

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Přenos vibrací motoru motocyklu na člověka

Bc. Jiří Janovský

Diplomová práce

2011

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří JANOVSÝ**
Osobní číslo: **D09785**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury - ochrana životního prostředí v dopravě**
Název tématu: **Přenos vibrací motoru motocyklu na člověka**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

V teoretické části student popíše metodiku měření vibrací a možný vliv vibrací motoru motocyklu na člověka. Pro měření navrhne uchycení snímače. Na motocyklu provede měření vibrací dle normy pro hodnocení vlivu vibrací na člověka a naměřené hodnoty porovná se standardy pracovního lékařství a hygienickými předpisy. Dále provede měření pro zjištění přenosu vibrací motoru na jednotlivé části stroje a tyto naměřené hodnoty navzájem porovná.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] BROCH, J., T.: Mechanical Vibration and Shock Measurements, Brüel & Kjaer, 1984
- [2] BRÜEL & KJAER: Firemní literatura
- [3] BRÜEL & KJAER: Sensors for Vibration Measurement and Machine Monitoring, 2004
- [4] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: Technická diagnostika a spolehlivost II - Vibrodiagnostika. Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2004
- [5] JANOUŠEK, I., KOZÁK, J., TARABA, O.: Technická diagnostika, SNTL, 1988
- [6] LÁNSKÝ, M., MAZÁNEK, J.: Diagnostika a informační diagnostické systémy I, Univerzita Pardubice, 1998
- [7] SMETANA, C. a kol.: Hluk a vibrace - Měření a hodnocení, Praha, 1998
- [8] TŮMA, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT, Praha, 1997
- [9] ČSN zabývající se vibracemi a jejich vlivem na člověka

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Kukla, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2011**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

Ing. Ivo Šefčík, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2011

Prohlašuji

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 19.5.2011

Jiří Janovský

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu **ing. Pavlu Kuklovi, Ph.D.**, který jako vedoucí této práce věnoval spoustu úsilí pro realizaci vibračních měření na DFJP, paní **ing. Marcele Livorové** za její vstřícný přístup a cenné rady a v neposlední řadě i mojí **rodině**, která mě při studiu ochotně podporovala.

ANOTACE

Práce se zabývá analýzou vlivu motocyklových vibrací na člověka. Kompletně popisuje všechny teoretické i praktické záležitosti týkající se procesu měření vibrací a bere v úvahu veškeré vlivy vstupující do této problematiky. Naměřená data jsou následně podrobena výpočtům dle platných norem a legislativních předpisů.

KLÍČOVÁ SLOVA

vibrace, motocykl, hygienické limity, diagnostická analýza

TITLE

The Transference of Motorcycle Engine Vibrations to Human Body

ANNOTATION

The paper analyzes the impact of motorcycle vibrations on humans. The thesis describes in great detail theoretical and practical issues concerning the process of measuring the vibrations and the paper also considers the factors influencing these issues. The measured data are then calculated within applicable standards and legislative requirements.

KEYWORDS

vibration, motorcycle, hygienic limit, diagnostic analysis

Obsah

Úvod	9
1. Základní informace a definice	10
1.1. Vibrace	10
1.2. Vliv vibrací na člověka	11
1.3. Konkrétní vlivy na zdraví.....	15
1.3.1. Celkové vibrace.....	15
1.3.2. Vibrace přenášené na ruce.....	16
1.4. Vliv na pohodlí a vnímání.....	18
1.4.1. Nemoc z pohybu.....	19
1.5. Technické normy související s vibracemi	20
1.6. Legislativa související s vibracemi	20
1.6.1. Směrnice č. 2002/44/ES	20
1.6.2. Zákon č. 148/2006.....	21
1.7. Faktory ovlivňující účinky expozice člověka vibracím	22
2. Měřicí technika a postupy měření.....	23
2.1. Snímače vibrací	23
2.2. Třísosý piezoelektrický akcelerometr	24
2.3. Impaktor sedací části těla	26
2.4. Uchycení snímačů	27
2.5. Vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů	30
2.5.1. Přechodové změny teploty	30
2.5.2. Posun nulové úrovně	30
2.5.3. Fázový posuv.....	31
2.5.4. Další rušivé vlivy	31
2.6. Analyzátor Brüel & Kjær typ 3560 – platforma PULSE	32
2.7. Analyzátor vibrací lidského těla Brüel & Kjær typ 4447	33
2.8. Příslušenství a měřiče okolních podmínek.....	35
2.8.1. Kabeláž.....	35
2.8.2. Měřiče okolních podmínek.....	35
3. Přenos vibrací k lidskému tělu - experiment	36
3.1. Předmět měření - motocykl Yamaha FZS 600.....	36
3.2. Obecné informace k přenosu vibrací na člověka	36
3.2.1. Celkové vibrace.....	37
3.2.2. Vibrace přenášené na ruce.....	37
3.3. Volba měřicích míst	37
3.4. Uchycení snímačů	39
3.4.1. Motor.....	39
3.4.2. Rám	40
3.4.3. Řídítka	40

3.4.4. Sedadlo	42
3.4.5. Stupačky	43
3.4.6. Přilba	43
3.4.7. Metodika měření	44
3.5. Stav motocyklu.....	44
3.6. Vnější podmínky	45
3.7. Provozní podmínky	45
4. Zpracování a analýza naměřených dat.....	47
4.1. Požadavky na upravení signálu	47
4.2. Definice činitele výkmitu a jeho použití	47
4.3. Hodnocení vibrací z pohledu směrnice č. 44/2002/ES	47
4.3.1. Vibrace přenášené na ruce.....	47
4.3.2. Celkové vibrace.....	48
4.4. Fourierova transformace	48
4.5. Omezení pásma a frekvenční vážení.....	49
4.5.1. Celkové vibrace.....	50
4.5.2. Vibrace přenášené na ruce.....	52
4.6. CPB analýza, třetinooktávová analýza.....	54
4.7. Základní metoda hodnocení vibrací	54
4.8. Vztah mezi expozicí vibracím a účinky na zdraví	55
4.9. Kombinování vibrací ve více než jednom směru	55
4.9.1. Celkové vibrace.....	55
4.9.2. Vibrace přenášené na ruce.....	56
4.10. Výsledky	56
4.10.1. Celkové vibrace z hlediska posouzení vlivu na zdraví	56
4.10.2. Celkové vibrace z hlediska posouzení vlivu účinků na pohodlí	58
4.10.3. Vibrace přenášené na ruce – posouzení možnosti vzniku bělení prstů.....	63
4.11. Analýza dat z pohledu legislativy	65
4.11.1. Pohled směrnice č. 44/2002	65
4.11.2. Pohled zákona č. 148/2002.....	65
5. Závěr	68
Použitá literatura.....	69
Seznam tabulek.....	71
Seznam obrázků.....	72
Seznam zkratk.....	73
Seznam příloh.....	74

Úvod

Na ochranu zdraví při práci se v posledních letech bere jistě vyšší zřetel, než tomu bylo v minulosti. Zejména v zahraničí jsou vyvíjeny aktivní projekty pro prevenci vzniku poškození tělesného aparátu v pracovním prostředí a předcházejí tak vzniku vážných nemocí.

Využití motocyklů během obvyklé práce je dnes běžnou součástí některých povolání. Příkladem mohou být poštovní doručovatelé, policisté, kurýrní služby, nebo jiné formy dopravy materiálu, zboží, nebo osob. Motocykl v této souvislosti můžeme brát jako pracovní nástroj, při jehož provozu vznikají vibrace, které se přenášejí na řidiče či spolujezdce. Podobně jako na pracovní nářadí (vrtačky, brusky, apod.) nahlížíme i na motocykl, který prostřednictvím rukojetí, stupaček a sedadla vytváří intenzivní kmitání různých částí těla.

Cílem této práce je objektivně posoudit, zda vibrace přenášené na různé části lidského těla u běžného silničního motocyklu nepřekračují limitní hodnoty a jakým způsobem mohou mít vliv na zdraví a pohodlí řidiče. Tato analýza má za úkol nejen posoudit vliv vibrací, ale kompletně popsat veškeré postupy, technické záležitosti a vnější vlivy vstupující do procesu měření. Důležitou částí je stanovení vhodných provozních podmínek, které budou reprezentovat reálný provoz. Metodika měření se dle technických norem obecně stanovuje pro dva typy vibrací - celkové vibrace a vibrace přenášené na ruce.

Pro výpočty a srovnávání naměřených hodnot je nutné využití mimo platných technických norem také legislativních předpisů, které se touto problematikou zabývají. V České republice se jedná o zákon č. 148/2006 a z evropského pohledu Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 44/2002/ES.

1. Základní informace a definice

1.1. Vibrace

Vibrace = mechanické kmitání kolem rovnovážné polohy. [1]

Jednoduché kmitání se definuje amplitudou a frekvencí. Podle názvoslovné normy ISO 2041 vibrace představují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy [2].

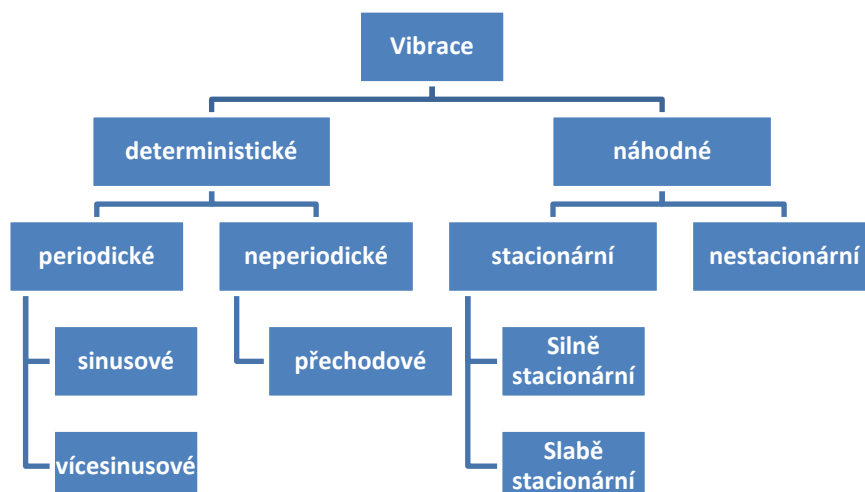
Hodnoty veličin mechanických vibrací jsou dány budící silou, jejím směrem a kmitočtem. Vibrace lze popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. Vibrace tělesa jsou dány kombinací šesti pohybů, a to posunem v ortogonální soustavě souřadnic x , y , z a rotací kolem os x , y , z neboli mechanický systém má šest stupňů volnosti.

Vlna je změna vlastností nebo fyzikálního stavu prostředí šířící se v tomto prostředí a přenášející energii, aniž by současně docházelo k přemísťování prostředí. U těles jednotlivé body prostředí kmitají s různou výchylkou a fázovou rychlostí a jev se šíří postupnými vlnami pružným prostředím.

Vibrace jsou zapříčiněny dynamickým namáháním stroje, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, nevývahou rotujících částí, nesouosostí, vůlemi pohybových součástí, stykem třecích ploch, střetem dvou navzájem pohybujících se těles (rázy), apod.

Velikost vibrací může být vyjádřena rychlostí, zrychlením nebo ryvem kmitavého pohybu (ryv: vektor udávající časovou derivaci zrychlení), z praktických důvodů se nejčastěji používá zrychlení, měření vibrací patří k nástrojům užitečným při snižování hluku [2,4].

Vibrace můžeme rozdělit dle časového průběhu, jak je naznačeno na obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení vibrací dle časového průběhu

Mechanické rázy = jsou charakteristické náhlou změnou směru, síly, rychlosti kmitavého děje. U motocyklů se vyskytují např. při náhlém průjezdu větších nerovností, u některých typů motorů při řazení rychlostních stupňů (odezva převodovky), apod.

Z hlediska jízdního pohodlí je rozhodující svislé zrychlení, které působí na řidiče a spolujezdce. Náhodné vibrace se vyjadřují:

- ve tvaru spektra znázorňujícího velikost vibrací na kmitočku,
- efektivní hodnotou vibrací uvnitř stanoveného pásma kmitoček.

Při měření vibrací, pro posouzení jejich vlivu na člověka, je nutná znalost pouze určitých frekvenčních pásem. Při takových měřeních se určuje efektivní hodnota vibrací v pásmu kmitoček korigovaných příslušnou váhovou funkcí dané způsobem a směrem přenášených vibrací. Výsledkem je poté celková vážená hodnota vibrací.

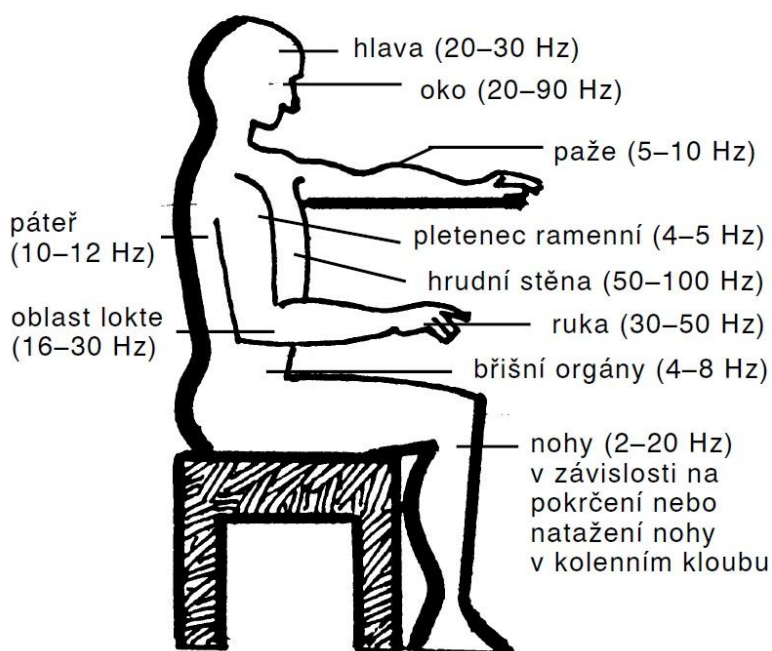
1.2. Vliv vibrací na člověka

Pokud mluvíme o přenosu vibrací na člověka, jedná se o **otřesy** lidského organismu. Velikost lidského vjemu je určena nejen kmitočtem ale i rychlostí kmitavého pohybu.

