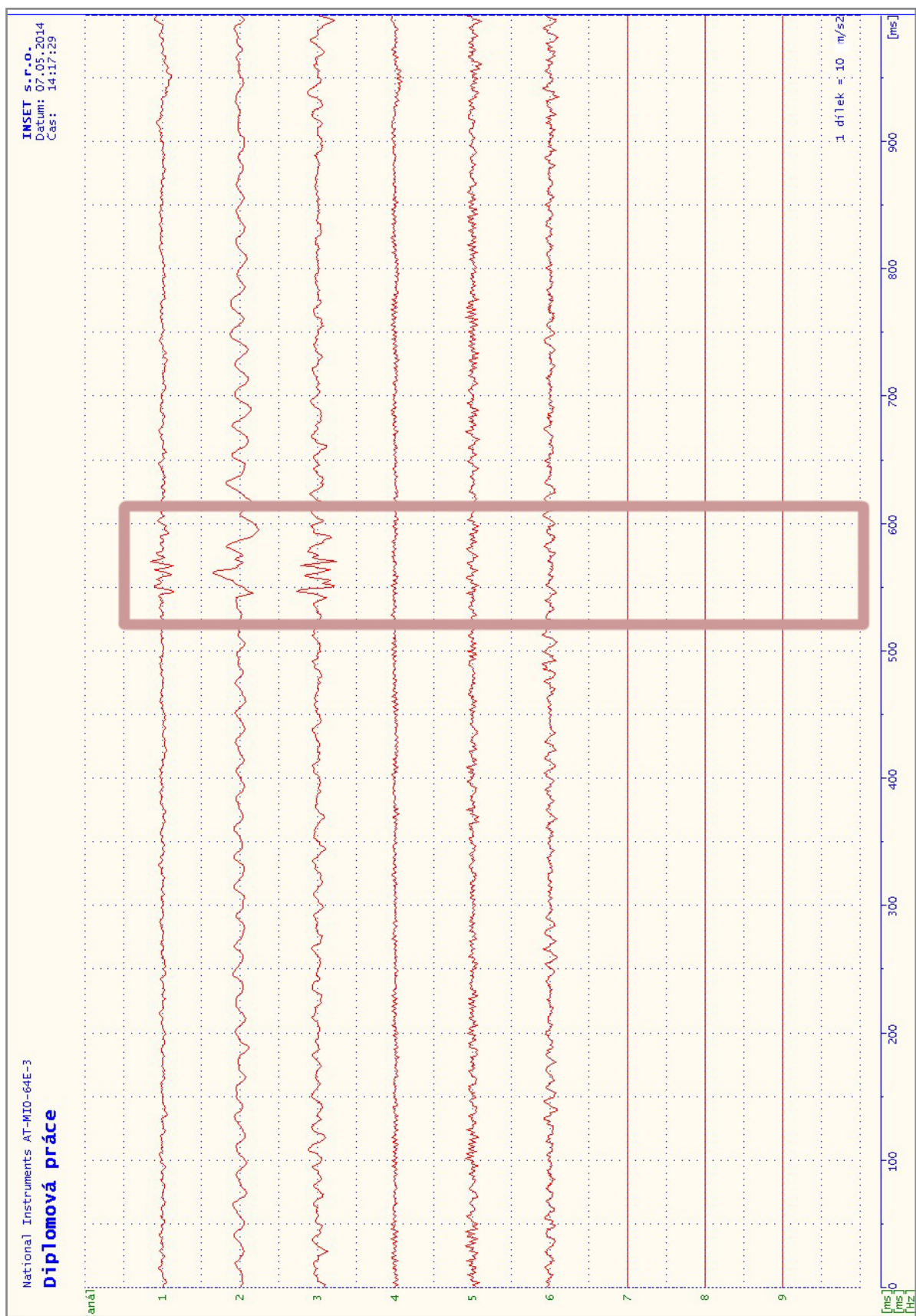
Tabulka č. 8: Efektivní hodnoty zrychlení kmitání při 130 km/h, různé povrchy

Vozovka bez výrazných nerovností, rychlost 130 km/h											
Volant složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Řadící páka složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Sedadlo složky x, y, z a prostorová [m/s ²]			
0,82	0,63	1,2	1,6	1,8	2,9	2,3	4,0	0,0069	0,0059	0,0088	0,011
Vozovka s výraznou nerovností, rychlost 130 km/h											
Volant složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Řadící páka složky x, y, z a prostorová [m/s ²]				Sedadlo složky x, y, z a prostorová [m/s ²]			
2,2	1,7	3,7	4,6	2,0	3,4	3,1	5,0	0,008	0,0057	0,0067	0,012

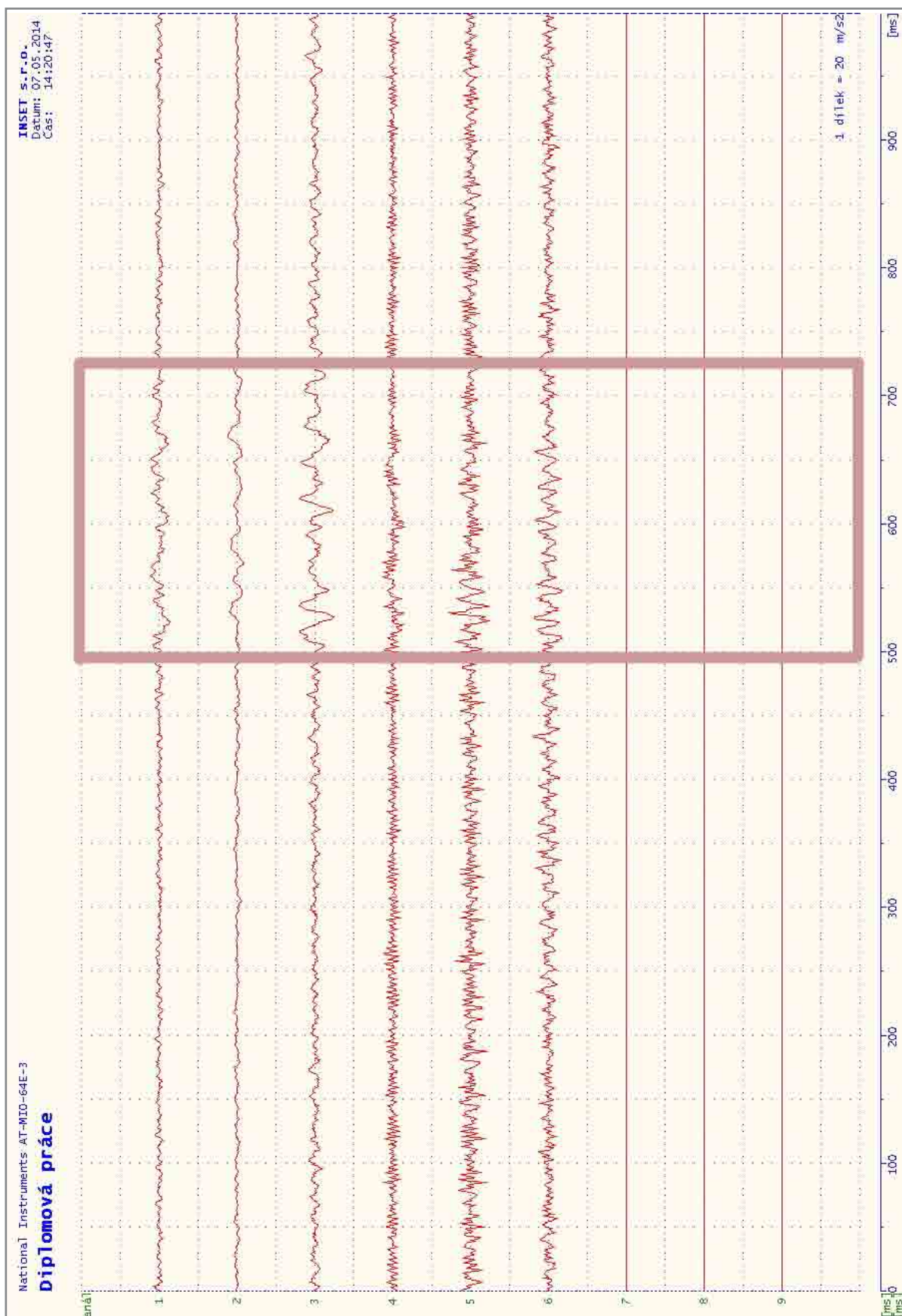
I při rychlosti 130 km/h je patrný největší nárůst vibrací na volantu. Byly naměřeny přibližně trojnásobné a vyšší hodnoty na nerovnosti oproti povrchu bez nerovnosti. Zde byl ovšem největší nárůst na složce z (podélný směr vozidla).

Velikost vibrací řadící páky na nerovném povrchu vozovky rovněž vzrostly. Nárůst však není tak velký jako na volantu. Největší nárůst je na složce z (příčný směr).

Na sedadle nebyly naměřeny nijak výrazné změny (jednotlivé dvojice hodnot jsou v toleranci). Největší změnou však prošla složka x (svislý směr), která se vlivem nerovností zvýšila.



Obr. 66: Časový průběh zrychlení kmitání vozidla B při rychlosti 50 km/h s vyznačeným místem výskytu nerovností vozovky



Obr. 67: Časový průběh zrychlení kmitání vozidla B při rychlosti 130 km/h s vyznačeným místem výskytu nerovností vozovky

6.2.8 Vyhodnocení výsledků měření 2 dle hygienických norem

Jak již bylo zmíněno, nadlimitní vibrace mají dopad na lidské zdraví. Je prokázáno, že dříve nemocemi trpěli řidiči některých nákladních vozidel, a to zejména nemocemi způsobenými vibracemi přenášenými na ruce. V dnešní době jsou nadlimitní vibrace mnohem lépe ošetřené než nadlimitní hluk, i tak je však třeba je sledovat a chránit se před nimi.

I když dané vibrace limity splňují, neznamená to, že by člověku nevadily. Limity vycházejí z hodnot, které již nemoci způsobují a ne ze vjemu člověka.

Hodnocení celkových vibrací

Hodnocení vibrací z hlediska působení na člověka bylo provedeno dle Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. „O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací“ s vyhodnocením souhrnné vážené hladiny zrychlení a dále dle ČSN ISO 2631-2 „Vibrace a rázy – hodnocení expozice člověka celkovým vibracím“, kde jsou definovány váhové filtry hodnot zrychlení v závislosti na třetinooktávových pásmech podle polohy člověka vzhledem k vibracím.

Souhrnná vážená hodnota zrychlení vibrací je vypočtena z nejnepříznivějších záznamů rychlostí kmitání získaných měřicím počítačem, které zároveň reprezentují nejběžnější provozní stav z hlediska profesionálního řidiče. Byly proto posouzeny záznamy z Oktavie při rychlosti jízdy 90 km/h a 130 km/h. Digitalizovaný průběh rychlosti kmitání je numerickou derivací dle času převeden na průběh zrychlení vibrací. Následnou filtrací v třetinooktávových pásmech v rozsahu od 1 do 80 Hz jsou vyhodnoceny hladiny zrychlení v jednotlivých pásmech. Tyto hladiny jsou váženy příslušným váhovým filtrem pro výpočet vážené hladiny zrychlení. Souhrnná vážená hodnota zrychlení je pak dána absolutní hodnotou vektorového součtu všech tří vážených složek vibrací ve všech třetinooktávových pásmech.