Cestující v dopravních prostředcích jsou vystaveni vibracím a otřesům, které mohou ovlivňovat, ale hlavně zhoršovat, organické funkce a také způsobovat zdravotní poškození. Tímto nežádoucím působením dochází u řidiče k únavě, která ovlivňuje jeho výkon a reakční schopnosti, což zvyšuje také nebezpečí vzniku dopravní nehody.

Při působení vibrací na lidské tělo záleží na tom, jaká frekvenční pásma jsou v daném spektru dominantní. Různé části lidského těla rezonují při jiných hodnotách budící frekvence.

Pokud k rezonanci dojde, může taktéž dojít při delším působení k závažným zdravotním poruchám a problémům.



Obr. 2 Znázornění rezonančních frekvencí lidského těla [10]

Vnímání vibrací s $f < 15$ Hz zajišťuje vestibulární aparát, který určuje odezvu člověka na zrychlení hlavy, celkové vibrace těla a jeho polohu v prostoru. Vibrace s $f > 15$ Hz vnímají receptory na tlak, které se nacházejí v měkkých tkáních a v kůži.

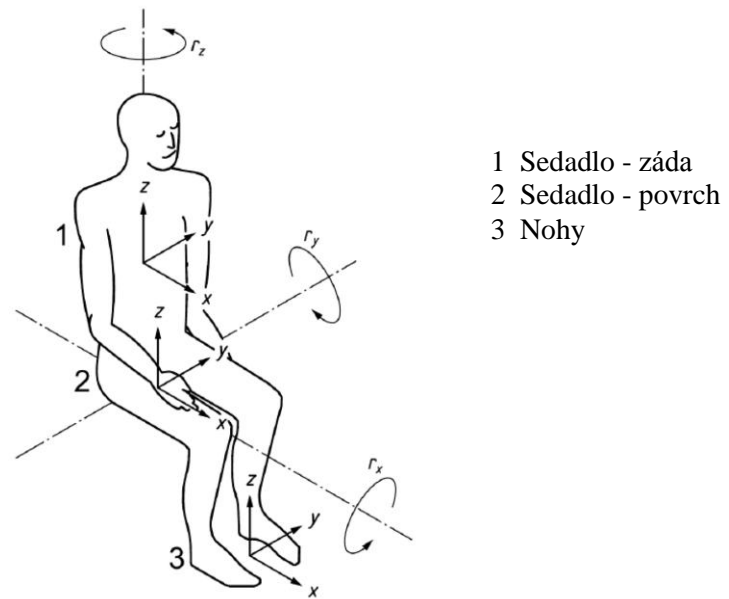
Vystavení intenzivním vibracím je spojeno s nepříjemným vjemem nepohody. Dlouhodobé působení takovýchto vibrací může vyvolat trvalé poškození zdraví. V našem případě je u motocyklu jezdec vystaven vibracím, které se přenášejí zejména z řídítek, stupaček a sedadla. Místní vibrace přenášené na ruce působí na periferní cévy, nervy horních končetin a svalově-kloubní aparát. Nejlépe dokumentovány a nejsnadněji pozorovatelné jsou tzv. bílé prsty způsobené expozicí vibrací. Podle těchto účinků se stanovují příslušné limity vibrací, které zohledňují zajištění komfortu jízdy a zdraví přepravovaných osob [2].

Obecně lze říci, že každá část těla a tkáň rezonuje s jinou frekvencí vibrací a při určitém kmitočtu dochází v orgánech a tkáních k zesílení účinku. Účinek je vázán na druh vibrací, které se dělí podle způsobu přenosu:

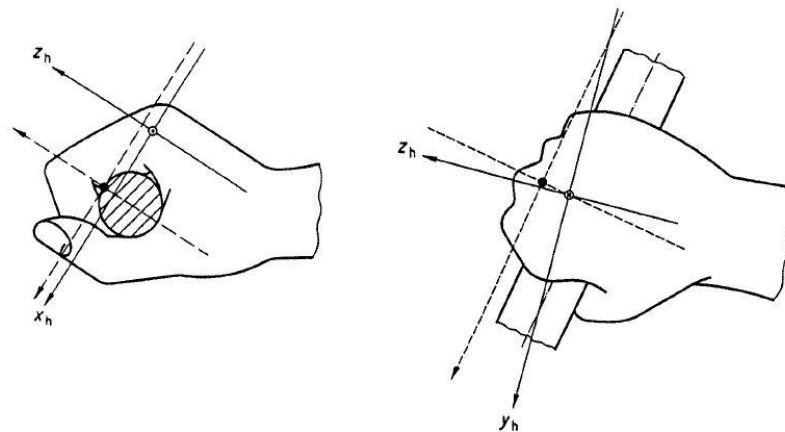
- celkové vibrace přenášené na sedící či stojící osobu z vibrujícího sedadla nebo plošiny způsobují rezonance částí těla nebo tkání, zvýšené napětí svalů udržujících tělo ve stabilní poloze, mají nepříznivý vliv na páteř,
- celkové vibrace v budovách – působí především rušivě, a to i v tom případě, že se nepřenáší přímo. Stačí pohyb zavěšených předmětů apod.,
- celkové vertikální vibrace o frekvenci nižší než 1 Hz, zejména pak o kmitočtu 0,3 – 0,6 Hz, vyvolávají tzv. kinetózy, které se projevují nevolností, zvracením, bledostí apod.,
- místní vibrace přenášené na ruce při práci s vibrujícími nástroji jsou nejčastější a z hlediska zdravotního nejzávažnější. Způsobují poškození:
 - a) kostí, kloubů, šlach a svalů,
 - b) onemocnění cév,
 - c) postižení nervů,
- místní vibrace přenášené zvláštním způsobem působí na část těla, k němuž zdroj přiléhá a kam se vibrace přenáší. Např. křovinořez – stehno, malá pánev; motorový nosič – páteř, případně hlava apod.

Výzkum i různé studie poskytly důkazy o zvýšeném riziku poškození zdraví v důsledku dlouhodobé expozice celkovým vibracím s vysokou intenzitou. Postiženy mohou být především bederní oblast a nervová soustava v úseku zad. Někdy se předpokládá, že k bolesti svalů mohou přispívat faktory prostředí, jako je poloha těla, nízká teplota a průvan. Není však známo, zda tyto faktory mohou přispívat k degeneraci meziobratlových destiček a obratlů.

Pro posouzení směrových účinků vibrací byly stanoveny soustavy souřadnic lidského těla a ruky, ve kterých se vibrace měří (viz. obr. 3 a obr. č. 4).



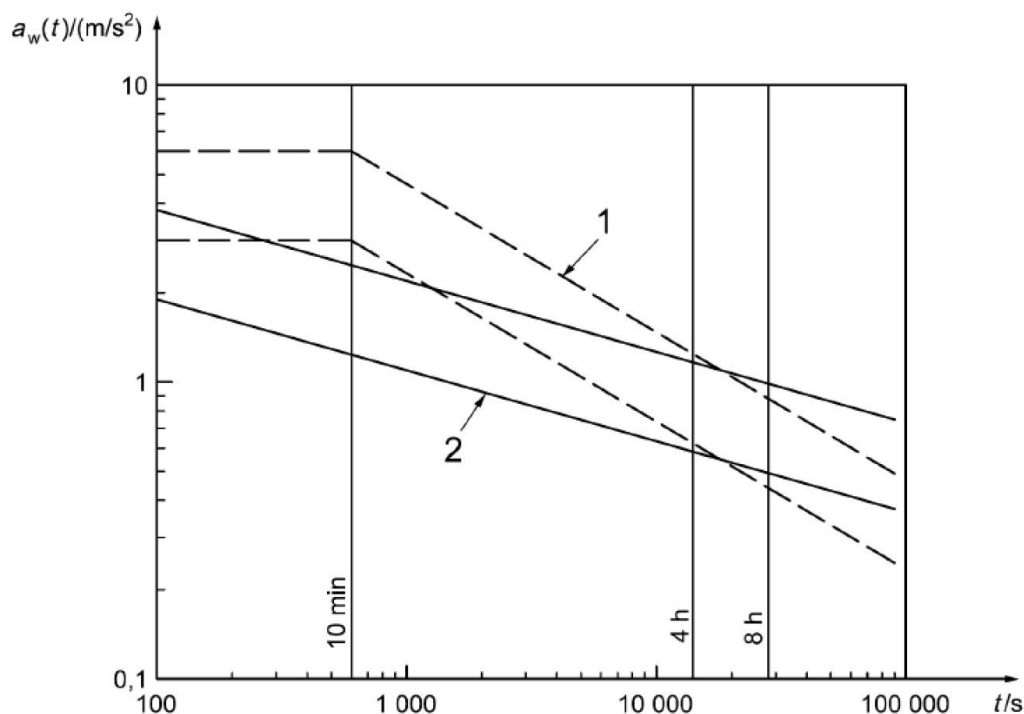
Obr. 3 Soustava souřadnic lidského těla při poloze vsedě [6]



Obr. 4 Soustava souřadnic ruky [7]

Delší doba trvání a vyšší intenzita vibrací znamenají zvýšenou dávku vibrací a uvažují se tak, že zvyšují riziko, zatímco klidové intervaly riziko snižují.

Pro uvedení kvantitativního vztahu mezi expozicí vibracím a rizikem zdravotních účinků nejsou dostatečné údaje. Není proto možné posuzovat celkové vibrace ve tvaru pravděpodobnosti rizika při různých velikostech a dobách trvání expozice [6].



Legenda

- $a_w(t)$ vážené zrychlení, logaritmická stupnice
- t doba expozice, logaritmická stupnice

Obr. 5 Směrná pásma ohrožení zdraví [6]

Na obrázku č. 5 je směrné pásmo ohrožení zdraví vyznačeno čárkovanými úsečkami. V případě expozic nacházejících se pod tímto pásmem nebyly zdravotní účinky jasně dokumentovány nebo objektivně pozorovány. V tomto pásmu se indikuje opatrnost vzhledem ke zdravotním rizikům a nad tímto pásmem je zdravotní riziko pravděpodobné.

1.3. Konkrétní vlivy na zdraví

1.3.1. Celkové vibrace

Normou ČSN ISO 2631-1 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka vibracím – Část 1: Všeobecné požadavky (dále jen ISO 2631-1) jsou popisovány účinky na zdraví sedících osob, protože účinky na osoby stojící, nakloněné nebo ležící nejsou známy. Pro přenos vibrací přes sedadlo na člověka se bere v úvahu frekvenční pásmo 0,5 Hz až 80 Hz.

Dlouhodobé působení celkových vibrací může způsobit zvýšené zdravotní riziko v bederní oblasti a nervové soustavy v postiženém úseku zad. To může být v důsledku dynamického chování zad: horizontální dislokace a torze úseku bederní páteře. Nadměrné mechanické namáhání může přispět k degenerativním procesům v lumbální oblasti. Expozice celkovým vibracím může také zhoršit určitá patologická postižení zad vnitřního původu.

Ačkoliv se očekává, že dávka vibrací bude mít vztah ke zdravotnímu účinku, v současnosti tomu tak není.

Obecně se zdravotní účinky dostavují po několika letech od působení vibrací. Proto je důležitá reprezentativnost vzorku po celou dobu expozice [6].

1.3.2. Vibrace přenášené na ruce

Problematikou vibrací přenášených na ruce se zabývá norma ČSN EN ISO 5349-1 Vibrace – Měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce – Část 1: Všeobecné požadavky (dále jen ISO 5349-1). Zdrojem těchto vibrací přenášených na ruce mohou být různá mechanizovaná nářadí, která se používají v zemědělství, v lomech, v lesnictví, apod. Stejně tak jejich původcem mohou být ovládací prvky dopravních prostředků jako volant automobilu, nebo řídítka motocyklu.

Odhaduje se, že 1,7% až 3,6% pracovníků v Evropě a USA je vystaveno škodlivým vibracím přenášeným na ruce. K popisu komplexu postižení cév, nervů, pohybového aparátu se používá termín „vibrační syndrom ruky a paže“. Tato postižení jsou v mnoha zemích odškodňována jako nemoc z povolání a jsou zařazena do evropského seznamu nemocí z povolání.