Vibrace byly tedy posuzovány dle části 4, §13 Nařízení vlády č.272/2011 Sb. (vibrace na pracovištích), byly posuzovány přípustné expoziční limity vibrací pro dobu expozice 8 hodin pro vibrace přenášené na ruce (týká se volantu, limit 128 dB) a pro celkové vertikální a horizontální vibrace (týká se sedadla, limit 114 dB).

Výpočty a tabulky viz soubory na CD.

Způsob zpracování dat

Ke zpracování byly použity programy Oktava batch, Woscilo a Vef, vlastní produkty firmy INSET s.r.o., za pomoci techniků této firmy, s nimiž byly výsledky konzultovány. Výsledky jsou dále graficky zpracovány a zobrazeny v grafech současně s uvedením nejvyšších přípustných hladin zrychlení dle předchozího odstavce. Zpracování dat z měření seismické odezvy zahrnovalo následující kroky:

- Úpravy naměřených dat – časové záznamy – výběr záznamů k dalšímu zpracování.
- Vyhodnocení celkových vibrací (hygienických účinků) a zpracování třetinooktávových analýz pro všechny snímače vybraných záznamů.

Celkové vibrace

Zpracování třetinooktávových analýz bylo provedeno pro vyhodnocovaný záznam 90 km/h a 130 km/h, a to jednak pro snímač 1 (volant – vibrace přenášené na ruce), jednak pro snímač 3 (sedadlo řidiče – vibrace přenášené do celého těla). Výpočty a grafy (přiložené v příloze na CD) dokumentují výsledky hladin zrychlení vibrací jednotlivých složek v třetinooktávových pásmech 1 až 80 Hz.

Výsledky

Tabulka č. 9: Hladiny zrychlení kmitání vypočítané a limitní

Vibrace přenášené na ruce (od volantu)		
Hodnota při rychlosti 90 km/h	Hodnota při rychlosti 130 km/h	Limitní hodnota
94, 46 dB	100, 39 dB	128 dB
Vibrace celkové vertikální a horizontální (od sedadla)		
Hodnota při rychlosti 90 km/h	Hodnota při rychlosti 130 km/h	Limitní hodnota
82, 84 dB	81, 17 dB	114 dB

Rozšířená kombinovaná nejistota měření vzhledem k okolním podmínkám je odhadnuta na 2 dB pro koeficient rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%.

Z hlediska hodnocení celkových vibrací dle Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., byly dosaženy ve všech hodnocených případech hodnoty menší než přípustné hygienické limity snížené o rozšířenou kombinovanou nejistotu měření. Limitní hodnoty jsou tedy prokazatelně dodrženy.

Pozn.: Hladina zrychlení vibrací je vypočítaná dle vztahu $L = 20 \log (a/a_0)$, kde a_0 je určena v ČR na hodnotu 10^{-6} m/s^2 (13, s. 236). Z tohoto lze vypočítat limitní souhrnou váženou hodnotu zrychlení. Pro vibrace přenášené na ruce by pak tato limitní hodnota byla $2,5 \text{ m/s}^2$, pro celkové horizontální a vertikální vibrace $0,5 \text{ m/s}^2$. Tyto hodnoty jsou v předpisech také zmíněny.

6.2.9 Závěr měření 2

Celkové vibrace motoru

Lze říci, že u všech vozidel kmitá motor nejméně v příčném směru. Největší vibrace sice vykazuje motor vozidla Škoda Octavia (LZ), které je nejstarší a má najeto největší počet kilometrů (rok výroby 2004, 185 500 km), nicméně celkové vibrace na motoru nelze dle měření 2 na tyto faktory jednoznačně vztáhnout.

Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla při volnoběhu

Celkové vibrace na volantu se dle měření zvyšují se stářím vozidla a počtem ujetých kilometrů.

Celkové vibrace řadící páky jsou velice podobné, pouze Škoda Octavia (LZ) je má výrazně větší. To může být způsobeno tím, že je výrazně nejstarší a má najeto výrazně nejvíce kilometrů.

Celkové vibrace na sedadle jsou mnohem menší než na ostatních měřených místech. Nejnižší byly naměřeny na vozidle Škoda Yeti (B), které je z vozidel nejmladší a má najeto nejméně kilometrů (rok výroby 2014, 1 600 km).

Častý pokles při rychlosti 70 km/h při měření v interiéru vozidla:

Tato tendence byla zaznamenána u většiny měření. Tedy u vozidel Škoda Yeti (S a B) na všech měřených částech, u vozidel Škoda Fabia (JK) a Škoda Octavia (LZ) pouze na volantu a sedadle. Na vozidle Škoda Fabia (OT) není pokles při této rychlosti patrný.

Složky s nejvyššími hodnotami vibrací při měření v interiéru vozidla:

Volant: U všech vozidel převládají vibrace v podélném směru vozidla. V případě Škody Octavie (LZ) a Škody Yeti (S) může být výrazná podélná složka kmitání ovlivněna mimo jiné i výraznými kmity v podélném směru naměřenými na motoru.

Řadící páka: U Škody Octavie (LZ) jsou vibrace největší v podélném směru. U ostatních vozidel však převládají vibrace v příčném směru.

Sedadlo: U sedadla nelze jednoznačně říci, která složka převládá. Je však zřejmé, že kmity na sedadle jsou velice utlumeny a většinou mají vibrace v jednotlivých složkách velmi podobné hodnoty.

Růst vibrací s rychlostí vozidla při měření v interiéru vozidla:

Lze říci, že s rostoucí rychlostí roste i velikost vibrací. Výjimku tvoří rychlost 70 km/h. Tato rychlost byla tedy z pohledu ovlivnění komfortu jízdy vibracemi nejvhodnější (u JK byl zařazen 5. rychlostní stupeň, u ostatních 4. rychlostní stupeň).

Závislost vibrací na otáčkách motoru

Měřeno bylo pouze vozidlo Škoda Octavia (LZ). Při změně otáček lze dle měření 2 usuzovat, že nejvíce ovlivňuje změnu výše vibrací při změně otáček složka z (vibrace v podélném směru vozidla). To znamená, že pokud se celkové vibrace motoru výrazně zvýší nebo sníží, je to často díky velkému zvýšení či snížení velikosti vibrací motoru složky z (v podélném směru vozidla).

Nerovnosti na vozovce

Měření 2 ukazuje, že nerovnosti na vozovce zvyšují okamžitou hodnotu zrychlení kmitání a tím i efektivní hodnotu zrychlení kmitání.

Největší vliv mají nerovnosti na vibrace volantu, kde se všechny složky při horším stavu vozovky výrazně zvyšují.

Na řadící páce je zvětšení vibrací vlivem nerovností v porovnání s volantem jen malé.

Na sedadle se nerovnosti téměř neprojevují. Vibrace jsou vlivem nerovností výrazněji vyšší pouze ve svislém směru vozidla (složka x).

Hygienické hledisko

Z měřených vozidel bylo vybráno vozidlo s nejvyššími hodnotami zrychlení, tedy Škoda Octavia (LZ). Výsledky a limity se odvíjí od předpokladu, kdyby bylo vozidlo použito při práci s dobou expozice vibracemi 8 hodin. Toto posouzení se týkalo volantu, kde by přicházela v potaz možnost působení vibrací na ruce, a sedadla, kde se přenášejí vibrace na celé tělo (celkové horizontální a vertikální vibrace).

Důležité je, že za daných podmínek by vozidlo všechny tyto limity splňovalo. Jelikož bylo vzato vozidlo s nejnepříznivějšími hodnotami, lze očekávat, že ostatní vozidla by limity splnila také.

7 VYUŽITÍ VIBRODIAGNOSTIKY PŘI ZNALECKÉ ČINNOSTI

7.1 ZJIŠŤOVÁNÍ TECHNICKÉHO STAVU VOZIDLA POMOCÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ NA VOLANTU

7.1.1 Metodika měření

V rámci měření 1 byl proměřen úsek cesty velmi špatného technického stavu (panelová cesta), kdy byly vibrace vozidla již neúnosně vysoké. Měření bylo provedeno na vozidle Škoda Fabia (JK). Vibrace zaznamenané na trase měření 1 jsou považovány za ukazatel normálního, případně mezního, stavu vozidla. Pokud by byly naměřeny na trase měření 1 (ul. Vídeňská a D1) na volantu vozidla vibrace o velikosti vibrací naměřených na panelové cestě, byl by stav vozidla považován za vadný.

Tabulka č. 10: Měřená vozidla

Vozidlo	Rok výroby	Počet ujetých kilometrů [km]
Škoda Fabia (JK)	2010	88 000
Škoda Fabia (OT)	2013	13 300
Škoda Octavia (LZ)	2004	185 500

Obr. 68 porovnává průběhy efektivních hodnot zrychlení vozidel naměřených na trase měření 1 a naměřených na panelové cestě vozidlem Škoda Fabia (JK). Výrazně vyšší hodnoty naměřené na panelové cestě jsou velice zřejmé. (Jelikož úsek panelové cesty byl krátký, pro pokrytí celého úseku trasy měření 1 se hodnoty naměřené na panelové cestě opakují.)

7.1.2 Návosloví

Normální stav: „Je takový stav, při kterém vozidlo a jeho části vyhovují všem základním i vedlejším parametrům stanoveným pro jeho funkci. Vozidlo je provozuschopné, bez poruch a vad.“ (Panáček, 2012, s. 9) (16)

Vada: „Je stav, kdy vozidlo nesplňuje některý ze základních nebo vedlejších parametrů.“ (Panáček, 2012, s. 9) (16)

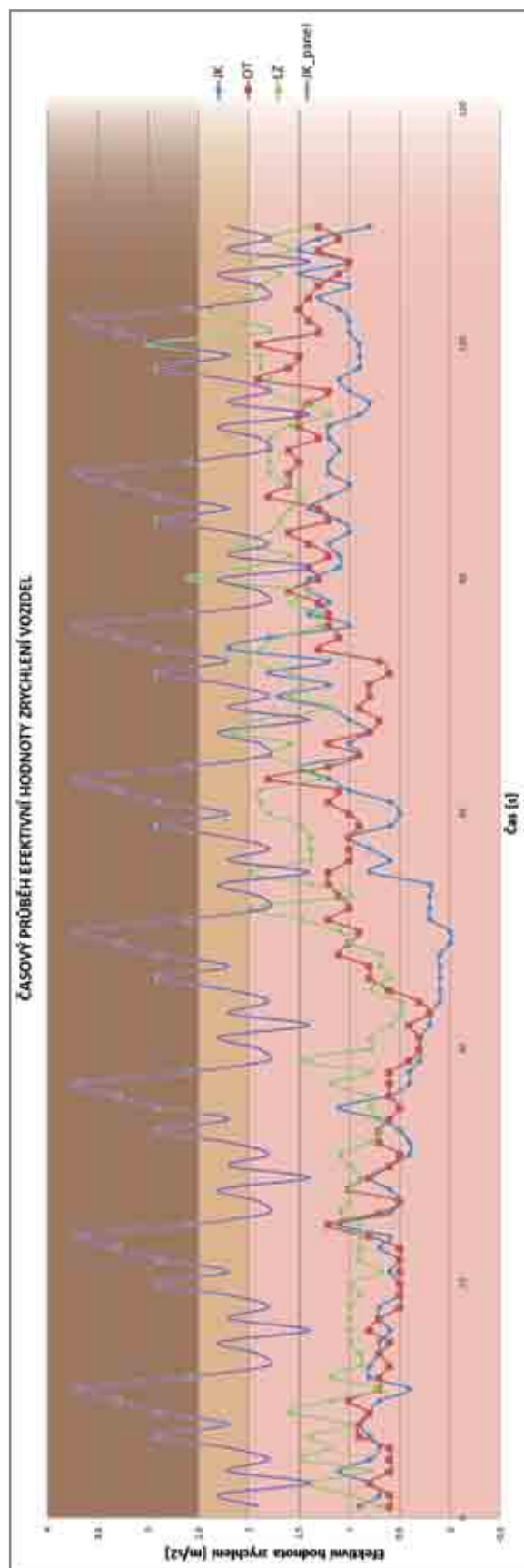
7.1.3 Stav vozidla, mezní hodnoty

Z těchto výsledků by mohly být určeny mezní hodnoty pro stavy „normální“ a stav „vada“ vozidla. Na obr. 68 jednotlivá barevná pole naznačují, jak by toto mohlo vypadat.