- Postižení cév – zblednutí nebo zbělení prstů. Toto postižení, způsobené dočasným přerušením oběhu krve v prstech se nazývá Ryanaudův fenomén. Záchvaty bělení postihují nejprve konečky jednoho nebo více prstů, avšak s pokračující expozicí vibracím se bělení může rozšířit ke kořenům prstů. Po záchvatech někdy dochází k cyanóze – zmodrání. To je způsobeno odčerpáváním kyslíku při zpomaleném oběhu krve v prstech. Tento jev je častější v zimě než v létě a trvají od několika minut až po více než jednu hodinu. Při pokračujících expozicích se záchvaty stávají častějšími a mohou se vyskytovat po celý rok. Během záchvatů mohou pracovníci pociťovat úplnou ztrátu citlivosti a zručnosti pohybu. Mezinárodně uznávaná stupnice ze stockholmského semináře (1986) popisuje klasifikaci chladem navozeného Ryanaudova syndromu,

Tab. 1 Stupnice ze Stockholmského semináře (1986) [7]

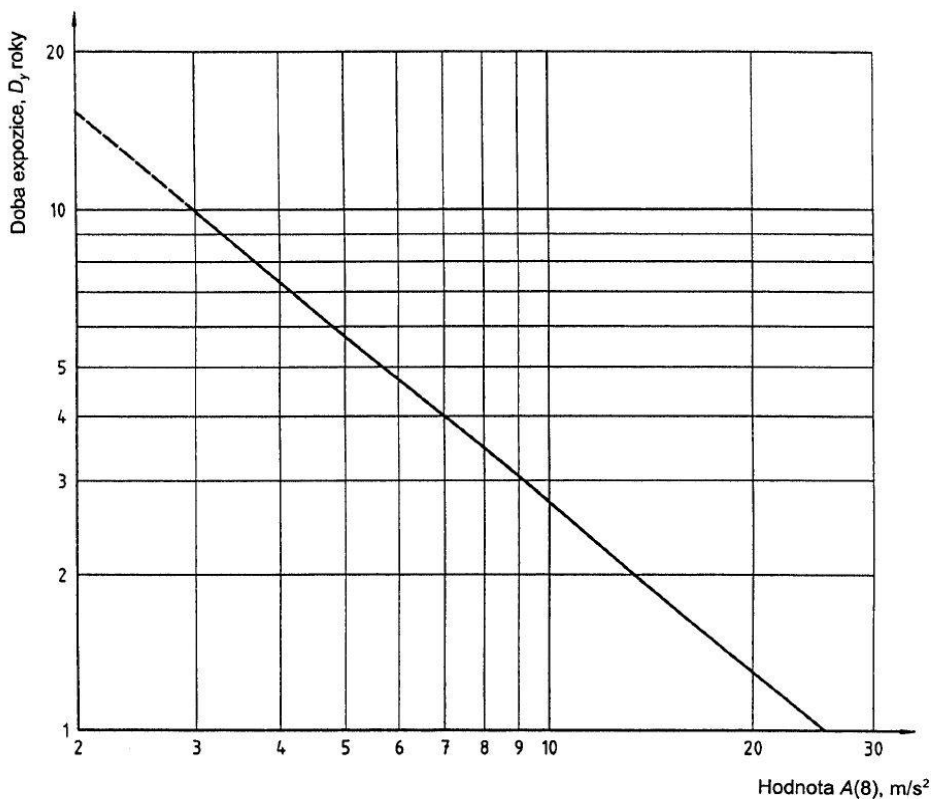
Složka cévní		
Stadium	Stupeň	Popis
0	-	Bez záchvatů.
1 _v	Mírný	Řidce se vyskytující záchvaty postihující jen konečky jednoho nebo více prstů.
2 _v	Střední	Řidce se vyskytující záchvaty postihující distální, střední (zřídka také proximální) články jednoho nebo více prstů.
3 _v	Silný	Časté záchvaty postihující všechny články u většiny prstů.
4 _v	Velmi silný	Jako ve třetím stádiu ale s trofickými změnami na konečcích prstů.
Složka sensorineurální		
Stadium	Popis	
0 _{SN}	Osoba exponována vibracím ale bez příznaků.	
1 _{SN}	Občasný pocit tuposti doprovázený mravenčením nebo bez něho.	
2 _{SN}	Občasný nebo trvalý pocit tuposti, snížení citlivosti.	
3 _{SN}	Občasný nebo trvalý pocit tuposti, snížené taktilní rozlišení a/nebo snížená zručnost.	

- Neurologické poruchy – pracovníci mohou pociťovat mravenčení a tupost v prstech a rukou. Důsledkem pokračujících expozičních vibrací mohou být poruchy citlivosti prstů a zhoršení jemné motoriky. Epidemiologická šetření ukazují, že ztráta citlivosti postihuje kolísavě od několika procent až po 80% exponovaných pracovníků. Výzkumy dále prokázaly, že ergonomické stresory působící na ruku a zápěstí mohou v kombinaci s vibracemi u pracovníků používajících vibrující nářadí způsobit CTS – syndrom karpálního tunelu,
- Kosti a klouby – Studie odhalily vysoký výskyt kostních cyst (dutina v kosti) v kostech rukou a zápěstí pracovníků exponovaných vibracím. Jedná se zejména o expozici rázům a nízkofrekvenčnímu kmitání < 50 Hz. (např. pneumatické úderné stroje). Co se týká středních a vysokých frekvencí, existuje jen málo důkazů o vlivu na zdraví. V některých zemích se poruchy kostí a kloubů považují za profesionální onemocnění a odškodňují se,
- Svaly – Pracovníci si mohou stěžovat na svalovou bolest, slabost a sníženou sílu, slabý stisk ruky. Může se vyskytnout také zánět šlach nebo poškození vazivových tkání ve dlani ruky [7].

Pravděpodobnost výskytu jakéhokoliv poškození však je závislá na citlivosti jedince, jeho vnímavosti, jeho zdravotním stavu, prodělaných chorobách, fyzické kondici, prostředí, apod. Byly uskutečněny pokusy odhadnout ve skupině osob expozici vibracím potřebnou ke vzniku bělení prstů. Jedná se o závislost denní expozice vibracím (8 hod.), která se odhaduje za původce bělení prstů u 10% z exponovaných osob.

Tab. 2 Hodnoty expozice vibracím A(8), u nichž lze očekávat vyvolání bělení prstů [7]

D_y , počet let	1	2	4	8
$A(8)$, m/s^2	26	14	7	3,7



Obr. 6 Expozice vibracím k 10% prevalenci bělení prstů vyvolaného vibracemi [7]

1.4. Vliv na pohodlí a vnímání

Pokud posuzujeme vliv na pohodlí, očekáváme výborný zdravotní stav člověka. Vztah mezi velikostí vibrací a pohodlím člověka nelze nijak přesně matematicky vyjádřit. Současné normy uvádějí návody, jakým jednotným způsobem je vhodné uvádět subjektivní intenzity vibrací, nikoliv však nejvyšší přípustné hodnoty.

Podmínky vibrací mohou být v jedné situaci považovány za příčinu nepříjemného nepohodlí, v jiné situaci mohou působit osvěžujícím a příjemným dojmem. Přesné posouzení a formulování nejvyšších přípustných hodnot lze provést jen velmi obtížně a je nutné znát mnoho faktorů.

Účinky vibrací na pohodlí člověka se hodnotí pomocí frekvenčně vážené efektivní hodnoty zrychlení reprezentativního intervalu. Norma ISO 2631 uvádí přibližné údaje

pravděpodobných reakcí na různé velikosti celkových souhrnných hodnot vibrací ve veřejné dopravě. Při různých velikostech závisí reakce na očekáváních exponovaného člověka ve vztahu k době trvání jízdy a mnoha dalších faktorech (hluk, teplota, atd.)

Tab. 3 Vliv vibrací na pohodlí člověka [6]

Nižší než $0,315 \text{ m/s}^2$	Nejsou nepohodlné
$0,315 \text{ m/s}^2$ až $0,63 \text{ m/s}^2$	Trochu nepohodlné
$0,5 \text{ m/s}^2$ až 1 m/s^2	Příjemně nepohodlné
$0,8 \text{ m/s}^2$ až $1,6 \text{ m/s}^2$	Nepohodlné
$1,25 \text{ m/s}^2$ až $2,5 \text{ m/s}^2$	Velmi nepohodlné
Vyšší než 2 m/s^2	Extrémně nepohodlné

1.4.1. Nemoc z pohybu

Pohyb na frekvencích v rozmezí 0,1 - 0,5 Hz může způsobit různé nežádoucí účinky včetně nepohodlí a rušení činností. Měří a hodnotí se pouze pohyb v ose z. Tento pohyb může primárně nejčastěji způsobit nemoc z pohybu v polohách vestoje a vsedě. Metody pro posuzování těchto jevů by se měly určovat zejména na lodích a jiných námořních plavidlech.

V praxi se obvykle zabrání vzniku nemoci z pohybu držením nebo položením hlavy na konstrukci, která se pohybuje se sedadlem. Je pravděpodobné, že se riziko sníží při polohách vleže, ale není zatím jasné, zda to vzniká v důsledku toho, že vertikální pohyb je v ose x těla nebo že v této poloze dochází k menšímu pohybu hlavy.

Tato dílčí kapitola pouze shrnuje všechny možné důsledky a vlivy na člověka, dále se však práce nemocemi z pohybu a kinetózami nezabývá.

1.5. Technické normy související s vibracemi

- ČSN ISO 2631-1 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 1999. 36 s.
- ČSN ISO 2631-5 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 5: Metoda hodnocení vibrací obsahujících sdružené rázy. Praha: Praha: Český normalizační institut, 2005. 28 s.
- ČSN EN ISO 5349-1. Vibrace – Měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce – Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2002. 32 s.
- ČSN EN ISO 5349-2 Vibrace – Měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce – Část 2: Praktický návod pro měření na pracovním místě
- ČSN ISO 5982 Vibrace a rázy – Rozsah idealizovaných hodnot k charakterizování biodynamické odezvy lidského těla v poloze vsedě při působení vertikálních vibrací. Praha: Český normalizační institut, 2003. 32 s.
- ČSN ISO 2041 Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník

1.6. Legislativa související s vibracemi

1.6.1. Směrnice č. 2002/44/ES

- Nezkrácený oficiální název směrnice: Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/44/ES ze dne 25. června 2002 (dále jen Směrnice č. 2002/44/ES)
- Tato směrnice stanovuje minimální požadavky a umožňuje tak členským státům zachovat nebo přijmout příznivější ustanovení na ochranu zaměstnanců, zejména stanovení nižších hodnot pro denní hodnotu vyvolávající akci nebo pro denní limitní hodnotu expozice vibracím.
- Požadavky směrnice se vztahují na činnosti, při kterých zaměstnanci jsou nebo by mohli být při práci vystaveni rizikům mechanických vibrací.
- „Vibracemi působícími na soustavu ruka-paže“ se rozumějí mechanické vibrace, které jsou přeneseny soustavu ruka-paže a zahrnují rizika pro zdraví a bezpečnost zaměstnanců, zejména cévní, kostní a kloubní, nervové a svalové poruchy.

- „Vibracemi působícími na celé tělo“ se rozumějí mechanické vibrace, které jsou přeneseny na celé tělo a zahrnují rizika pro zdraví a bezpečnost zaměstnanců, zejména zádové bolesti a poškození páteře [16].

Tab. 4 Limitní hodnoty vibrací dané směrnicí 44/2002/ES [16]

	Vibrace soustavy ruka-paže	Vibrace působící na celé tělo
Denní limitní hodnota expozice normalizovaná na osmihodinovou referenční dobu	5 m/s ²	1,15 m/s ²
Hodnota dávky vibrací	-	21 m/s ^{1,75}
Denní hodnota expozice vyvolávající akci normalizovaná na osmihodinovou referenční dobu	2,5 m/s ²	0,5 m/s ²
Hodnota dávky vibrací	-	9,1 m/s ^{1,75}

1.6.2. Zákon č. 148/2006

Název zákona: Zákon č. 148/2006 - Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací (dále jen zákon č. 148/2006)

Toto nařízení upravuje a zpracovává předpisy Evropských společenství a upravuje hygienické limitní hodnoty vibrací a hluku. Metodika zpracování dat je od směrnice 44/2002/ES odlišná.

U vibrací přenášených na ruce zaměstnanců se přípustný expoziční limit vztahuje k souhrnné hodnotě translačních vibrací stanovených z vážených hodnot zrychlení ve třech navzájem kolmých směrech podle souřadné soustavy ruky.

Tab. 5 Limitní hodnoty vibrací dané zákonem č. 148/2006 [17]

	Souhrnná vážená hodnota zrychlení
Vibrace přenášené na ruce	$a_{ha,8h} = 1,4 \text{ m.s}^{-2}$
Vibrace přenášené zvláštním způsobem na zaměstnance způsobující intenzivní kmitání v horní části páteře a hlavy	$a_{ew,8h} = 0,1 \text{ m.s}^{-2}$
Vibrace celkové – vertikální a horizontální	$a_{ew,8h} = 0,315 \text{ m.s}^{-2}$

Přípustný expoziční limit celkových vibrací se vztahuje na ustálené i proměnné vibrace a otřesy nebo rázy, pokud hlavní část jejich energie je obsažena ve sledovaném kmitočtovém pásmu.

Celkové vibrace rovnoběžné s podélnou osou těla se posuzují způsobem platným pro vertikální vibrace ve směrech kolmých na podélnou osu těla způsobem platným pro horizontální vibrace.

Hygienický limit vibrací pro jinou než osmihodinovou pracovní dobu

Hygienický limit průměrných vážených hodnot zrychlení vibrací pro jinou pracovní dobu T než 480 minut (8h) se stanoví tak, že se přípustný expoziční limit $a_{ew,8h}$ nebo $a_{ha,8h}$ vynásobí činitelem k_T , který se stanoví podle vztahu

$$k_T = \frac{480}{T} \quad [-] \quad (1)$$

kde k_T je korekční činitel,

T pracovní doba, po kterou vibrace působí na člověka.

Při měření vibrací včetně jejich výpočtu a při hodnocení hluku a vibrací se postupuje podle metod a terminologie týkajících se oborů elektroakustiky, akustiky a vibrací, obsažených v příslušných českých technických normách. Při jejich dodržení se výsledek považuje za prokázaný [17].

1.7. Faktory ovlivňující účinky expozice člověka vibracím

Mezi faktory ovlivňující expozici člověka vibracím patří:

- a) Směr přenášených vibrací,
- b) metoda práce, zručnost obsluhy,
- c) věk jednotlivce, tělesné dispozice, zdravotní stav,
- d) délka intervalu, po který je člověk vibracím vystaven, počet přestávek,
- e) síla stisku ruky, opěrná síla v rukách,
- f) polohy rukou, nohou, úhly pokrčení v loktech, v kolenou, předklon těla, apod.,
- g) vnější podmínky – klimatické, hlukové a jiné rušivé elementy,
- h) látky, které ovlivňují krevní oběh – nikotin, kofein, apod. [7].

2. Měřicí technika a postupy měření

2.1. Snímače vibrací

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejuvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání. Existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu:

- Seismická zařízení, která se normálně montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce,
- Snímače relativní výchylky, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy,
- Existují jistá měření na strojích, která vyžadují jiné typy snímačů, jako jsou tenzometry. Však jejich použití pro monitorování vibračního stavu je méně obvyklé.