Normální stav vozidla (růžové pole na obr. 68) by byl tedy takový stav, kdy se většina hodnot naměřených na dané trase nachází v rozmezí 0 m/s^2 až $2,0 \text{ m/s}^2$.

Vadný stav (hnědé pole na obr. 68) vozidla by byl stav, kdy se většina hodnot naměřených na dané trase nachází v rozmezí $2,5 \text{ m/s}^2$ a více.

Stav mezní (béžové pole na obr. 68) by znamenal hodnoty v rozmezí $2,0 \text{ m/s}^2$ až $2,5 \text{ m/s}^2$.



Obr. 68: Časový průběh efektivní hodnoty zrychlení kmitání vozidel (JK, OT, LZ) na měřené trase a na panelové cestě, oblasti stavu vozidel

7.1.4 Měření vibrací na volantu

Z časového průběhu vibrací a případně z jeho frekvenční analýzy lze poznat, v jakém stavu je měřená součást. Vibrace naměřené na volantu poukazují na stav více součástí - tedy nejen stav volantu samotného, ale i dalších částí, které jsou s volantem propojeny a mohou na sebe vibrace přenášet.

Vibrace na volantu by mohly být tedy prvním posouzením stavu těchto částí. Až posléze by bylo vhodné se případně zaměřit na ostatní části podrobněji - což by bylo již časově náročnější.

Vibrace na volantu lze navíc poměrně pohodlně měřit i za jízdy. Měření umožňuje průběžný náhled na měřené hodnoty a kontrolu upevnění snímače na volantu.

Jak naznačují provedená měření, na volantu se z měřených míst nejvíce projevují faktory ovlivňující velikost vibrací, tedy ve výsledcích se lépe orientuje a každá změna podmínek nebo stavu vozidla se výrazně projeví.

7.2 MĚŘENÍ VIBRACÍ ZA ÚČELEM POSOUZENÍ VLIVU NA ZDRAVÍ ČLOVĚKA

Nadměrné vibrace mohou mít nepříznivý vliv na řidiče i v případě, kdy splňují zákonné limity. Mohou způsobit mnohé fyzické (například větší únava, cévní nemoci a další) i psychické choroby, což by mohlo mít neblahý vliv na bezpečnost provozu.

Tato problematika se týká nejvíce profesionálních řidičů, u kterých je komfort při řízení velice důležitý.

7.3 VIBRACE ZPŮSOBENÉ POVRCHEM VOZOVKY

Z měření vyplývá, že povrch vozovky se velmi výrazným způsobem podílí na velikosti vibrací, zejména pak vibrací volantu. Bylo by tedy možné určitým vozidlem mapovat stav vozovek pomocí měření vibrací. Měření by mohlo probíhat za daných podmínek (rychlost, otáčky, rychlostní stupeň). Zvýšené hodnoty vibrací by pak znamenaly nerovnosti vozovky. Výsledky měření by dále mohly sloužit jako podklady k naplánování oprav vozovky.

7.4 DALŠÍ MOŽNOSTI

Existuje spousta možností, jak vibrodiagnostiku v praxi využít.

Ve strojírenství je to diagnostika částí strojů, kdy je možné zjistit vzniklou či vznikající vadu. Poté je zpracován plán údržby. Měření vibrací za účelem zjištění jejich výše v různých etapách života stroje (Vanová křivka, trendování vibrací) je velice často činnost dlouhodobá.

Měří se také vibrace, které jsou způsobeny činnostmi například v lomech. Tyto činnosti mohou ovlivňovat stav staveb a i přírodních útvarů (například jeskyně), v okolí.

Důležité je ve stavebnictví měření vibrací budov. Tyto vibrace jsou způsobeny činnostmi strojů na stavbách, ve fabrikách a podobně. Postupně tak může dojít k velkým škodám nejen na majetku.

Většinou existují předem stanovené kategorie, které vypovídají o možném riziku způsobeném danou hladinou vibrací. Díky tomuto jsou poté nadlimitní vibrace omezovány nebo jsou přijaty jiná bezpečnostní opatření.

ZÁVĚR

V rámci této práce bylo provedeno měření vibrací na vybraných částech vozidla. Všechna měření proběhla na vozidlech značky Škoda různého typu (Fabia, Octavia a Yeti), stáří (rok výroby 2004 až 2014) a počtu ujetých kilometrů (1 600 až 185 500).

Míra vibrací se poměrně velmi citlivě mění s rychlostí vozidla, zařazeným rychlostním stupněm a aktuálními otáčkami motoru. Ve většině případů vibrace s rychlostí úměrně rostou. Je ovšem zajímavé, že při rychlosti 70 km/h u většiny vozidel vibrace výrazně poklesly, což by mohlo být způsobeno například vhodnou kombinací rychlosti, otáček motoru a volbou rychlostního stupně. Lze konstatovat, že spolu se stářím vozidla a počtem ujetých kilometrů můžeme pozorovat tendenci růstu velikostí i rozsahu hodnot vibrací. Ze získaných dat dále můžeme říci, že s klesající kvalitou povrchu vozovky úměrně narůstají hodnoty vibrací.

Z vibrací pozorovaných při volnoběhu vozidel přímo na jejich motoru nelze konstatovat žádný konkrétní závěr společný pro všechna vozidla s výjimkou shodného jevu nejmenší složky vibrací v příčném směru vozidla.

Volant vykazuje z měřených částí v interiéru vozidla vibrace zdaleka největší, nejvýraznější je při tom složka působící v podélném směru vozidla. Tyto vibrace se ještě zvyšují v souvislosti se stářím (opotřebením) vozidla a počtem ujetých kilometrů.

Velice malé vibrace byly pozorovány na sedadle vozidel. Vzhledem k tomu, že na něm člověk spočívá celým tělem a případné vibrace by mohly způsobovat vážné zdravotní komplikace, výrobci patrně tento negativní vliv co nejvíce eliminují.

Předpoklad růstu vibrací v závislosti na zvyšování otáček motoru se na základě dat získaných při měření jeví jako mylný, nebo alespoň jako neprůkazný. Změny výše vibrací pozorované při různých otáčkách vznikají v závislosti na změně velikosti vibrace v podélném směru vozidla. Měření bylo ovšem provedeno pouze na vozidle Škoda Octavia. Je možné, že měřením vibrací při změně otáček na motoru jiných vozidel by bylo dosaženo zcela jiných výsledků.

Měření dále ukazují souvislost mezi nerovnostmi povrchu a výší vibrací. Nejvíce se nerovnosti promítají do vibrací volantu, kde byly naměřeny oproti povrchu vozovky bez větších nerovností více než trojnásobné vibrace. Řadící páka i sedadlo jsou nerovnostmi na vozovce ovlivněny jen málo. Pokud se ale na ně zaměříme blíže, lze konstatovat, že nejvíce se na sedadle projevují nerovnosti vibracemi ve svislém směru.

Z vozidel bylo vybráno vozidlo s největšími vibracemi (Škoda Octavia) a jeho nejnepríznivější naměřené záznamy byly posouzeny z hlediska norem (předpokládá se doba expozice 8 hodin). I přes zvýšené hodnoty vibrací toto vozidlo stále splňuje dané limity.

Použití měření vibrací při znalecké praxi může být velmi přínosné, jak naznačuje poslední kapitola práce.

Vibrodiagnostika má tedy v praxi široké využití, ale je to oblast, která vyžaduje podrobnou studii. Zejména metody analýzy naměřených hodnot jsou důležitým tématem. Při analýze je totiž obecně doporučováno tyto metody kombinovat za účelem zpřesnění a potvrzení výsledků.

Námětem k pokračování práce by mohlo být například podrobnější prozkoumání projevů jednotlivých částí automobilu. Zde by se již daly mnohem lépe uplatnit metody frekvenční analýzy, případně dlouhodobějším měřením vibrace takzvaně trendovat. To by bylo využitelné především při dlouhodobém měření vibrací přímo na volantu vozidla, přičemž ideální by bylo pozorovat vývoj naměřených hodnot v nepřetržitém režimu od naprosto nového, až po technicky nevyhovující vozidlo.

Velké možnosti nabízí frekvenční analýza vibrací, která může poukazovat již na konkrétnější závady - o některých z nich pojednává teoretická část této práce.

Precizní přístup k této problematice však vyžaduje velice podrobnou studii vibrodiagnostiky a práci se spektry vibrací. Také by bylo možné vhodné využít více snímačů současně, zvláště při jízdě zkoušce, a tedy měřit více míst současně. Výsledky měření by tak charakterizovaly průběh vibrací za naprosto totožných podmínek pro všechna měřená místa.

ZDROJE

- (1) STODOLA, Jiří. Vibrace a jejich využití v technické diagnostice strojů. 1. Brno: VA Brno, 2003. ISBN 80-85960-64-8.
- (2) Harmonické kmitání. Encyklopedie fyziky. [online]. 2006 – 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/156-harmonicke-kmitani>.
- (3) BLATA, Jan, Janusz Juraszek. Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- (4) Skládání kmitů. Kmity a vlny. [online]. [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://vojtahanak.cz/files/edu/kmity/skladani-kmitu.html>.
- (5) Vlastní a nucené kmitání. Kmitavý pohyb. [online]. [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f10.htm#nucen>.
- (6) Wikipedie. In: Hi-Fi svět [online]. 2014 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: <http://www.federmann.cz/index.php/galerie/64-navrhy/375-zvuk-vte-nevte-wikipedii.html>.
- (7) MIŠUN, Vojtěch. Vibrace a hluk. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- (8) HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. Ostrava, 2005. ISBN 80 - 248 - 0650 - 9.
- (9) Hluk a emise. [online]. 2007 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/>.
- (10) Harmonické kmitání. Encyklopedie fyziky. [online]. 2006 – 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/156-harmonicke-kmitani>.
- (11) RUBÍNOVÁ, Dana. Ergonomie. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2006. ISBN 80-214-3313-2.
- (12) KOLLÁR, Anton. Ušní lékař odpovídá, radí, informuje, vysvětluje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2008. ISBN 978-80-7204-602-7.
- (13) BOUŠOVÁ, Karin, Petr BRHEL, Eliška DASTYCHOVÁ, Jarmila FIALOVÁ, Sylva GILLBERTOVÁ, Valerie HASSMANOVÁ, Evžen HRNČÍŘ, Zdeněk JANDÁK, Zdeněk JIRÁK, Tomáš JUREČKA, Monika KNEIDLOVÁ, Josef KOHOUT, Eva KOROLOVÁ, Vendula MACHARTOVÁ, Bohuslav MÁLEK, Marta MANOUŠKOVÁ, Oldřich MATOUŠEK, Marie NAKLÁDALOVÁ, Karel PICKA, Luděk PEKÁREK, Pavel ROSNER, Alena ŠTEFLOVÁ a Zdeňka ŽÍDKOVÁ. Pracovní lékařství: Základy primární pracovnělékařské péče. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2005. ISBN 80-7013-414-3.
- (14) PELCLOVÁ, Daniela, Jindřiška LEBEDOVÁ, Zdenka FENCLOVÁ a Edgar LUKÁŠ. Nemoci z povolání a intoxikace. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1183-X.
- (15) Informace pro občany České republiky. Portál veřejné správy: 272/2011 Sb.. [online]. 2013 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://portal.gov.cz/portal/obcan/>.
- (16) PANÁČEK, Vladimír. Zkoušení vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. ISBN: 978-80-214-4569-7.
- (17) Mapy.cz. [online]. 2014 [cit. 20.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/?!x=16.589723&y=49.151984&z=11/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1: Vlnění v pružném prostředí (7, s. 10)	13
Obr. 2: Dělení kmitů (1, s. 5)	15
Obr. 3: Energie kmitavé soustavy (1, s. 10 - 11)	16
Obr. 4: Skládání kmitů (4)	17
Obr. 5: Odvození efektivní hodnoty výchylky	19
Obr. 6: Harmonické kmitání (1, s. 9)	19
Obr. 8: Výchylka, rychlost a zrychlení (3, s. 11)	20
Obr. 7: Počáteční fáze (1, s. 10)	20
Obr. 9: Ohyb vlny (7, s. 20)	22
Obr. 10: Průchod vlny otvorem (7, s. 20)	23
Obr. 11: Průběh akustického tlaku (7, s. 14)	24
Obr. 12: Základní typy spekter (7, s. 24)	28
Obr. 13: Druhy nevývahy (8, s. 51)	31
Obr. 14: Projev nevývahy ve frekvenčním spektru (8, s. 55)	32
Obr. 16: Projev nesouosého ložiska ve frekvenčním spektru (8, s. 164)	33
Obr. 15: Druhy nesouososti (8, s. 52)	33
Obr. 18: Projev nesouososti ve frekvenčním spektru (8, s. 56)	34
Obr. 17: Možné příčiny nesouososti (8, s. 52)	34
Obr. 19: Projev excentrického rotoru ve frekvenčním spektru (8, s. 164)	35
Obr. 21: Projev letmo uloženého rotoru ve frekvenčním spektru (8, s. 55)	35
Obr. 20: Projev kavitace ve frekvenčním spektru (8, s. 167)	35
Obr. 22: Projev mechanického uvolnění ve frekvenčním spektru (8, s. 165)	36
Obr. 23: Projev turbulence ve frekvenčním spektru (8, s. 167)	36
Obr. 24: Projev ohnuté hřídele ve frekvenčním spektru (8, s. 57)	36
Obr. 25: Sluchová pole (12, s. 12)	40
Obr. 26: Příklady hluku (7, s. 43)	40
Obr. 27: Řez lidským uchem - zjednodušený (7, s. 41 a 12, s. 5)	41
Obr. 28: Zeslabení hluku za bariérou (7, s. 20)	48
Obr. 29: Řetězec vlivu technické diagnostiky na objekt (8, s. 7)	50
Obr. 30: Rozdělení signálů (3, s. 10)	51
Obr. 31: Typy signálů a jejich příklady (1, s. 23)	52
Obr. 32: Frekvenční analýza (8, s. 31)	53
Obr. 34: Trendování vibrací (8, s. 37)	54
Obr. 33: Vanová křivka (8, s. 36)	54
Obr. 35: Blokové schéma měřicího řetězce (1, s. 42)	58
Obr. 36: Měřič vibrací BVB - 8207SD	60
Obr. 37: Umístění snímače	62
Obr. 38: Trasa měření (17)	63
Obr. 40: Jednotlivé složky snímače	65
Obr. 39: INAX 300/30	65
Obr. 41: Blokové schéma měřicího řetězce (měření 2)	66
Obr. 42: Umístění snímačů v interiéru vozidla	68
Obr. 43: Směry umístění snímačů na motoru	68
Obr. 44: Fotografie umístění snímačů v interiéru vozidla	69
Obr. 45: Umístění snímače na motoru (JK)	69

Obr. 46: Umístění snímače na motoru (OT)	70
Obr. 47: Umístění snímače na motoru (LZ)	70
Obr. 48: Umístění snímače na motoru (S)	71
Obr. 49 Umístění snímače na motoru (B)	71
Obr. 50 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo JK	73
Obr. 51 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo OT	74
Obr. 52 Graf závislosti efektivní hodnoty zrychlení na čase, vozidlo LZ	75
Obr. 53 Časový průběh efektivních hodnot všech vozidel	76
Obr. 54 Výše efektivních hodnot zrychlení kmitání všech vozidel na motoru	79
Obr. 55: Časový průběh zrychlení kmitání na motoru LZ při volnoběhu	80
Obr. 56 Výše efektivních hodnot zrychlení kmitání všech vozidel v interiéru vozidla	81
Obr. 57 Časový průběh zrychlení kmitání na volantu vozidla OT při volnoběhu	82
Obr. 58 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla JK	83
Obr. 59 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla OT	84
Obr. 60 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla LZ	85
Obr. 61 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla S	85
Obr. 62 Celkové vibrace volantu, řadící páky a sedadla vozidla B	86
Obr. 63 Časový průběh zrychlení kmitání na volantu vozidla B při rychlosti 50 km/h	87
Obr. 64 Časový průběh zrychlení kmitání na volantu vozidla B při rychlosti 130 km/h	88
Obr. 65 Časový průběh zrychlení kmitání na motoru vozidla LZ při různých otáčkách motoru	89
Obr. 66: Časový průběh zrychlení kmitání vozidla B při rychlosti 50 km/h s vyznačeným místem výskytu nerovností vozovky	92
Obr. 67: Časový průběh zrychlení kmitání vozidla B při rychlosti 130 km/h s vyznačeným místem výskytu nerovností vozovky	93
Obr. 68: Časový průběh efektivní hodnoty zrychlení kmitání vozidel (JK, OT, LZ) na měřené trase a na panelové cestě, oblasti stavu vozidel	97

Pozn.: Obrázky bez uvedení zdroje jsou vlastním dílem autorky.

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Vibrace na pracovištích	45
Tabulka č. 2: Vibrace v chráněných vnitřních prostorech staveb a na pracovištích	47
Tabulka č. 3: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla JK	73
Tabulka č. 4: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla OT	74
Tabulka č. 5: Efektivní hodnoty v dané rychlosti u vozidla LZ	75
Tabulka č. 6: Efektivní hodnoty při různých otáčkách na motoru vozidla LZ	90
Tabulka č. 7: Efektivní hodnoty zrychlení kmitání při 50 km/h, různé povrchy	91
Tabulka č. 8: Efektivní hodnoty zrychlení kmitání při 130 km/h, různé povrchy	91
Tabulka č. 9: Hladiny zrychlení kmitání vypočítané a limitní	95
Tabulka č. 10: Měřená vozidla	97

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: výpisy z průběhů měření 1

Příloha 2: grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla
(Celkem 6 listů)

CD: podklady měření 1 a 2, grafy, tabulky, videozáznamy

Příloha č. 1, list 1/6

Výpis z průběhu měření 1, vozidlo Škoda Fabia (JK)

Ča- sový úsek č.	Efektivní hodnota zrychlení [m/s ²]	Poznámka
1	0,9	50 km/h, 2500 ot/min, 3. rychlostní stupeň
7	0,8	60 km/h, hrboly na vozovce
13	0,8	70 km/h, 2500 ot/min, 4. rychl. st.
31	0,4	značka D1
49 - 50	0	stání
64	1,5	80 km/h, 2600 ot/min, 5. rychl. st., drážky ve vozovce
65 - 74	0,8 - 2,2	drážky ve vozovce
83 - 86	1 - 1,4	hrboly na vozovce
85	1,1	130 km/h, 3500 ot/min, 5. rychl. st., hrboly na vozovce
105	1	odtud zaplátovaná vozovka
111	1	90 km/h

Výpis z průběhu měření 1, vozidlo Škoda Fabia (OT)

Ča- sový úsek č.	Efektivní hodnota zrychlení [m/s ²]	Poznámka
1	0,6	50 km/h, 3. rychlostní stupeň
6	0,6	60 km/h
9	0,8	4. rychl. st.
12	0,7	70 km/h, 2000 ot/min, 4. rychl. st.
29	0,8	značka D1
43 - 44	0,2 - 0,3	stání
49	1	80 km/h, 3000 ot/min, 3. rychl. st.
54	1,2	100 km/h
56	1	90 km/h, 4. rychl. st.
59	0,9	90 km/h, 5. rychl. st., drážky ve vozovce
60 - 63	1 - 1,8	drážky ve vozovce
67	0,8	80 km/h
69	0,9	90 km/h
75	1,1	110 km/h
77	1,2	120 km/h
81	1,4	130 km/h, 3000 ot/min, 5. rychl. st.
96	1,2	120 km/h, odtud příčné spáry ve vozovce a zpomalování

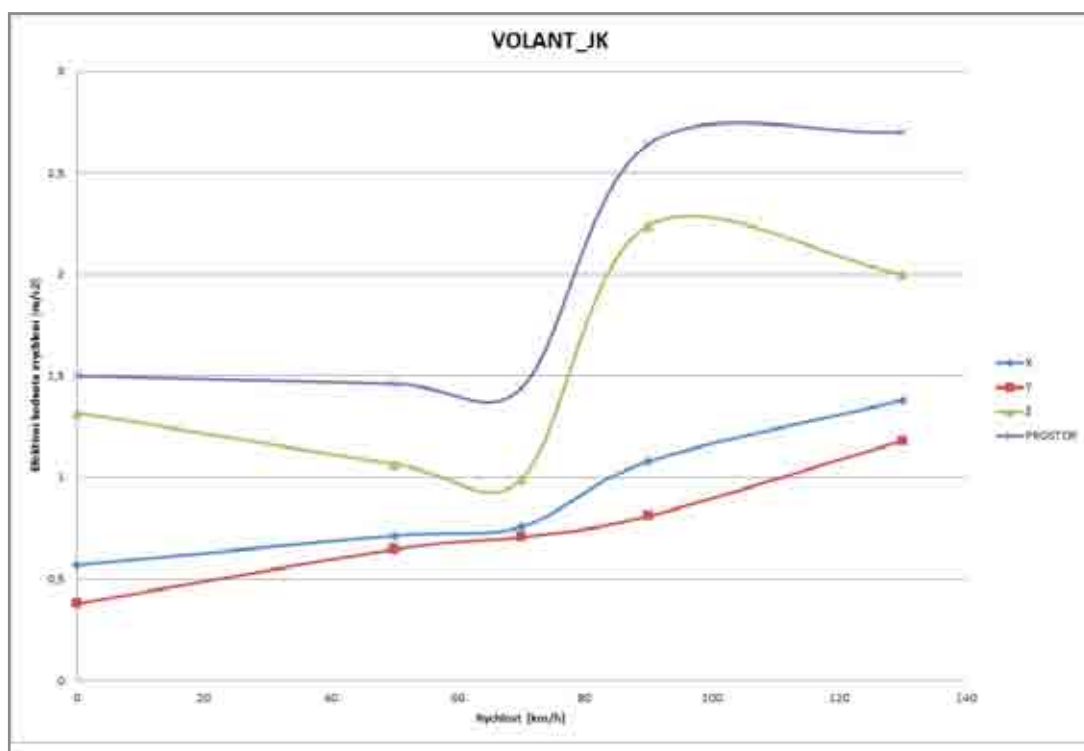
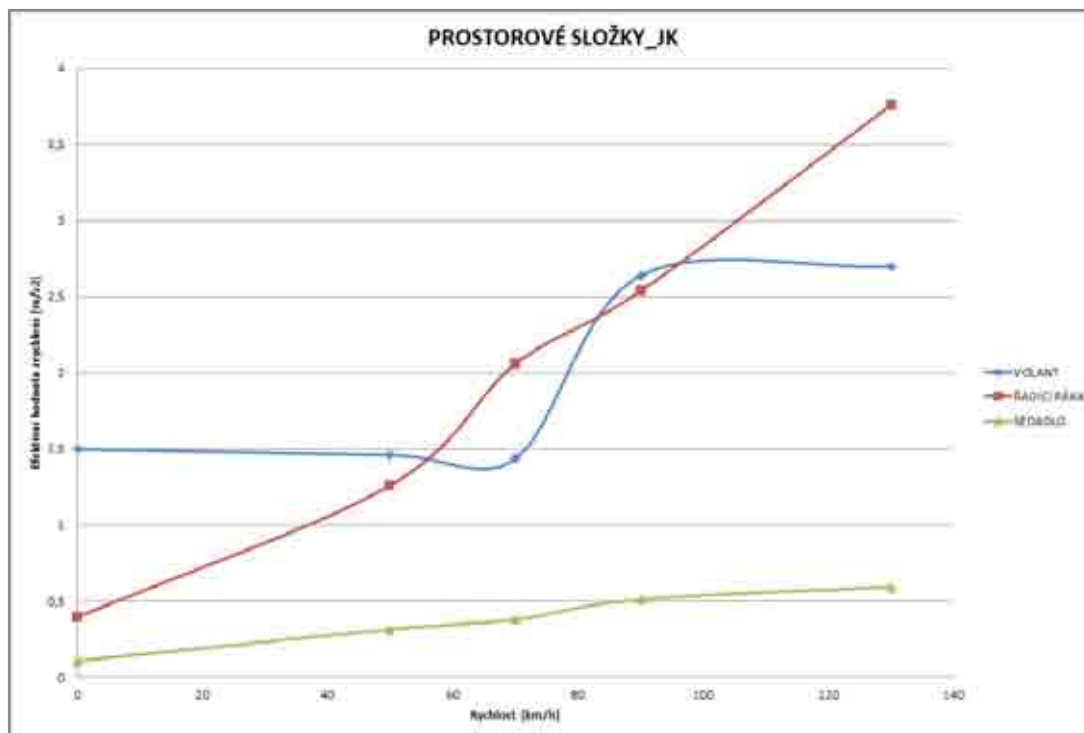
Příloha č. 1, list 1/6