Vlastní výběr odpovídajících snímačů závisí na dané aplikaci, tzn. měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda měříme absolutní nebo relativní vibrace, zda provádíme měření nízkofrekvenčních, či běžných frekvenčních vibrací, apod. Takže snímače pro monitorování stavu vibrací jsou pak následující:

- Akcelerometry – jejich výstup může být zpracován tak, aby dal libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Obecně se akcelerometry montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Jsou dostupné s různými montážními rezonančními frekvencemi, v typickém případě od 1kHz výše. Obecně se doporučuje, aby lineární rozsah namontovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence.

Rezonanční frekvence je definována jako frekvence, při níž existuje rezonance. Rezonance je stav soustavy při vynuceném kmitání, kdy jakkoliv malá změna frekvence buzení vyvolá pokles odezvy soustavy [1].

Jsou dostupné v různých velikostech. Jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem a širokým frekvenčním rozsahem. Jsou přednostně používány v aplikacích s malými objekty majícími malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. Typický akcelerometr obsahuje jeden nebo několik

piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle.

- Snímač rychlosti vibrací, jehož výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Obecně se snímače rychlosti montují na stacionární konstrukci stroje. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívku, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.
- Bezdotyková sonda, jejíž výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje [4].

2.2. Třiosý piezoelektrický akcelerometr

Tento typ absolutního senzoru vibrací funguje na principu přímého piezoelektrického jevu, při němž deformací krystalické látky dochází k elektrické polarizaci čidla. Tento jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalové mřížky. Hodnota elektrické polarizace je číselně rovna vázanému náboji na jednotkové ploše povrchu orientovanému kolmo ke směru vektoru polarizace. Pro piezoelektrické elementy akcelerometrů se používá modifikace křemene (SiO_2 , piezokeramiky (BaTiO_2 , PZT keramika), pro extrémní teploty LiNbO_3 a některé piezoelektrické polymery (PVC, PVDF).

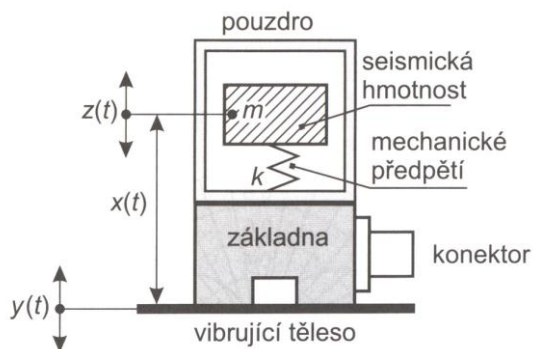
Umístíme-li na povrchu elementu elektrody, indukují se na nich volné náboje Q . Piezoelektrický element je ve své podstatě kondenzátor o kapacitě C . Pro elektrické napětí na elektrodách platí vztah:

$$U = \frac{Q}{C} \text{ [V]} \quad (2)$$

kde Q je náboj [C],

C kapacita [F].

Za předpokladu, že spojení akcelerometru s povrchem měřeného tělesa má nekonečnou hodnotu tuhosti a pokud zanedbáme tlumení a předpětí, lze použít model na obr. 7 [3].



Obr. 7 Model piezoelektrického akcelerometru

Pro naše měření byl využit snímač firmy Bruel & Kjaer DeltaTron® typ 4506. Jedná se o miniaturní snímač s robustní titanovou konstrukcí s integrovaným konektorem typu Microtech. Jejich využití je zejména v automobilovém průmyslu. Mezi jeho hlavní charakteristiky patří:

- Možnost pěti způsobů uchycení,
- Jednoduchá měření na různých površích a objektech díky několika druhům montážním úchytů (v našem případě byl využit montážní klip BK 4506 – viz obr. 12),
- Titanová konstrukce s konektorem 4-pin,
- Díky designu OrthoShear® má snímač výborný poměr citlivost/hmotnost,
- Nízká výstupní impedance umožňuje použití dlouhých kabelů,
- Zabudovaný nízko šumový předzesilovač [12].



Obr. 8 Tříosý piezoelektrický akcelerometr Brüel & Kjaer typ 4506 [13]

Tab. 6 Parametry piezoelektrického snímače BK 4506

Frekvence	0.6 - 3000 Hz
Teplota	-54 - 100 °C
Hmotnost	15 gram
Citlivost	100 mV/g
Maximální pracovní úroveň (peak)	70 g
Konektor	4-pin
Způsob uchycení	Klip
Výstup	IEPE
Třisměrový	Ano
Rezonanční frekvence	9.5 kHz
Maximální úroveň zatížení	5000 g

2.3. Impaktor sedací části těla

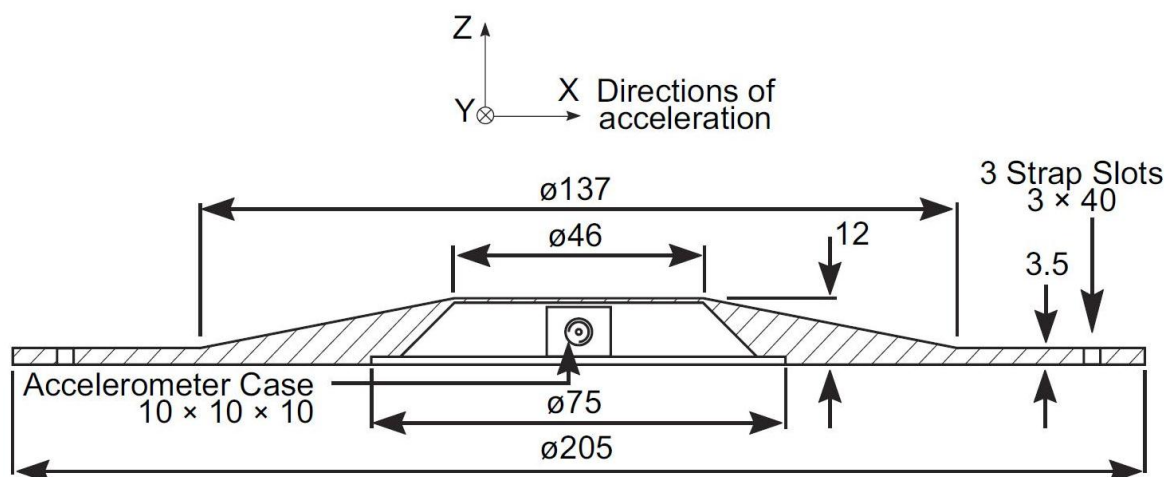
Pro měření celkových vibrací je nutné využití speciálně upraveného snímače vibrací, který je možné zatížit vahou řidiče motocyklu. Tomuto zařízení se říká impaktor sedací části lidského těla. Pro potřeby našich měření byl využit snímač Brüel & Kjær typ 4515-B.



Obr. 9 Impaktor sedací části lidského těla – Brüel & Kjær typ 4515-B [14]

Mezi jeho hlavní charakteristiky patří:

- Zcela vyhovuje normě ISO 2631,
- Vyjímatelný třiosý akcelerometr zabudovaný do gumové podložky,
- Nízká výstupní impedance,
- Vysoké rozlišení (100mV/g) [14].



All dimensions in millimetres

Obr. 10 Řez impaktorem a jeho rozměry [14]

Tab. 7 Technické parametry impaktoru BK 4515-B [14]

Frekvence	0.25 - 900 Hz
Pracovní teplota	-10 - 70 °C
Hmotnost	350 g
Citlivost	100 mV/g
Maximální pracovní výchylka (peak)	500 g
Resonanční frekvence	2700 Hz
Maximální šokové zatížení	5000 g

2.4. Uchycení snímačů

Správné měření vibrací strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímače, tzn. rozhoduje **přípevnění snímačů**. Doporučený způsob uchycení závisí na přístupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Způsob uchycení nejvýrazněji ovlivní frekvenční odezvu snímače, zejména při měření na vysokých frekvencích [4].

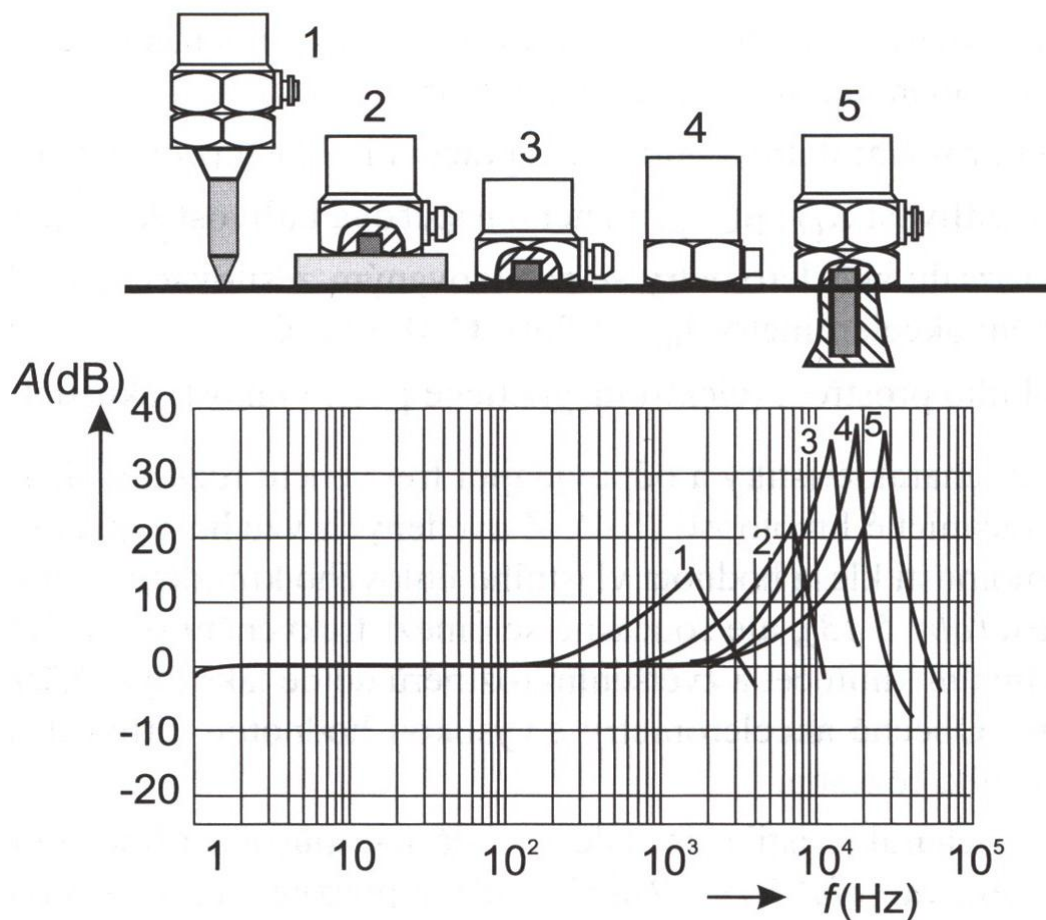
Pro zajištění správného snímání je nutno splnit některé požadavky, které vyplývají ze způsobu přípevnění a z vlastností snímače:

- velký dynamický rozsah,
- široký kmitočtový rozsah,

- zanedbatelný účinek rušivých vlivů (teplota, hluk, elektromagnetické pole, aj.),
- nízké zkreslení výstupního signálu,
- stabilita v čase.

Způsob přichycení ovlivňuje zejména kmitočtový rozsah. Některé způsoby připevnění jsou znázorněny na obr. 11):

- šroubové spojení – číslo 5,
- včelí vosk, nebo přímé přilepení lepidlem – předpokládá se rovinný tvar stykové plochy – může způsobit problém při demontáži - číslo 4,
- přilepená kovová podložka se šroubem – číslo 3,
- magnet – předpokládá se feromagnetický a hladký povrch objektu – číslo 2,
- ruční sonda – je použitelná pouze pro orientační měření – číslo 1 [2,12].



Obr. 11 Způsoby přichycení snímače a jejich rezonanční frekvence [3]

Tab. 8 Požadavky na některé parametry snímačů [2]

Parametr	Požadavek
Rezonanční kmitočet	Výrazně (nejméně 5x) vyšší než horní mezní kmitočet měření
Hmotnost	Hmotnost snímače včetně úchyty musí být nejméně 10x nižší než hmotnost vyšetřované soustavy
Těžiště	Těžiště připevnění snímače má být nad těžištěm zdroje vibrací

Způsob přichycení akcelerometru k měřenému objektu ovlivňuje značnou měrou hlavně snímání kmitočtový rozsah vibrací, jak je naznačeno na obr. 11. Nejvýhodnější metoda připevnění snímače je pomocí šroubového spojení. Přitom je třeba dodržet kolmost osy díry k povrchu zařízení. Odchytky od řádného způsobu připevnění mohou vyvolat odchylky v měření. Jistou nevýhodou jsou možné potíže při měření otřesů a vibrací o vyšších kmitočtech.

Velice dobré vlastnosti vykazuje při připevnění snímače včelí vosk, kdy dosahujeme rezonanci na kmitočtech vyšších než 20 kHz. Toto připevnění však nelze použít na místech, kde je vyšší povrchová teplota.

Přenosové vlastnosti snímačů připevněných pomocí lepidla velice závisí na druhu a tvrdosti lepidla. Základní rezonance je na kmitočtech nad 10 kHz. Obdobné přenosové vlastnosti má oboustranná lepicí páska s tím, že při měření v pásmu kmitočtů 1-5 kHz může dojít k nepřijatelnému amplitudovému zkreslení. Připevnění pomocí magnetu má dobré přenosové vlastnosti do 1,5 kHz.

Ve všech případech platí, že hmotnost zatěžující měřený objekt má být nejméně 10 krát nižší než hmotnost vibrující, měřené části. Již při poměru hmotnosti 1:10 dochází k prokazatelnému zkreslení signálu snímaných vibrací.