Výpis z průběhu měření 1, vozidlo Škoda Octavia (LZ)

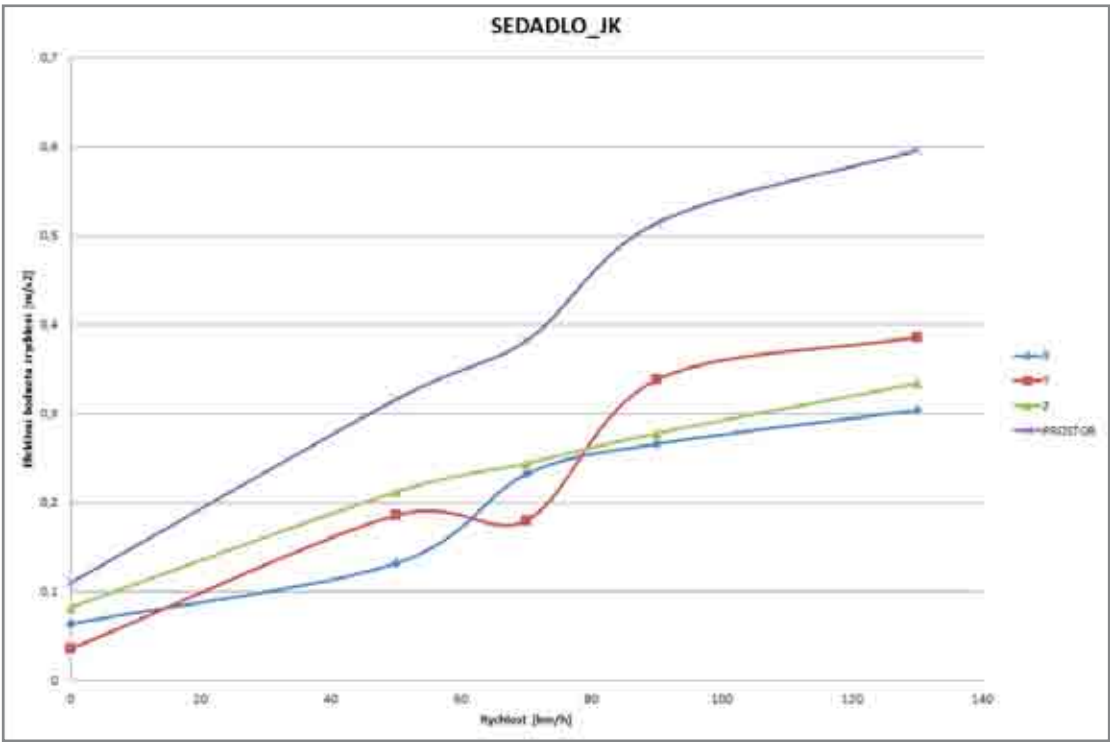
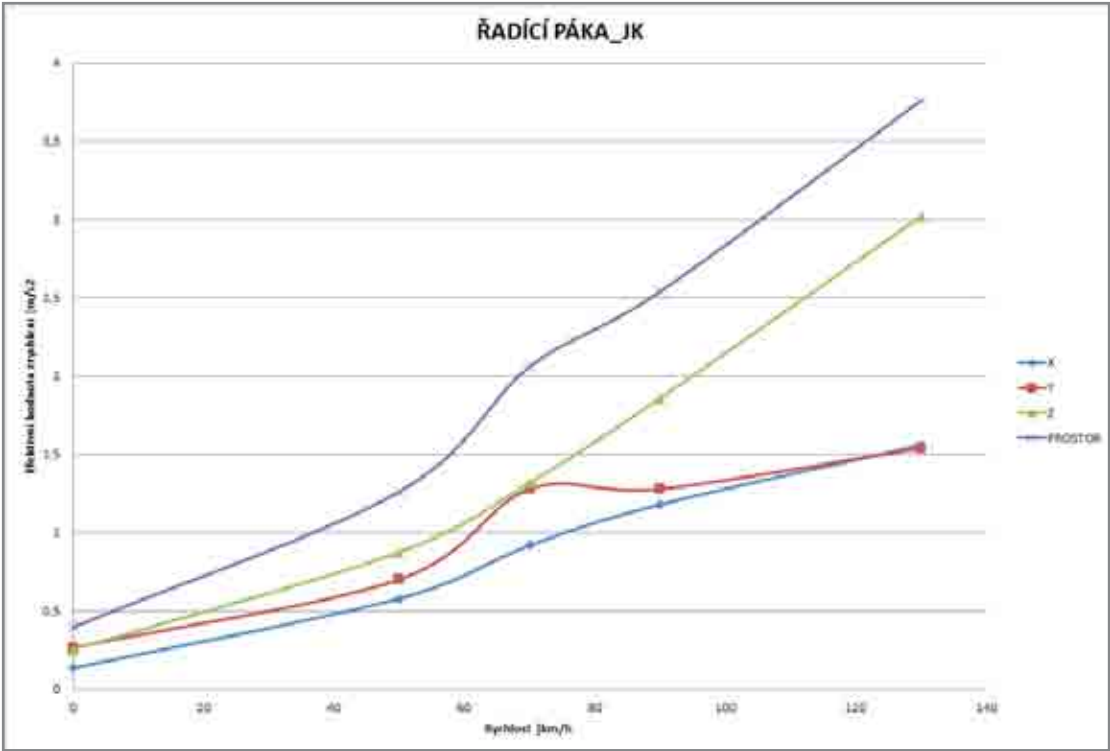
Ča- sový úsek č.	Efektivní hodnota zrychlení [m/s ²]	Poznámka
1	0,7	50 km/h, 2000 ot/min, 3. rychl. st.
3 - 9	0,8 - 1,6	zaplátovaná vozovka
12	1,2	60 km/h, 2200 ot/min, 3. rychl. st.
15	1	4. rychl. st.
18	1	70 km/h, 2000 ot/min, 4. rychl. st.
32	0,8	značka D1
42 - 44	0,5 - 0,6	stání
52	2	80 km/h, 3000 ot/min, 3. rychl. st.
55	2	90 km/h, 2200 ot/min, 4. rychl. st.
61 - 67	1,3 - 2,2	drážky na vozovce
72	1,6	zrychlování na 130 km/h, 2500 ot/min, 5. rychl. st.
74	1,9	130 km/h, 2800 ot/min, 5. rychl. st.
96	1,8	odtud zaplátovaná vozovka
102	2,1	100 km/h, 2000 ot/min, 5. rychl. st.

Příloha č. 2, list 2/6

Grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla Škoda Fabia (JK)