Technika připevnění snímače musí být vždy optimalizována s ohledem na požadovaný kmitočtový rozsah měření, odhadované hladiny zrychlení vibrací, velikosti budících sil a mechanické vlastnosti posuzovaného zařízení. Pro mechanické soustavy, vyšetřované v pásmu nad 500 Hz, je vždy nutné navrhnout optimální způsob připevnění snímače. U složitějších mechanických soustav je třeba ověřit techniku připevnění snímače měření na více místech soustavy [4].

K připevnění snímače byl využit montážní klip znázorněný na obr. 12. Jeho hmotnost je 2,1 gramu a při jeho použití je omezena horní hranice jeho frekvenčního rozsahu na 2kHz [12].



Obr. 12 Montážní klip Brüel & Kjær typ 4506

Ve všem měřicích místech na motocyklu byla podmínka pětinasobného odstupu frekvenčního rozsahu měření od rezonanční frekvence splněna. Konkrétní způsob uchycení snímačů je popsán a znázorněn v kapitole 3.4.

2.5. Vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů

Mezi vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů, které je nutné uvést v souvislosti s vibračními měřeními, které se provádí na základě této práce, patří následující podkapitoly. Vzhledem k rozsahu práce se však podrobnější analýzou nezabýváme, je zde však předpoklad, že žádný z těchto jevů nebyl tak výrazný, aby měření ovlivnil.

2.5.1. Přechodové změny teploty

Při náhlé změně teploty produkuje piezoelektrický snímač na výstupu elektrický signál. Prudké změny teploty se mohou vyskytnout uvnitř testovaného objektu nebo mohou být vyvolány prouděním vzduchu. Výstupní elektrický signál může být vyvolán pyroelektrickým jevem nebo mechanickým namáháním krystalu v důsledku změny teploty. V podstatě se jedná o vznik náboje vyvolaného rychlou změnou teploty.

Při měření v oblastech zvýšené teploty, tzn. na motocyklovém rámu v těsné blízkosti motoru, kde se teplota pohybovala na úrovni cca 70-80 °C, bylo nutné nechat snímač tepelně přizpůsobit.

2.5.2. Posun nulové úrovně

Posun nulové úrovně představuje nepříjemný jev, vyskytující se při měření vibrací s vysokou hodnotou činitele výkmitu. Činitel výkmitu je poměr výkmitu k efektivní hodnotě

amplitudy. Projevuje se změnou nulové úrovně výstupního signálu z vibračního snímače bezprostředně po výskytu otřesu [2].

Při měření rázů nebo otřesů je proto nutné vybírat snímače s nízkou citlivostí a používat zásadně zesilovače náboje. Vždy je nutné učinit kompromis mezi požadovaným kmitočtovým rozsahem a citlivostí snímače.

V případě našich měření by tento jev neměl nastat, protože činitel výkmitu je na velmi nízké úrovni.

2.5.3. Fázový posuv

Fázový posuv je u vibračního snímače definován jako zpoždění výstupního elektrického signálu oproti mechanickému kmitání na vstupu. V praxi bývá vibrační signál komplexní a složený z velkého počtu kmitočtových složek podobně, jako je tomu u otřesů. Pokud časové zpoždění signálu není konstantní nebo se nemění lineárně s kmitočtem, pak různé kmitočtové složky signálu budou vzájemně posunuty a výstupní elektrický signál bude oproti mechanickému vstupu zkreslen. Tato vlastnost je dána konstrukcí snímače a vibrometru a v posuzovaném kmitočtovém pásmu může uživatel zpravidla zvolit posuv 0° nebo 180° .

2.5.4. Další rušivé vlivy

Účinek vlastností stíněného kabelu je v dnešní době, díky velké vstupní impedanci předzesilovačů a velkým zesilením, výrazně potlačen. Nelze však zcela zanedbat. Jev lze potlačit použitím nepoškozených kabelů a jejich řádným připevněním, aby nedocházelo k nežádoucímu kmitání. Většího odstupu od šumu lze dosáhnout snímačem s obecně vyšší citlivostí.

U stíněných kabelů se dále projevuje tzv. triboelektrický jev, který zvyšuje úroveň šumu a omezuje dynamický rozsah měření. Daný jev vzniká u kabelů částečně mechanicky poškozených tak, že se změnila vlastnost dielektrika, které odděluje živý vodič od stínění. V tomto místě se vytváří náboj, který ovlivňuje měřený signál [2].

Rušení tohoto typu je, při použití velmi kvalitních originálních kabelů dodávaných přímo se snímačem Brüel & Kjær, velmi nepravděpodobný. Kabel při našich měřeních po vizuální kontrole poškozený nebyl.

2.6. Analyzátor Brüel & Kjær typ 3560 – platforma PULSE

Pro měření bylo využito platformy PULSE™ od společnosti Brüel & Kjær. PULSE™ je platforma pro analýzu hluku a vibrací a navazuje na více než šedesáti let zkušeností a tradice v oblasti měření. S jeho širokou škálou softwarových aplikací a hardwarových konfigurací PULSE je dnes pravděpodobně nejpopulárnější řešení na světě.

Real-time schopnost analyzátorů PULSE znamená, že výsledky analýz jsou k dispozici okamžitě na displeji nebo obrazovce notebooku, tzn. že umožňuje ověřovat data okamžitě.

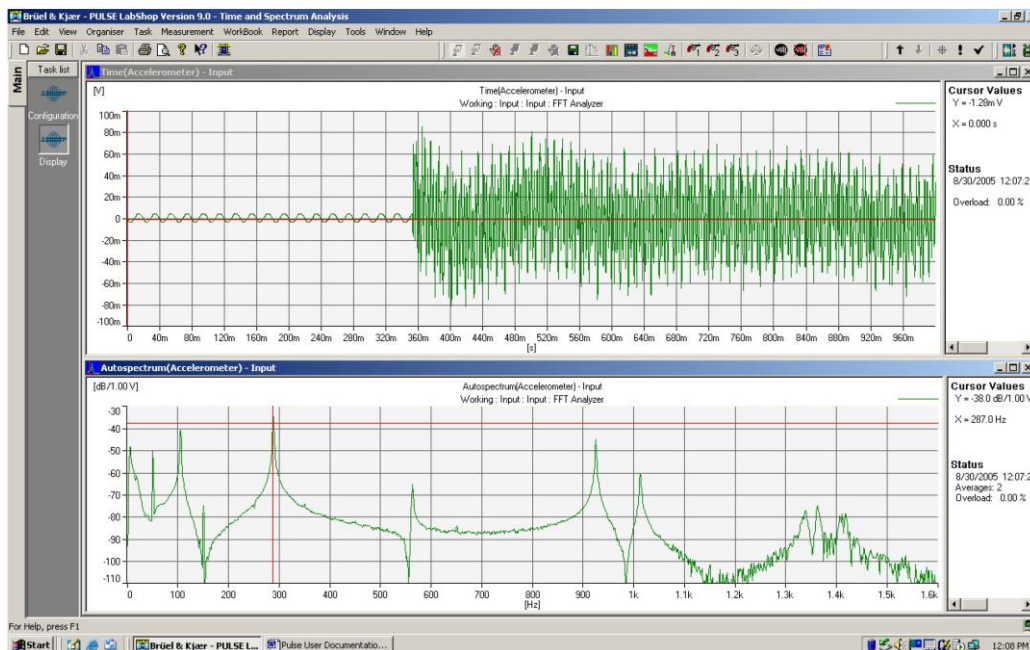
Schopnost multi-analýzy znamená, že můžeme provádět Fourierovy transformace FFT, oktákové analýzy (CPB), řazení a výběr dat a celkové analýzy současně na stejných nebo různých kanálech.

Pro naše měření byla konkrétně využita Platforma typ 3560c, kterou disponuje Univerzita Pardubice. Její jednotlivé moduly a parametry jsou uvedené v následující tabulce [12].

Tab. 9 Analyzátor Brüel & Kjær – platforma PULSE a jeho moduly

LAN Interface modul	Type 7533	Řídící modul, který posílá data přes síťový kabel RJ-45 do notebooku
6/1-ch. Input/Output modul	Type 3032A	Frekvenční rozsah 0 Hz – 25,6 kHz
Výrobní číslo	2304933	
Inventární číslo	2-005545	

Analyzátor je připojen prostřednictvím síťového kabelu RJ-45 k počítači, kde probíhá pomocí příslušného softwaru LabShop ovládání veškerých funkcí a nastavení měřicích parametrů. Aplikační prostředí platformy PULSE je znázorněno na obr. 13. Základním modulem je prostředí pro provádění FFT (rychlé Fourierovy transformace) a CPB – analýzy. Do softwaru je možno dále zakoupení zásuvných modulů, např. pro speciální filtrace, analýzy určené letadlovému/lodnímu/kosmickému průmyslu, vyhodnocení dat, apod [9].



Obr. 13 Aplikační prostředí softwaru LabShop [21]

2.7. Analyzátor vibrací lidského těla Brüel & Kjær typ 4447

Analyzátor BK 4447 je přenosný přístroj pro snadné měření a vyhodnocení účinků vibrací přenášených na člověka v pracovním a životním prostředí dle směrnice EU 2002/44/EC.



Obr. 14 Analyzátor vibrací lidského těla BK 4447 [20]

Ovládání je snadné díky čtyřem tlačítkům na předním panelu. Na barevném LCD displeji jsou zobrazovány údaje o nastavení přístroje a měřené výsledky. O napájení se stará vestavěná baterie s možností dobíjení. K analyzátoru je možné připojit jednoosý a tříosý snímač vibrací. Komunikace s PC a přenos dat je zajištěn pomocí USB rozhraní.

Mezi měřené veličiny patří:

- Průměrná vážená hodnota zrychlení (Total RMS),
- Okamžitá hodnota zrychlení (Curr RMS),
- Maximální přechodná hodnota zrychlení (MTVV),
- Špičková hodnota (Peak),
- Hodnota dávky vibrací (VDV),
- SEAT faktor.

V průběhu měření zobrazuje dále VTV a v případě měření vibrací na celé tělo VDV a VDV(8). Po měření dojde k výpočtu hodnot celodenní expozice normovaných na 1, 4 a 8 hodin [A(1), A(4), A(8)], které jsou uloženy. Při logování jsou parametry ukládány v intervalu 1s. Paměťová kapacita umožní uložení 750 tříosých měření (cca 4,7 hodin záznamu).

Analyzátor obsahuje filtry pro měření přenosu vibrací jak na ruce, celé tělo tak i pro měření vibrací budov.

Pro přenos naměřených dat do PC a jejich archivaci slouží přiložený software 4447 Vibration Explorer. Tento umožňuje nejen výpočty celkové expozice dané kombinací operací, měřicích bodů, pracovních míst a doby působení vibrací na operátora, ale i modeluje různé pracovní situace pro snadnou identifikaci rizika poškození zdraví vlivem překročení povolené hodnoty expozice čímž pomáhá při hledání řešení, které tyto účinky snižují [20].

S analyzátozem jsou dodávány originální úchyty včetně piezoelektrického snímače, viz obr. 15 a 16.



Obr. 15 Originální úchyty snímače dodávané s analyzátozem BK 4447 [20]



Obr. 16 Třiosý akcelerometr 4524-B-001 [20]

2.8. Příslušenství a měřiče okolních podmínek

2.8.1. Kabeláž

Propojení snímače s analyzátozem je realizováno pomocí kabelu s konektorem 4-pin Microtech. Maximální výstupní napětí akcelerometru závisí na napájecím zdroji, frekvenci a kapacitě kabelu. Maximální délka kabelu nesmí být překročena a je definována následujícím vztahem:

$$L = 140000 \cdot \frac{I_S - 1}{f \cdot V_0 \cdot C_M} \quad (3)$$

Kde I_S je napájecí proud [mA],

f frekvence [kHz],

V_0 výstupní napětí [V_{peak}],

C_M kapacita kabelu [pF/m] [12].

Při našich měřeních nebylo nutné počítat, zda je délka kabelu správná a nepřekračuje meze, protože bylo využito originálního příslušenství Brüel&Kjær dodávaného se snímači analyzátozem.

2.8.2. Měřiče okolních podmínek

- Teploměr – Pro záznam teploty okolního prostředí byl využit teploměr značky H&H, který měří s přesností desetín stupňů Celsia

3. Přenos vibrací k lidskému tělu - experiment

3.1. Předmět měření - motocykl Yamaha FZS 600

Předmětem snímání vibrací se stal silniční cestovní motocykl Yamaha FZS 600. Jedná se o polokapotovaný stroj moderní koncepce se čtyřdobým vodou chlazeným motorem. Základní specifikace jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Tab. 10 Specifikace motocyklu

Tovární značka	Yamaha
Obchodní označení	FZS 600
Objem	599 ccm
Výkon	70 kW/11500 ot./min.
Rozvod motoru	DOHC, 16 ventilů
Typ motoru	Čtyřdobý, řadový, kapalinou chlazený čtyřválec
Stav tachometru	23600 km



Obr. 17 Motocykl Yamaha FZS 600

3.2. Obecné informace k přenosu vibrací na člověka

Dopravní prostředky, strojní zařízení a průmyslové činnosti vystavují člověka působení periodických, náhodných a přechodových vibrací, které mohou narušovat pohodlí, činnosti a zdraví.

Vibrace jsou často složité, obsahují mnoho frekvencí, vyskytují se v několika směrech a mění se s časem. Účinky vibrací mohou být mnohočetné. Expozice celkovým vibracím vyvolává komplexní rozdělení kmitavých pohybů a sil uvnitř těla. S ohledem na biologické účinky mohou být mezi jednotlivci velké rozdíly. Celkové vibrace mohou vyvolávat pocity (např. nepohodlí nebo obtěžování), ovlivňovat pracovní schopnost člověka nebo představovat

zdravotní nebo bezpečnostní riziko. (např. patologické poškození nebo fyziologická změna). Výskyt kmitavé síly s malým pohybem může vyvolávat podobné účinky [6].

3.2.1. Celkové vibrace

Jejich měření a hodnocení jsou definovány v normě ISO 2631, uvažovaný frekvenční rozsah je

- 0,5 Hz až 80 Hz pro zdraví, pohodlí a vnímání,
- 0,1 Hz až 0.5 Hz pro nemoc z pohybu – tento frekvenční rozsah nebyl, z důvodu nevhodných parametrů snímače, vyhodnocován.

Celkovými vibracemi chápeme pohyby přenášené na lidské tělo jako celek z opěrných povrchů: nohy stojící osoby, zadek, záda a nohy sedící osoby nebo opěrná oblast ležící osoby. Tento druh vibrací se vyskytuje v dopravních prostředcích, na strojních zařízeních, v budovách a v blízkosti pracujících strojních zařízení.

Při měření se snímaly vibrace na stupačkách a na sedadle.

3.2.2. Vibrace přenášené na ruce

Měření tohoto typu vibrací je definováno normou ISO 5349 a je měřeno v místech styku paží s vibrujícím povrchem. U motocyklu se snímají vibrace na řídítkách, a to jak na levé, tak na pravé rukojeti.

Snímaný rozsah frekvencí je normativně stanoven od 1Hz do 1000Hz.

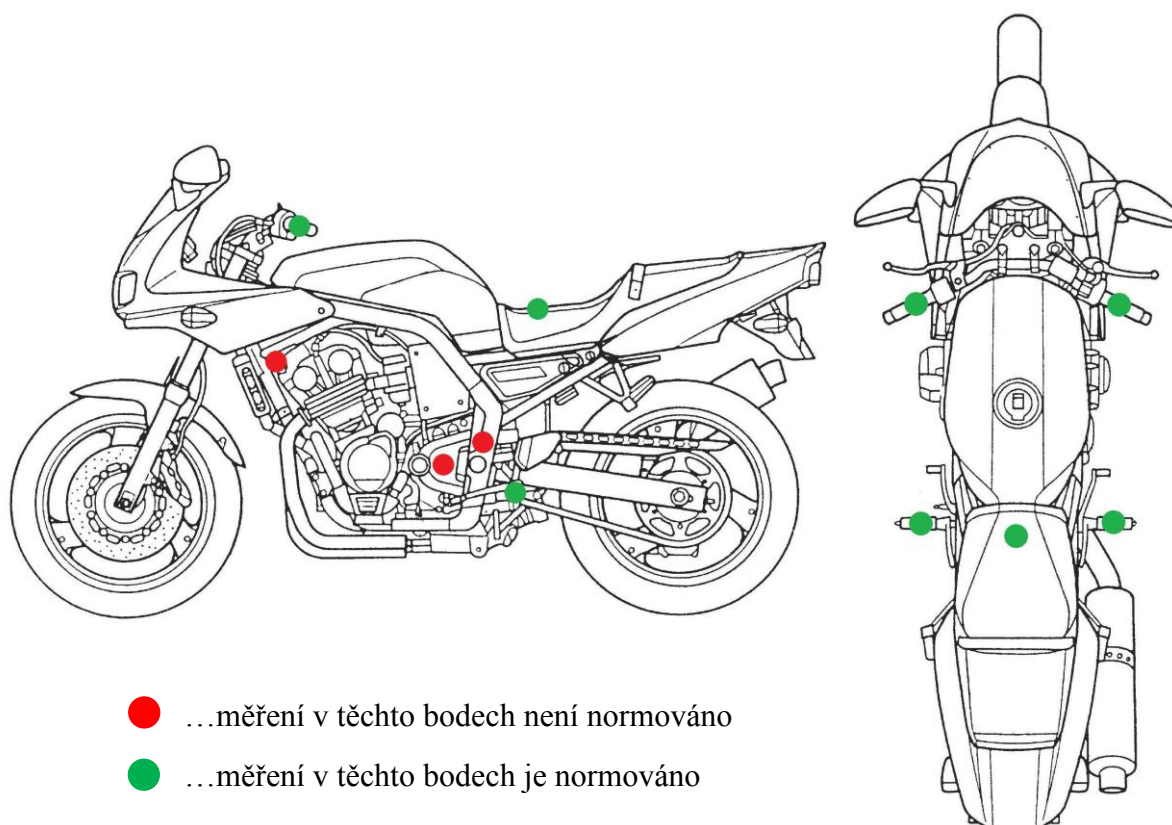
3.3. Volba měřicích míst

Měřicí místa, která byla zvolena pro snímání vibrací, jsou uvedena v tabulce 11.

Tab. 11 Stanovení a popis pozic pro snímání vibrací na motocyklu

Měřený celek	Popis umístění snímače	Způsob uchycení
Motor	Snímač umístěn na víku předního ozubeného kola, které přenáší hnací moment na zadní kolo	Oboustranná lepicí páska
Rám	Levá horní část rámu (vpředu), vedle otočného ložiskového uložení řídítek	Včelím voskem přímo na povrch rámu
	Levá dolní část rámu (vzadu), oblast kde je uchycena kyvná vidlice, oblast mezi stupačkou a sedadlem	Včelím voskem přímo na povrch rámu
Řídítka	Gumová rukojeť - pravá strana	Včelím voskem na kovový úchyt
	Gumová rukojeť - levá strana	Včelím voskem na kovový úchyt
Sedadlo	Sedadlo – vycentrováno uprostřed	Pouze položený a řidičem zatížený impaktor
Stupačky	Levá stupačka	Pomocí montážního klipu a upravených hadicových objímek
	Pravá stupačka	
Přilba	Výklenek s rovinnou plochou, sloužící k umístění komunikačního zařízení Intercom	Pomocí oboustranné lepicí pásky

Měřicí místa jsou vyznačena graficky v obrázku 18. Zeleně jsou vyznačeny body, ve kterých je měření vibrací normováno. Červené body nejsou normami nijak definovány.



Obr. 18 Znázornění měřících míst na motocyklu Yamaha FZS 600
(vlevo pohled ze strany, vpravo pohled shora) [15]

3.4. Uchycení snímačů

Ve většině měřících pozic byl k uchycení snímače na požadované místo využito včelí vosk. Důvodem je výhodná hodnota rezonanční frekvence, které dosahuje snímač při použití tohoto typu uchycení. Jedná se o velmi kvalitní způsob uchycení využívaný při všech oficiálních homologačních a jiných měřeních. Nevýhodou však je nemožnost měření v oblasti, kde dochází k zahřívání povrchu. Tato vlastnost byla jedním z faktorů při výběru měřících míst. Z důvodu vysokých teplot na motoru, bylo na této pozici využito oboustranné lepicí pásky.

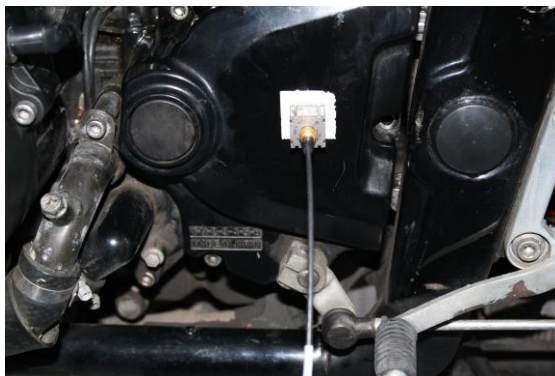
Mělo by se postupovat obezřetně s cílem zajistit, aby jakákoliv rezonanční frekvence sestavy úchyty byla dostatečně vysoko nad horní mezi měřícího rozsahu frekvencí [11].

3.4.1. Motor

Vibrační měření přímo v oblasti motoru není normováno z hlediska účinků na zdraví. Přesto bylo provedeno několik sérií měření za účelem posouzení dominantních frekvenčních

pásem vstupujících dále přes sedadlo, řídítka do lidského těla. Podrobnější analýza dat se však neprovádí.

Na motoru bylo zvoleno z důvodu vysokých provozních teplot jediné místo, a to víko předního ozubeného kola. Uchyceno pomocí oboustranné lepicí pásky.



Obr. 19 Uchycení snímače na víku předního ozubeného kola

3.4.2. Rám

Podobně jako u předchozího bodu, měření vibrací na rámu není normováno a výsledky měření nejsou podrobněji analyzovány. Zvolena byla 2 umístění:

- Rovinná plošina v přední části rámu, těsně pod palivovou nádrží a těsně za ventilátorem chladiče,
- Rovinná plocha rámu v oblasti cca 10 cm nad zavěšením **kyvného vypružení**.

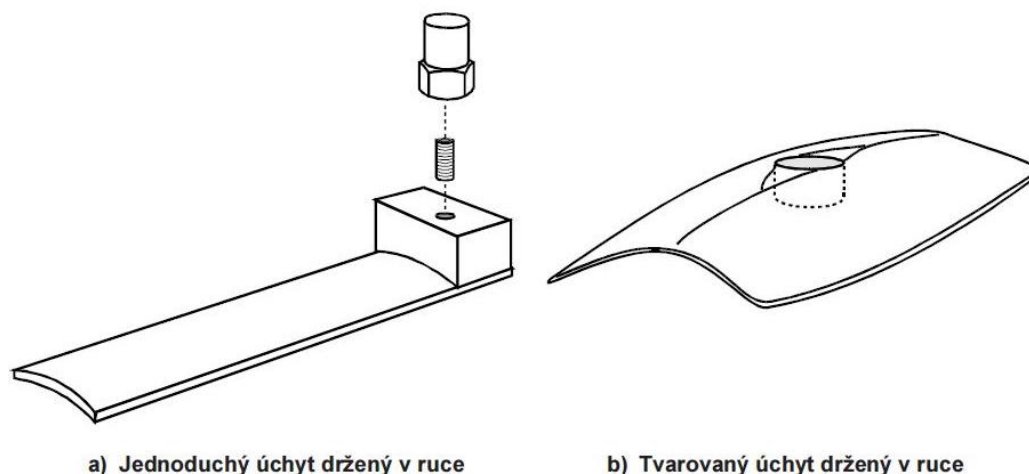


Obr. 20 Snímač přilepený včelím voskem přímo na motocyklový rám

3.4.3. Řídítka

V souladu s ISO 5349-1 se má měření na řídítkách provádět na povrchu nebo blízko povrchu ruky, kde vibrace vstupují do těla. Snímač se má přednostně umístit uprostřed oblasti

úchopu (např. střed úsečky vymezené šířkou ruky při uchopení rukojeti mechanizovaného nářadí). V tomto místě se získá nejrepresentativnější hodnocení vibrací vstupujících do ruky. Obecně však není možné umístění snímače do tohoto bodu. Snímače by narušovaly obvyklý úchop.



Obr. 21 Připevnění snímače pomocí úchytů dle normy ISO 5349-2

Biologické účinky vibrací na člověka jsou závislé na spojení ruky se zdrojem vibrací. Spojení může značně ovlivnit velikosti naměřených vibrací. Dle normy ISO 5349 by se měly změřit síly mezi rukou a oblastí úchopu. Kvůli nedostatečnému vybavení toto měření neproběhlo.

Snímač zrychlení se má umístit uprostřed oblasti úchopu. V tomto místě se získá nejrepresentativnější hodnocení vibrací vstupujících do ruky. Obecně však není možné umístit snímače do tohoto bodu, snímače by narušovaly úchop používaný řidičem motocyklu. [11]

Pro měření na řídítkách byl vyroben úchyt z trubky o průměru shodném s vnějším průměrem rukojeti. Trubka byla v podélném směru rozpůlena a na jeden konec připevněna dvěma svary rovinná plocha pro umístění akcelerometru. (viz. obr. 22)



Obr. 22 Úchyt pro měření vibrací na řídítkách

Pro jedno měření bylo využito také originálních úchytů, které jsou dodávány jako příslušenství k analyzátoru BK 4447. Podrobnější popis je v kapitole 2.7.

3.4.4. Sedadlo

Snímače se musí umístit tak, aby indikovaly vibrace na rozhraní mezi lidským tělem a zdrojem jeho vibrací. Základní styčná plocha nemusí být vždy evidentní. Dle ISO 2631-1 by se měření na opěrném povrchu sedadla měla provádět pod kyčelními klouby.

Vibrace přenášené na tělo z netuhých nebo pružných materiálů (např. polstrování sedadla) se měří snímačem, který se vkládá mezi osobu a základní styčné plochy povrchu. Toho by se mělo dosáhnout zajištěním snímačů uvnitř vhodně tvarovaného úchytu. Úchyt nesmí silně změnit rozložení tlaku na povrchu pružného materiálu. Při měřeních na netuhých površích musí osoba zaujmout normální polohu v prostředí [6].

Pro splnění veškerých požadavků normy ISO 2631-1 bylo k měření využito impaktoru sedací části lidského těla Brüel & Kjær typ 4515-B, který je přímo uzpůsoben pro měření tohoto typu.

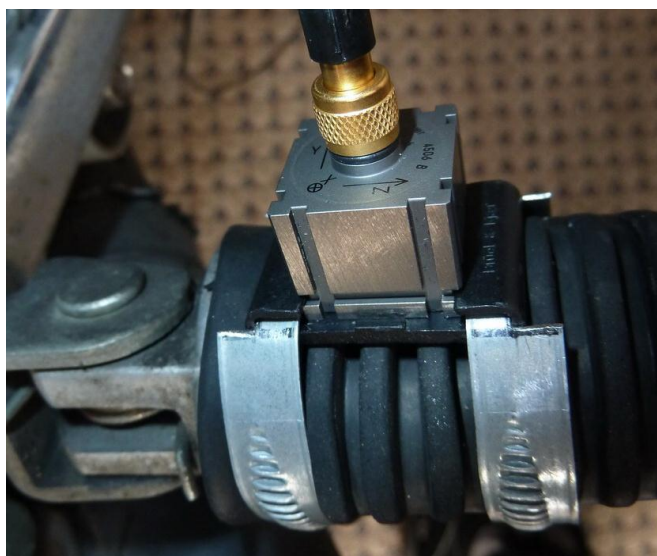
Impaktor byl umístěn uprostřed motocyklového sedadla tak, aby byl přímo pod kyčlemi řidiče motocyklu.