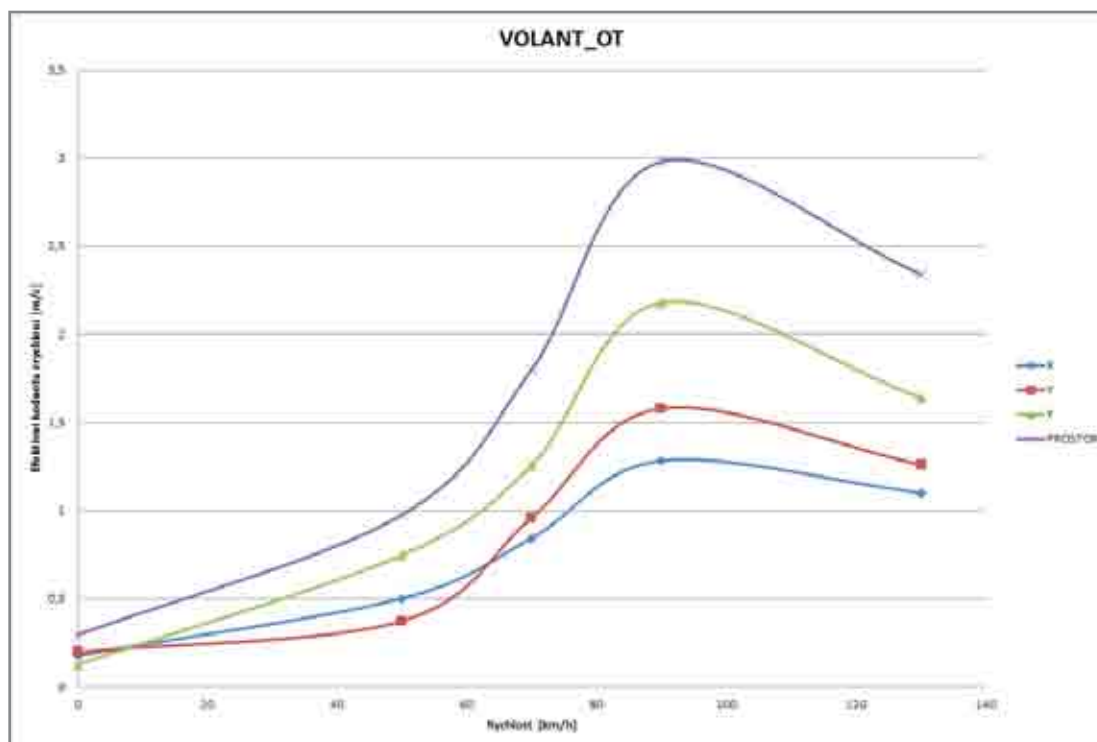
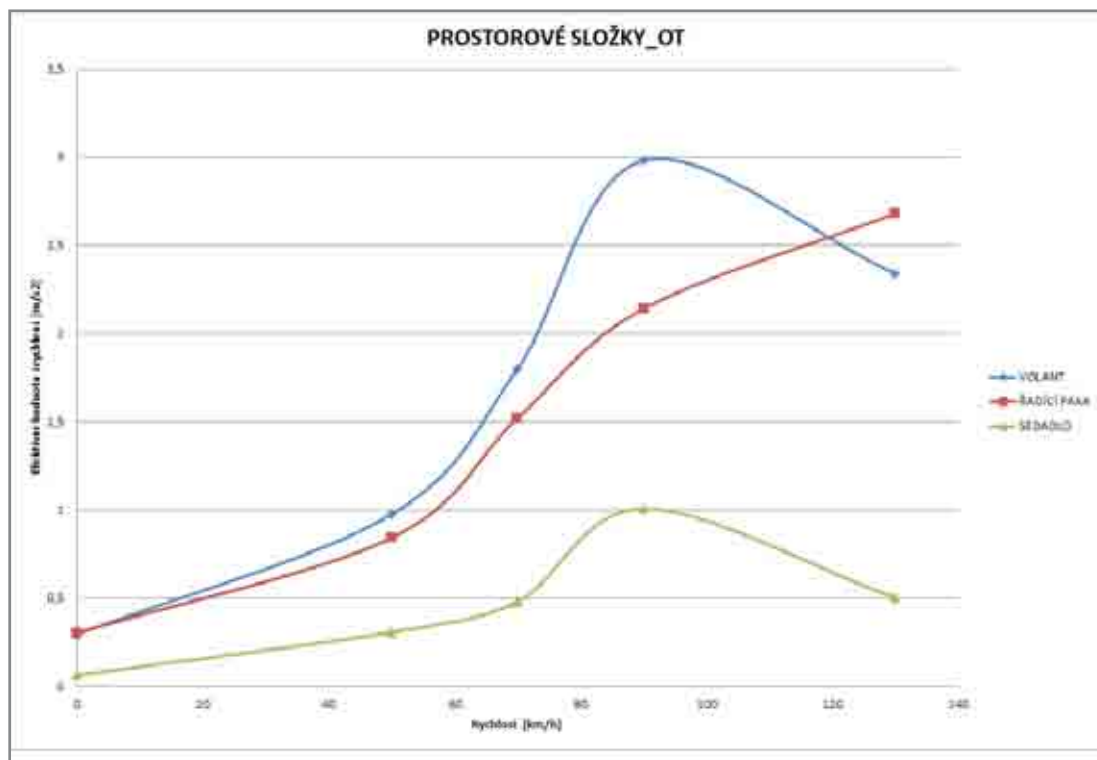


Příloha č. 2, list 2/6

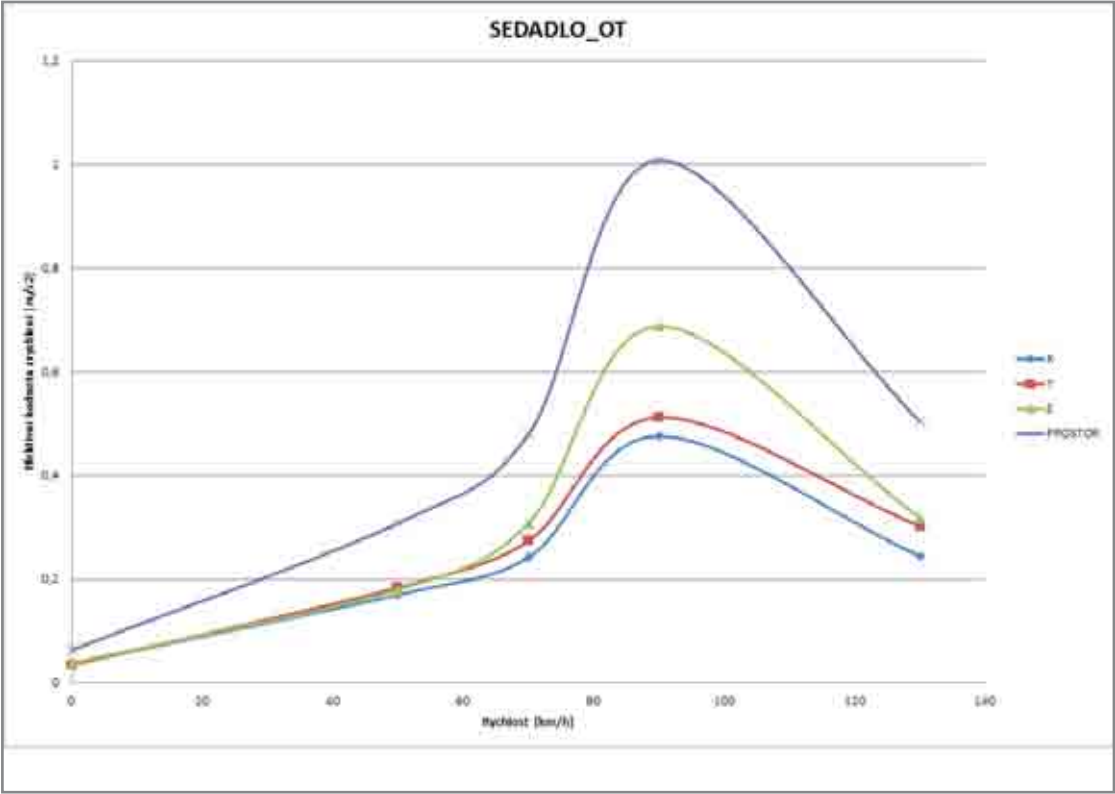
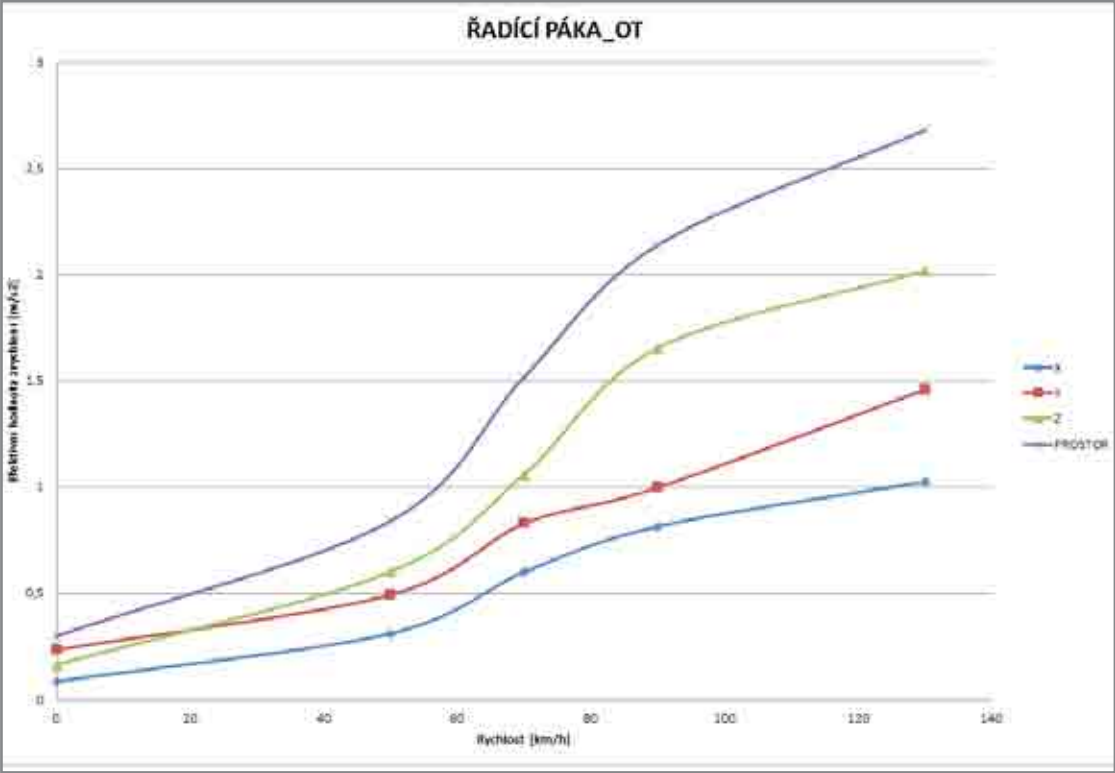


Příloha č. 2, list 3/6

Grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla Škoda Fabia (OT)

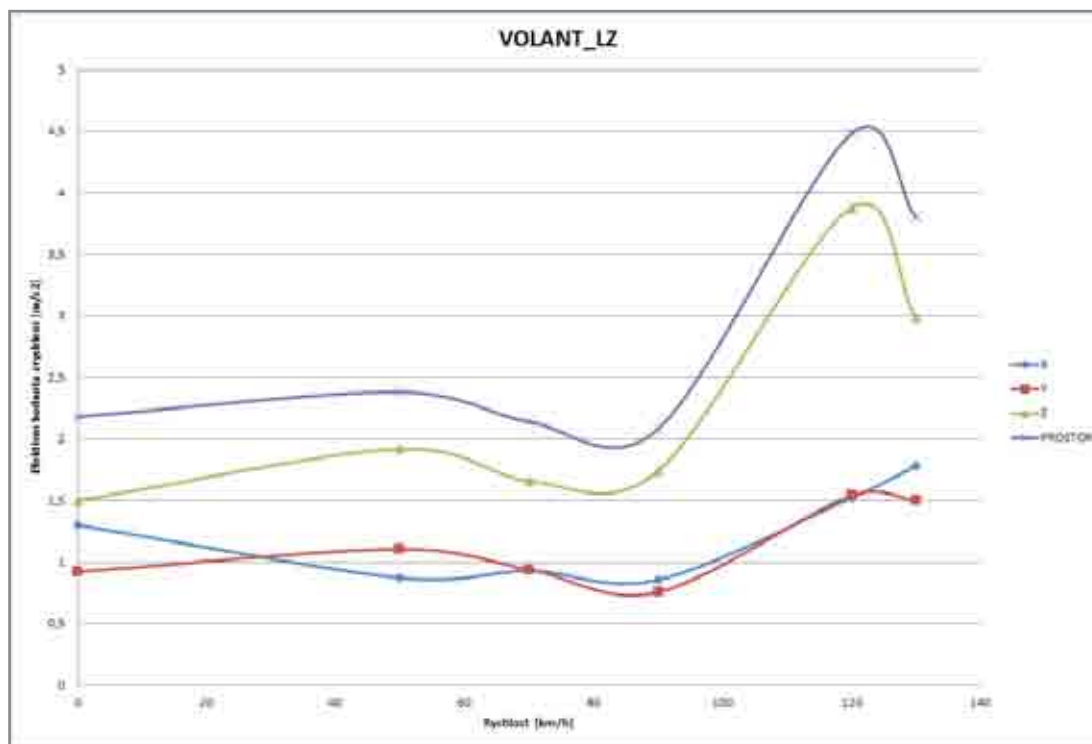
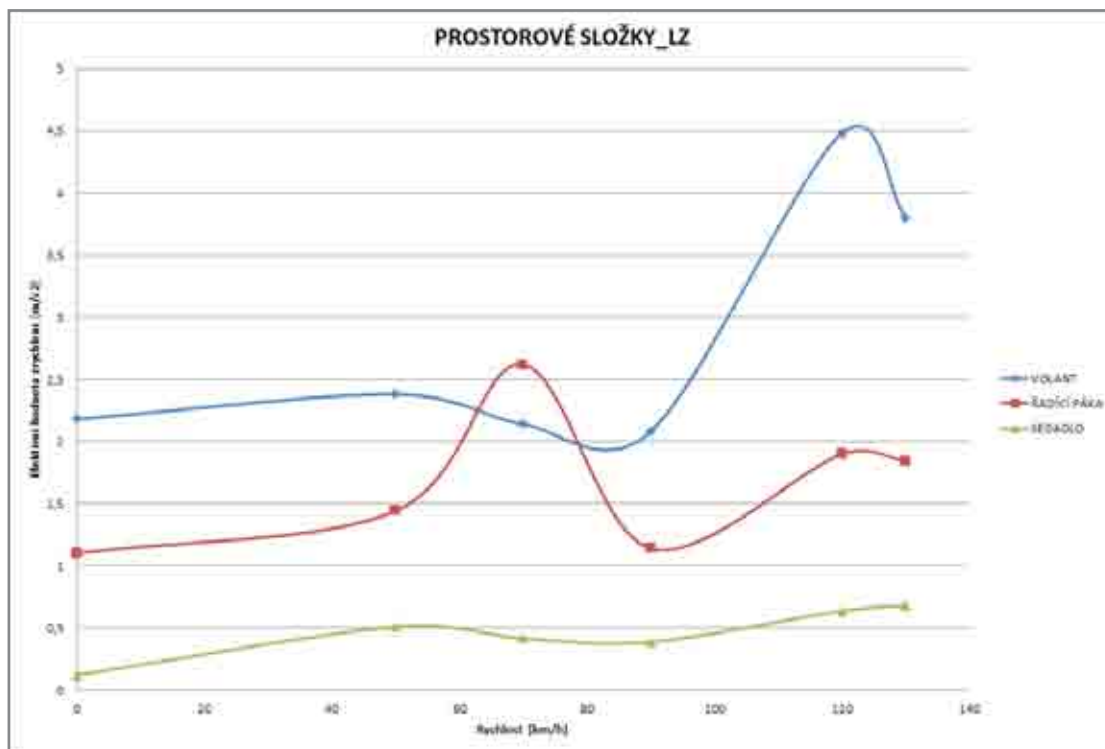