Obr. 23 Umístění impaktoru na motocyklovém sedadle

3.4.5. Stupačky

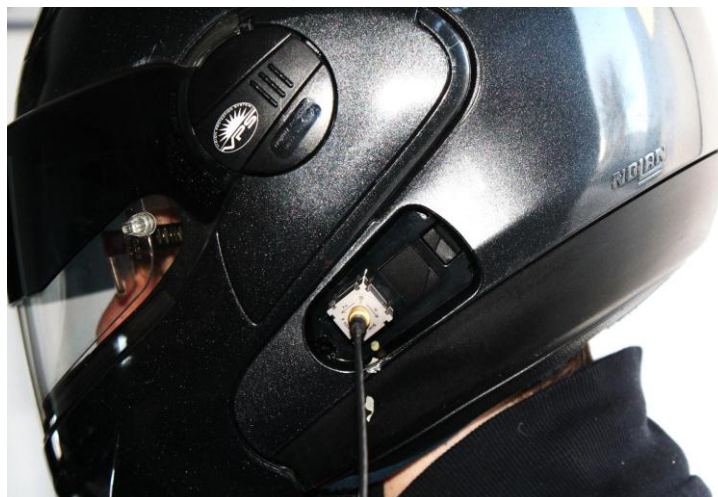
Měření v místě nohou by se měla provádět na povrchu, o který se nohy nejčastěji opírají [6]. Pro snímání na této pozici byla využita podložka BK typ 4506 viz obr. 12. Skrz okraje podložky byly na obou stranách protaženy upravené hadicové objímky. Pro zajištění věrohodných dat bylo nutné stupačku zatížit podobně jako za běžného provozu, proto byl snímač umístěn na okraj blíže k motocyklu.



Obr. 24 Uchycení snímače na stupačce motocyklu

3.4.6. Přilba

Měření na přilbě ani na jiných ochranných pomůckách v oblasti hlavy není normováno. Pro komplexní posouzení vlivu vibrací bylo však zvoleno měření na jediné rovinné ploše motocyklové přilby – jedná se o výklenek určený pro umístění komunikačního systému Intercom, který umožňuje využívat služeb handsfree/bluetooth a komunikaci mezi řidičem a spolujezdcem.



Obr. 25 Umístění snímače na přilbě v oblasti výklenku pro komunikační systém Intercom

3.4.7. Metodika měření

Měření tohoto typu nejsou přesně definována normami, ale můžeme využít norem a směrnic z jiných oblastí. Směrnice 97/24/ES o homologaci motocyklu z hlediska hluku definuje následující kapitoly:

- Stav motocyklu
- Zkušební lokalita
- Vnější podmínky
- Provozní podmínky

Z těchto kapitol byly převzaty postupy a podmínky. Jednotlivé požadavky jsou popsány v příslušných následujících kapitolách.

3.5. Stav motocyklu

Mezi nutné podmínky pro úspěšné měření patří:

- Motocykl se nachází v nepoškozeném, funkčním stavu,
- jeho provozní teplota musí být před měřením uvedena na obvyklou provozní hodnotu v rozmezí 70 – 90°C,
- pokud motocykl disponuje samočinně se spínajícím ventilátorem, nesmí být při měření v provozu.

3.6. Vnější podmínky

Nesmí se měřit za nepříznivých atmosférických podmínek. To bylo částečně vyřešeno měřeními v jedné z laboratoří Univerzity Pardubice. Spaliny z výfukového potrubí vycházely ven otevřenými dveřmi.

Vnějších vlivů, které mohou ovlivnit měření, je celá řada: teplota, vlhkost, radiace, přímý sluneční svit, hluk, elektromagnetické rušení, příčné vibrace, triboelektrický jev nebo nerovnost plochy pro umístění snímače.

Tab. 12 Vnější podmínky jednotlivých vibračních měření

	Teplotní rozmezí v místě měření	Ostatní klimatické podmínky
1. Měření (10. prosince 2010)	12,7 – 13,5 °C	Oblačno, vlhkost 70 – 85%
2. Měření (28. února 2011)	13,5 – 14,9 °C	Jasno, vlhkost 35 – 50%
3. Měření (11. dubna 2011)	17,5 – 18,2 °C	Jasno, vlhkost 35 – 50%

Vlhkost vzduchu nebyla zaznamenávána, hodnoty vlhkosti vzduchu byly zjištěny zpětně na internetovém portálu <http://pocasi.divoch.net>.

3.7. Provozní podmínky

Měření během obvyklé práce

Expozice vibracím trvají často krátké intervaly, které se během pracovního dne mnohokrát opakují. Přestože měření lze průměrovat za úplné pracovní cykly, obvykle je možné průměrovat pouze v krátkém intervalu, kdy je ruka ve styku s vibrujícím povrchem. Nejkratší přípustná doba trvání měření závisí na signálu, pracovním vybavení a pracovních charakteristikách. Před jedním měřením s delší dobou trvání by se spíše měla dát přednost určitému počtu krátkodobých náměrů. Pro každou činnost by se měly získat alespoň 3 náměry.

Je nepravděpodobné, že by měření s velmi krátkou dobou trvání (např. kratší než 8 s) byla spolehlivá, a to zejména tehdy hodnotí-li se nízkofrekvenční složky. Podle možností je žádoucí se takovým měřením vyhnout.

Vzhledem k velmi rovnoměrnému chodu a poměrně stabilním vibracím ve zvolených provozních režimech byla zvolena doba průměrování efektivní hodnoty na 8 vteřin.

Měření probíhalo ve dvou režimech, které byly převzaty ze Směrnice 97/24/ES, která definuje provozní podmínky při měření hluku:

- Volnoběžné otáčky,
- $\frac{1}{2}$ maximálních otáček – v našem případě 5750 ot./min.

4. Zpracování a analýza naměřených dat

4.1. Požadavky na upravení signálu

Dynamický rozsah zařízení na úpravu signálu musí odpovídat nejvyšším a nejnižším signálům. Aby se co nejvíce zvýšil odstup signálu od šumu, mohou se signály, které se mají zaznamenat pro pozdější analýzu, nejprve filtrovat dolnofrekvenční propustí s mezní frekvencí (-3dB), která je přibližně 1,5násobek nejvyšší sledované frekvence. Fázová charakteristika musí být lineární v rozsahu frekvencí [6].

4.2. Definice činitele výkmitu a jeho použití

Činitel výkmitu je definován jako modul poměru nejvyšší okamžité špičkové hodnoty frekvenčně váženého signálu zrychlení k jeho efektivní hodnotě. Špičková hodnota se musí určit za dobu trvání měření, tj. časového intervalu T použitého při integraci efektivní hodnoty.

Tento parametr lze využít pro posouzení, zda základní metoda hodnocení intenzity vibrací je dostatečná pro posouzení jejího vlivu na člověka. Základní metoda je dostačující, pokud činitel výkmitu nabývá hodnoty 9 a méně.

Časový průběh signálu nebyl sledován, proto výpočet činitele výkmitu na základě znalosti okamžité špičkové hodnoty vibrací nebyl proveden. Vzhledem k pozorování vibrací vznikajících pouze na motocyklovém motoru, který má vyvážený a rovnoměrný chod je překročení hodnoty činitele výkmitu 9 velmi nepravděpodobné.

4.3. Hodnocení vibrací z pohledu směrnice č. 44/2002/ES

4.3.1. Vibrace přenášené na ruce

Hodnocení úrovně expozice vibracím působícím na soustavu ruka-paže je založeno na výpočtu denní hodnoty expozice normalizované na osmihodinovou referenční dobu A (8) vyjádřené druhou odmocninou součtu druhých mocnin efektivních hodnot (celková hodnota) frekvenčně zatížených akceleračních hodnot stanovených na ortogonálních osách a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz} definovaných v normě ISO 5349-1.

Pokud se pro hodnocení úrovně expozice používá měření:

a) může mezi používanými metodami být i odběr vzorků, které musí být reprezentativní pro expozici mechanickým vibracím daného zaměstnance. Použité metody

a přístroje musí být přizpůsobeny zvláštním vlastnostem měřených mechanických vibrací, faktorům prostředí a vlastnostem měřicího přístroje, v souladu s normou ISO 5349-2.

b) V případě zařízení, která je třeba držet oběma rukama, se měření musí provádět na každé ruce zvlášť. Expozice se určí odkazem na tu hodnotu, která je vyšší. Podají se též informace o druhé ruce [16]. V případě měření na motocyklu byly provedeny v souladu s touto směrnicí odběry vzorků jak na levé rukojeti řídítek, tak na pravé.

4.3.2. Celkové vibrace

Hodnocení úrovně expozice vibracím je založeno na výpočtu denní expozice A (8) vyjádřené jako rovnocenná nepřetržitá akcelerace po dobu osmi hodin vypočtená jako nejvyšší efektivní hodnota nebo nejvyšší hodnota dávky vibrací (VDV) frekvenčně zatížených akcelerací určených na třech ortogonálních osách ($1,4a_{wx}$, $1,4a_{wy}$, a_{wz} pro sedícího nebo stojícího zaměstnance) podle normy ISO 2631-1.

Pokud se pro hodnocení úrovně expozice používá měření, může mezi používanými metodami být i odběr vzorků, které musí být reprezentativní pro expozici mechanickým vibracím daného zaměstnance. Použité metody a přístroje musí být přizpůsobeny zvláštním vlastnostem měřených mechanických vibrací, faktorům prostředí a vlastnostem měřicího přístroje [16].

4.4. Fourierova transformace

Řada současných měřicích přístrojů používá ke kmitočtové analýze matematického postupu, kdy se ze změřeného časového komplexního signálu vypočítají jednotlivé kmitočtové složky využitím rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform, FFT). Z matematiky víme, že každou periodickou funkci $f(t)$ s periodou T lze vyjádřit nekonečnou sumou řady funkcí sinus a kosinus. Frekvence každé funkce sinus a kosinus je dána celočíselným násobkem frekvence původní funkce. Jedná se o Fourierovy řady [18].

Zásadním omezením Fourierovy řady je, že ji můžeme použít jen pro periodické signály. Reálné signály při kmitočtové analýze vibračních a akustických soustav jsou však většinou neperiodické. V tomto případě roste $T \rightarrow \infty$ a frekvence kmitočtových složek nejsou celočíselnými násobky nějaké základní frekvence, ale mohou nabývat spojitého spektra hodnot. Pro výpočet kmitočtových složek je pak třeba použít Fourierovu transformaci, kterou můžeme vyjádřit následující dvojicí integrálů:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{přímá transformace}), \quad (4)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (\text{inverzní transformace}). \quad (5)$$

Funkce $F(f)$ je obecně komplexní (má reálnou a imaginární složku) a obsahuje informace o amplitudách a fázích všech harmonických frekvencí, které jsou obsaženy v $x(t)$.

Fourierova transformace je dána spojitým analytickým integrálem. Časový signál akustických a vibračních detektorů lze však zaznamenat pouze v diskrétních časových okamžicích vzdálených o Δt (časový interval vzorkování). Efektivní algoritmus pro výpočet tohoto vztahu pro diskrétní transformaci se nazývá rychlá Fourierova transformace (FFT). Je k dispozici zpravidla ve všech programech pro PC, využitelných pro technické výpočty.

Při použití algoritmu FFT jsme zpravidla omezení pouze na hodnoty N , které jsou rovny mocnině čísla 2, tj. 256, 512, ... Tato podmínka neplatí obecně pro diskrétní Fourierovu transformaci, ale je to cena, kterou musíme zaplatit za rychlost algoritmu FFT, která je při frekvenční analýze ve většině případů mnohem důležitější. Počet hodnot kmitočtového spektra je poloviční vzhledem k počtu hodnot časového signálu, přičemž f_{max} je rovna polovině vzorkovací frekvence podle vztahu:

$$f_{VZ} = \frac{1}{\Delta t} \quad (6)$$

kde f_{VZ} je vzorkovací frekvence [Hz],

Δt časový interval vzorkování [18].

FFT využívají dnešní analyzátory vibrací včetně námi využitého typu 3650c a analyzátoru vibrací lidského těla BK 4447.

4.5. Omezení pásma a frekvenční vážení

Filtry pro omezení frekvenčního pásma jsou realizovány přímo prostřednictvím použitého analyzátoru Brüel & Kjær za využití dodávaného softwaru PULSE bez nutnosti dodatečných výpočtů a úpravy výstupních hodnot. Frekvenční vážení v jednotlivých pásmech je však specifické pro každý typ vibrací a je nutné jej dle směrnic aplikovat na naměřené hodnoty.

4.5.1. Celkové vibrace

Pro bezproblémové frekvenční vážení dle normy ISO 2631-1 je nutné, aby střední frekvence jednotlivých pásem třetinooktávové analýzy byly totožné s frekvencemi danými touto normou. Při převodu třetinooktávových údajů se musí použít váhové činitele uvedené v normě. Celková vážená hodnota zrychlení se musí určit v souladu s následující rovnicí nebo jejím digitálním ekvivalentem v časové nebo frekvenční oblasti:

$$a_w = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

kde a_w je frekvenčně vážené zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

W_i váhový činitel i -tého třetinooktávového pásma,

A_i efektivní hodnota zrychlení v i -tém třetinooktávovém pásmu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

Omezení pásma je definováno přenosovou funkcí dvou frekvenčních propustí – definice Butterworthova filtru druhého řádu, $Q_1 = Q_2 = 1/\sqrt{2}$:

Hornofrekvenční propust

$$|H_h(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}\omega_1/p + (\omega_1/p)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (8)$$

kde $\omega_1 = 2\pi f_1$,

f_1 = mezní frekvence [Hz].

Dolnofrekvenční propust

$$|H_l(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}p/\omega_2 + (p/\omega_2)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (9)$$

kde $\omega_2 = 2\pi f_2$,

f_2 = mezní frekvence [Hz].