Příloha č. 2, list 3/6

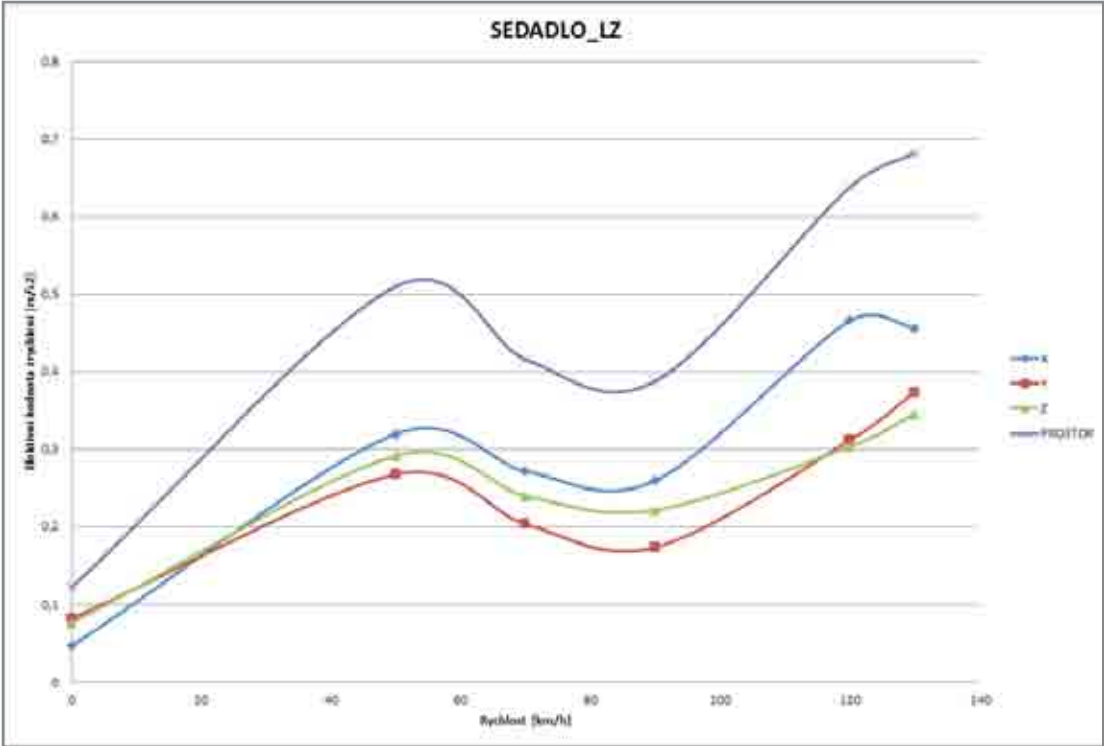
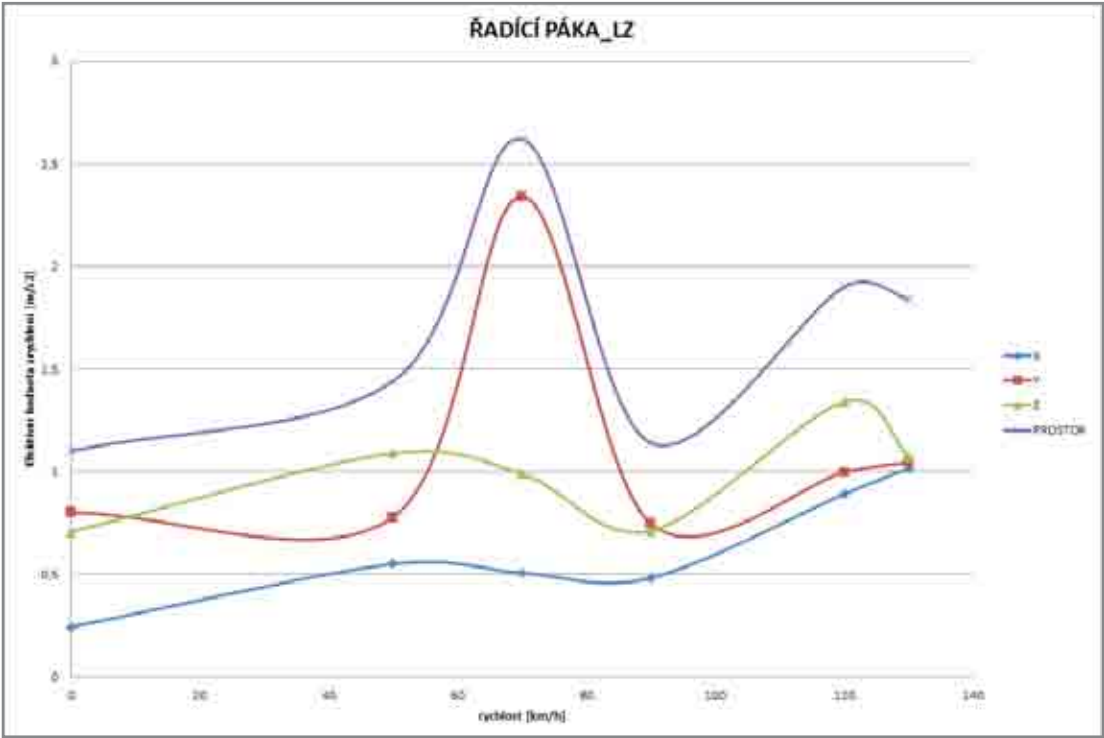


Příloha č. 2, list 4/6

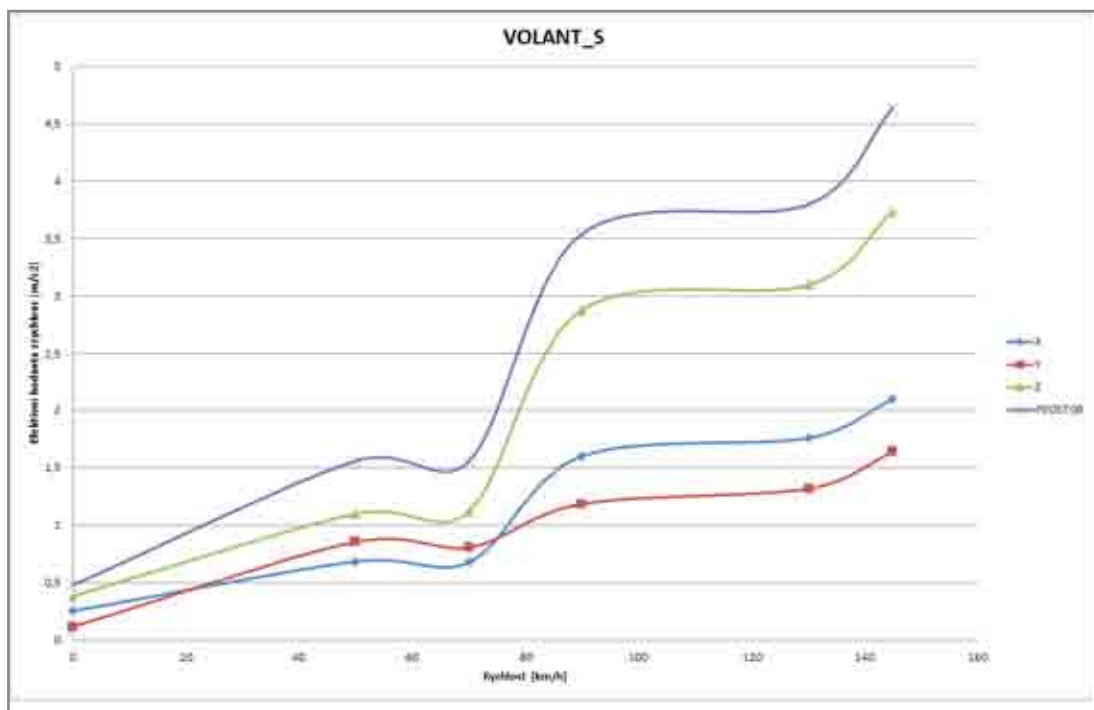
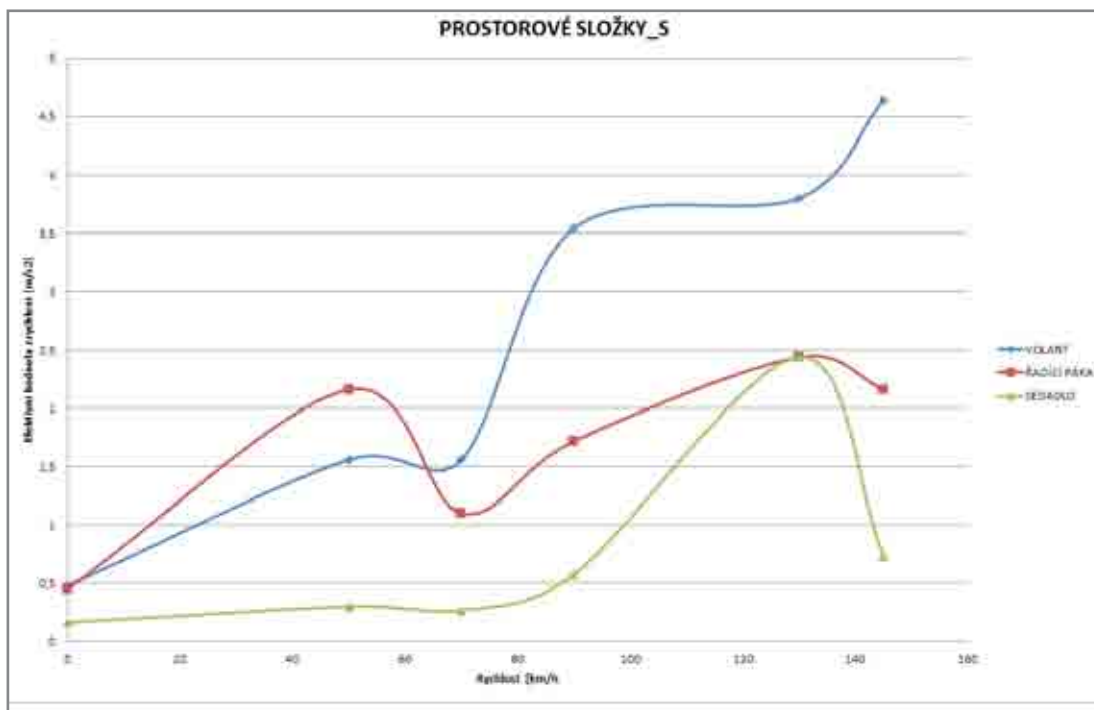
Grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla Škoda Octavia (LZ)



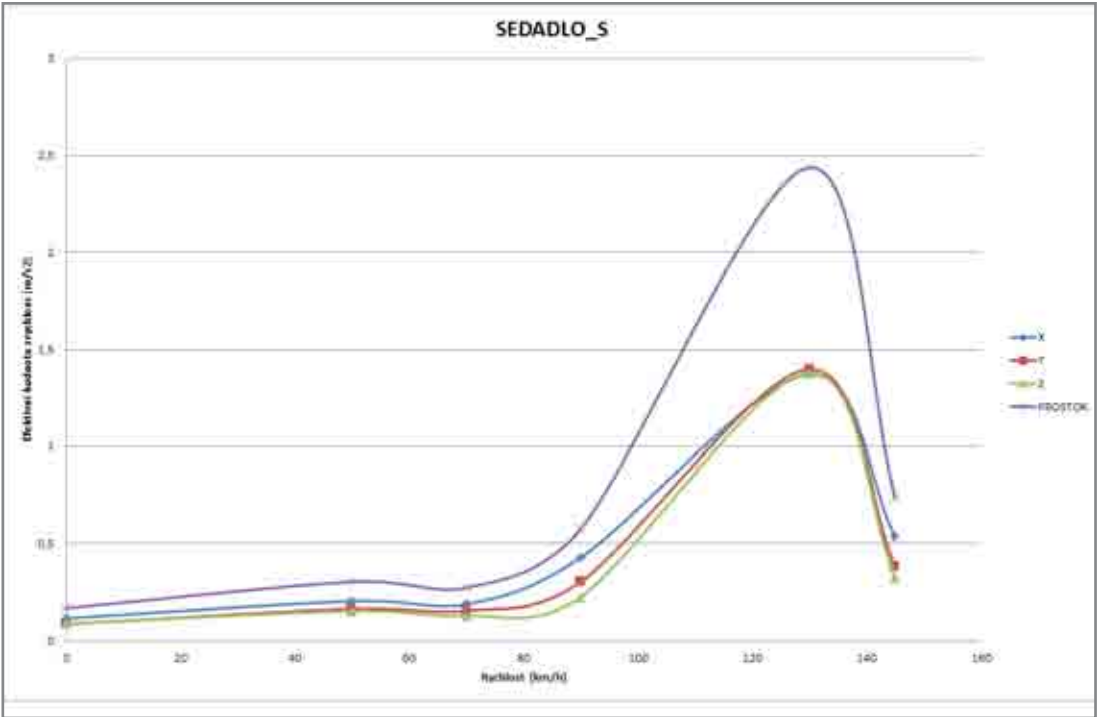
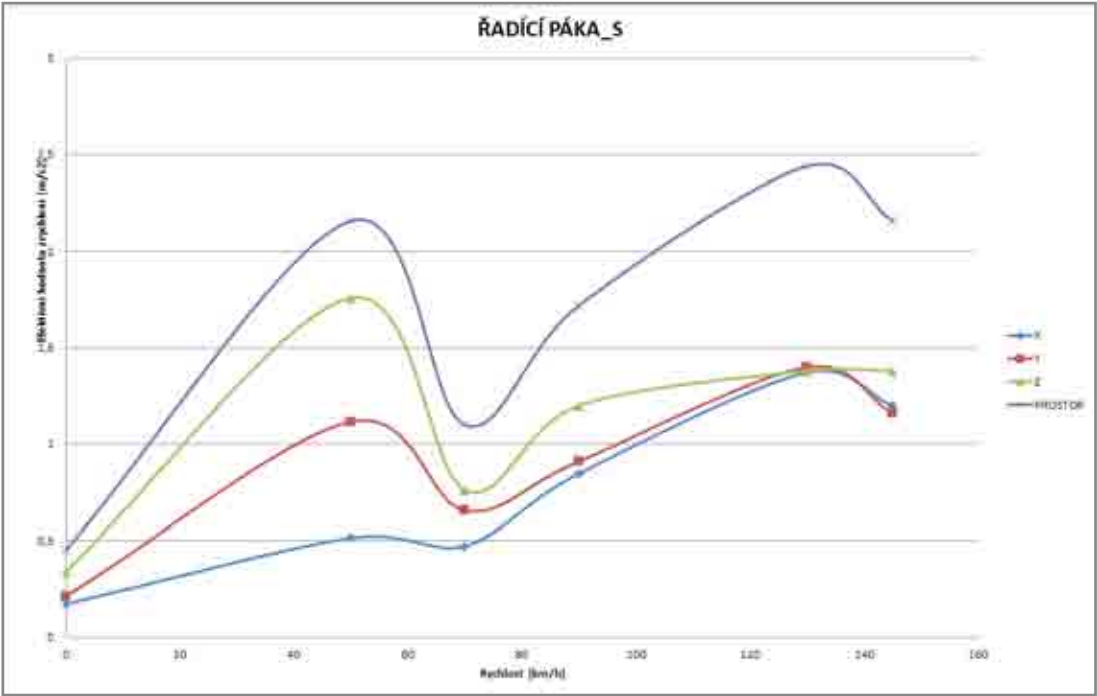
Příloha č. 2, list 4/6



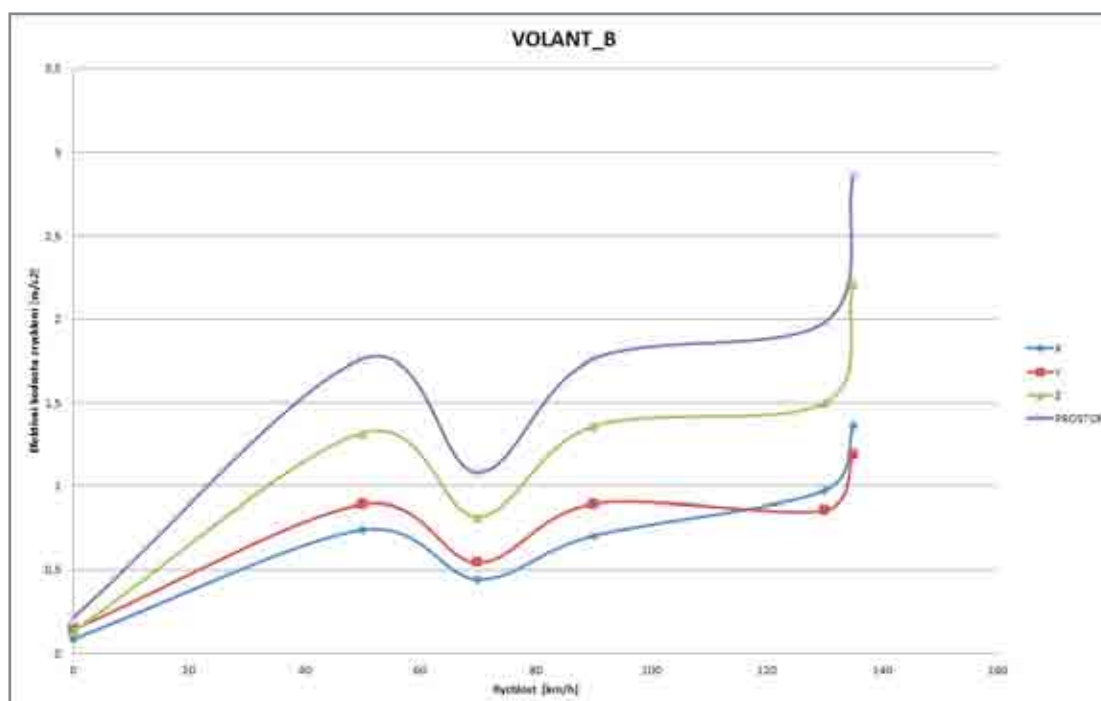
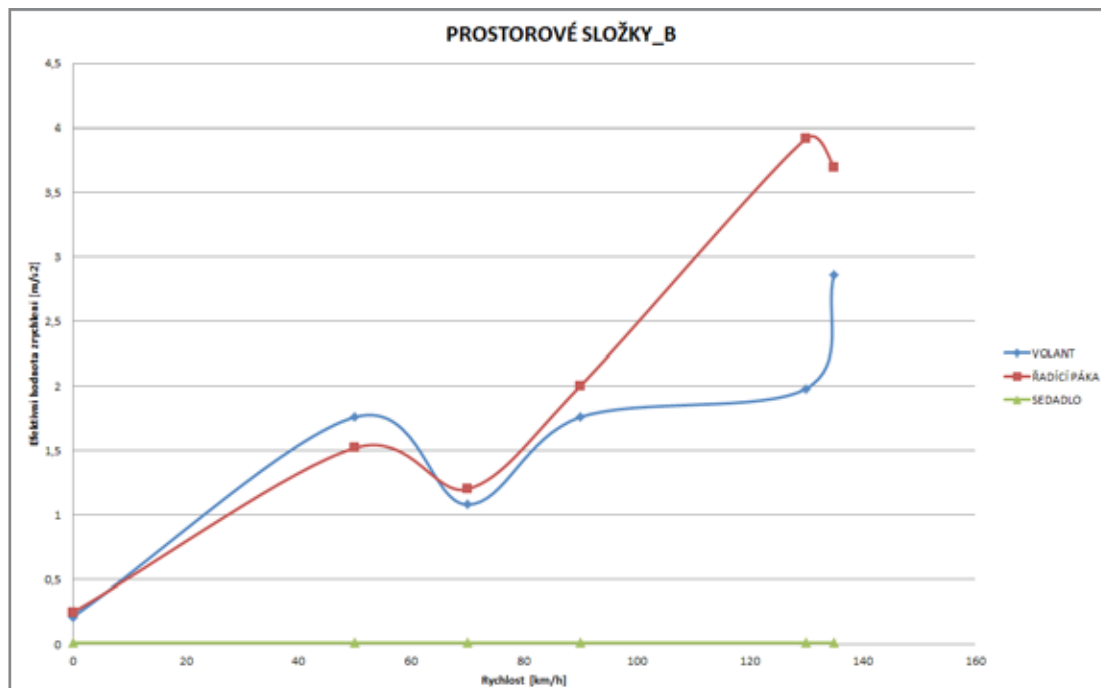
Grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla Škoda Yeti (S)



Příloha č. 2, list 5/6



Grafy závislosti efektivní hodnoty vibrací na rychlosti vozidla Škoda Yeti (B)



Příloha č. 2, list 6/6