Přechod **zrychlení – rychlost** (úměrnost zrychlení na nižších frekvencích, úměrnost rychlosti na vyšších frekvencích):

$$|H_t(p)| = \left| \frac{1 + p/\omega_3}{1 + p/(Q_4\omega_4) + (p/\omega_4)^2} \right| = \sqrt{\frac{f + f_3^2}{f_3^2}} = \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2(1 - 2Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}} \quad (10)$$

$$\text{kde } \omega_3 = 2\pi f_3,$$

$$\omega_4 = 2\pi f_4.$$

Krok (sklon přibližně 6 dB na oktávu):

$$|H_s(p)| = \left| \frac{1 + p/(Q_5\omega_5) + (p/\omega_5)^2}{1 + p/(Q_6\omega_6) + (p/\omega_6)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right) \right| = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2(1 - 2Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2(1 - 2Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}} \quad (11)$$

$$\text{kde } \omega_5 = 2\pi f_5,$$

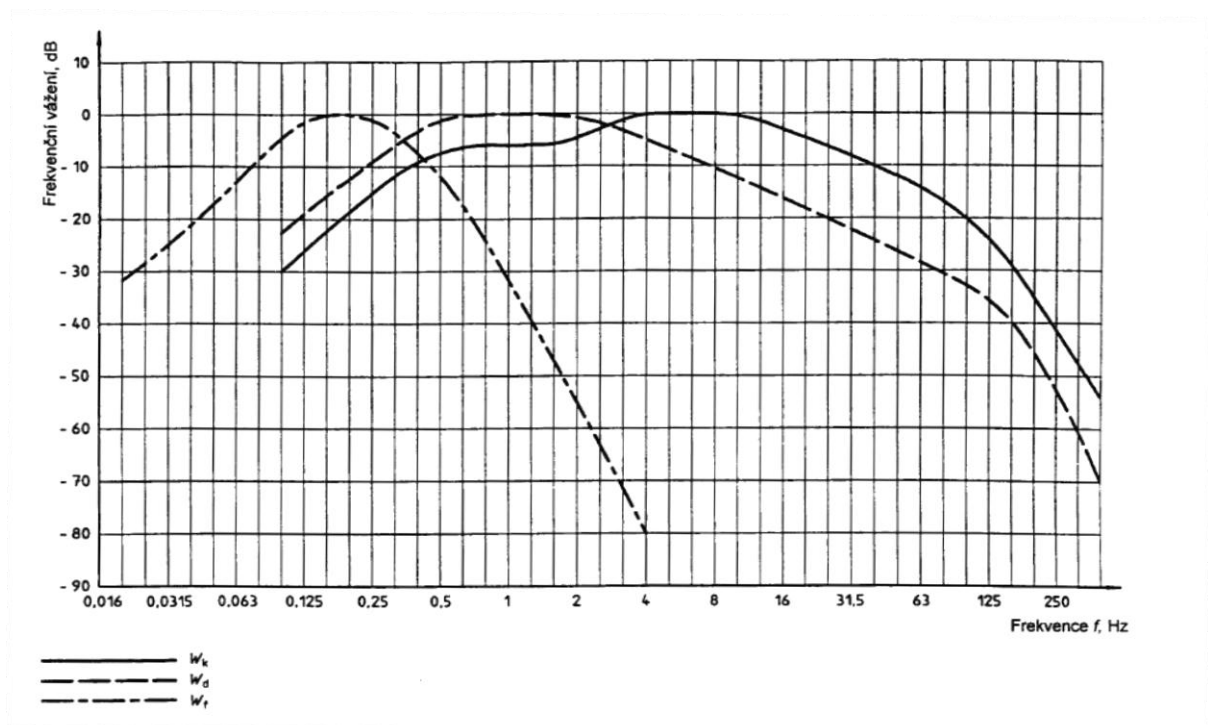
$$\omega_6 = 2\pi f_6.$$

Přenosovou funkci omezení pásma reprezentuje součin $H_h(p) \cdot H_l(p)$.

Přenosovou funkci frekvenčního vážení reprezentuje součin $H_t(p) \cdot H_s(p)$.

Celková frekvenční váhová funkce je

$$H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_t(p) \cdot H_s(p) \quad (12)$$



Obr. 26 Křivky frekvenčního vážení pro celkové vibrace [6]

Tab. 13 Použití křivek frekvenčního vážení při základním vážení

Frekvenční vážení	Sedadlo			Stupačky		
	Osa x	Osa y	Osa z	Osa x	Osa y	Osa z
Hledisko - Zdraví	W_d	W_d	W_k	-	-	-
Hledisko - Pohodlí	W_d	W_d	W_k	W_k	W_k	W_k

Váhových činitelů W_d a W_k jsou vztaženy vždy ke konkrétnímu třetinooktávovému pásmu a udávají hodnotu zrychlení v $m.s^{-2}$ o kterou se má naměřená hodnota zvýšit nebo snížit. Konkrétní hodnoty těchto činitelů jsou uvedeny v normě ISO 2631-1.

4.5.2. Vibrace přenášené na ruce

Pro tento typ vibrací používáme frekvenční vážení W_h , které odráží předpokládanou významnost rozdílných frekvencí při vyvolání poranění ruky. Rozsah naměřených hodnot je omezen na frekvenční rozsah pokrytý oktávovými pásmy 8 Hz až 1 000 Hz (to odpovídá jmenovitému frekvenčnímu rozsahu od 5,6 Hz do 1 400 Hz). Takovéto omezení zajišťuje, aby okolní frekvence neměli vliv na naměřenou hodnotu uvnitř pásma.

Přepočet údajů z třetinooktávových pásem na frekvenčně vážené zrychlení se počítá totožně jako u celkových vibrací, viz vztah (7).

Matematické vyjádření přenosové funkce filtru na omezení pásma $H_b(s)$:

$$H_b(s) = \frac{s^2 4\pi^2 f_2^2}{(s^2 + 2\pi f_1 s / Q_1 + 4\pi^2 f_1^2)(s^2 + 2\pi f_2 s / Q_1 + 4\pi^2 f_2^2)} \quad (13)$$

kde $s = j2\pi f$ je proměnná Laplaceovy transformace.

Filtr frekvenčního vážení je stanoven pomocí přenosové funkce $H_w(s)$:

$$H_w(s) = \frac{(s + 2\pi f_3) 2\pi K f_4^2}{(s^2 + 2\pi f_4 s / Q_2 + 4\pi^2 f_4^2) f_3} \quad (14)$$

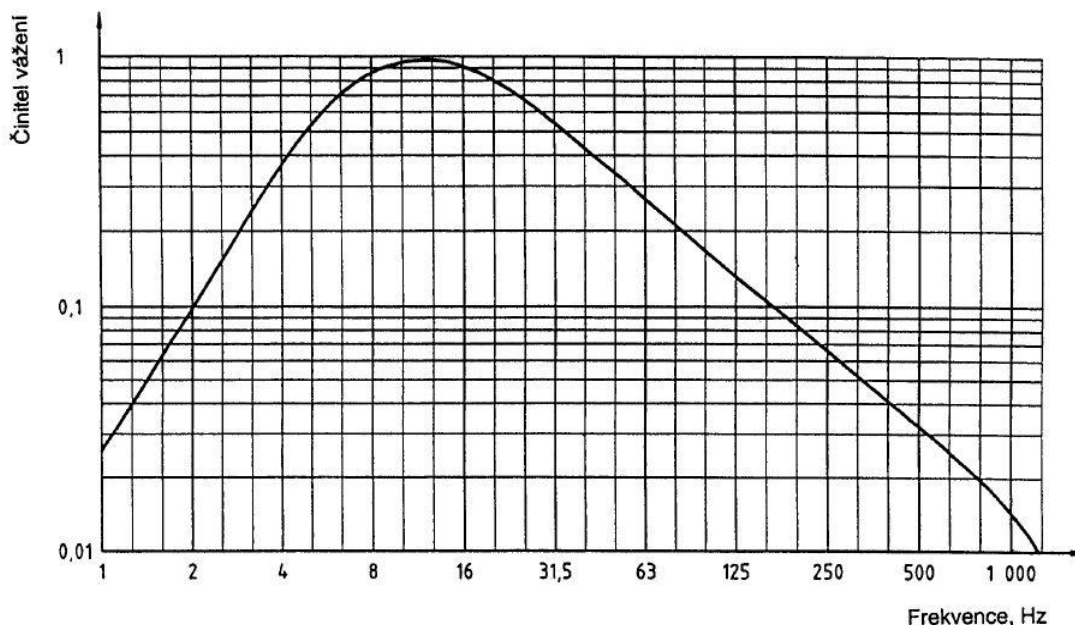
kde f_n označuje rezonanční frekvence ($n = 1$ až 4),

Q_n označuje selektivitu ($n = 1$ až 4),

K je konstantní zisk [6,7].

Celková funkce frekvenčního vážení je:

$$H(s) = H_b(s) \cdot H_w(s) \quad (15)$$



Obr. 27 Křivky frekvenčního vážení pro vibrace přenášené na ruce [7]

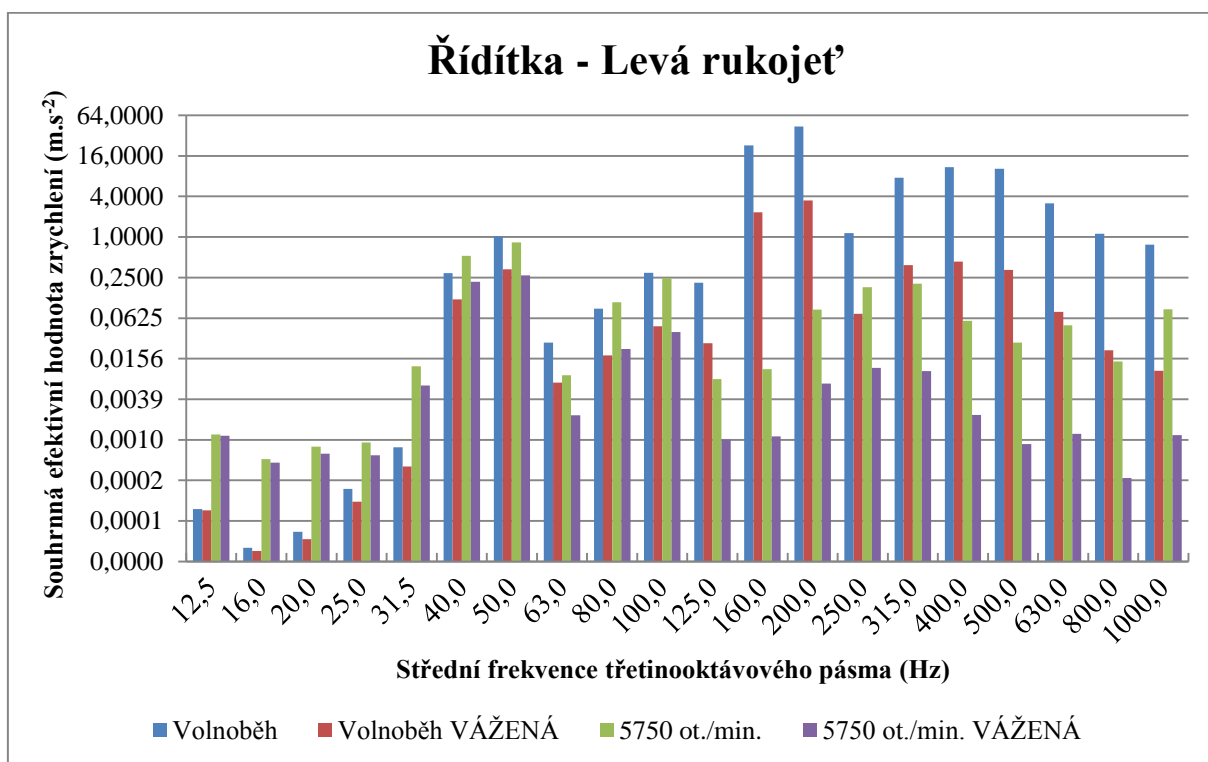
4.6. CPB analýza, třetinooktávová analýza

Podle norem, které se zabývají problematikou vlivu vibrací na člověka je žádoucí uvádět vážené i nevážené hodnoty zrychlení v třetinooktávových pásmech ve frekvenčním rozsahu měřicího zařízení. Kromě spektra s konstantní šířkou pásma mohou poskytnout užitečnou vizuální metodu kontroly údajů o frekvenčním složení a detekce chyb měření. [7]

Existují dva základní typy filtrů pro frekvenční analýzu vibračních signálů.

- Filtr s konstantní šířkou pásma, kde jsou pásma určena konstantní absolutní šířkou, například 3 Hz, 10 Hz, atd.
- Filtr s procentuálně konstantní šířkou pásma, kde je šířka pásma dána hodnotou konstantního procentuálního podílu střední frekvence [19].

Třetinooktávová analýza s příslušným frekvenčním vážením dle norem proběhla ve všech měřicích místech. Znázornění analyzovaných dat je graficky vyobrazeno na následujícím obrázku 27. Analýzy ve všech ostatních měřicích místech a provozních režimech jsou uvedeny v Příloze B.



Obr. 28 Třetinooktávová analýza dat na motocyklových řídítkách - vlevo

4.7. Základní metoda hodnocení vibrací

Vážená efektivní hodnota zrychlení dle ISO 2631-1

Vážená efektivní hodnota zrychlení se musí vypočítat podle následující rovnice nebo jejích ekvivalentů ve frekvenční oblasti

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m.s}^{-2}] \quad (16)$$

kde $a_w(t)$ je vážené zrychlení jako funkce času v m.s^{-2}

T doba trvání měření v sekundách.

Efektivní hodnota se měří metodou lineární integrace. Doba integrace se musí zvolit tak, aby se získal reprezentativní náměr signálu vibrací [11].

Výpočty efektivní hodnoty podle vztahu (16) byly provedeny přímo v softwaru LabShop dodávaném s analyzátozem PULSE, kterým bylo měření provedeno. Hodnoty těchto efektivních hodnot jsou vypsány pro všechna měřicí místa v tabulce 18.

4.8. Vztah mezi expozicí vibracím a účinky na zdraví

Jako nejlepší dostupný návod týkající se potenciálu různých frekvencí vyvolávat zdravotní účinky v ruce a paži v důsledku vibrací se považuje frekvenční vážení. Nedá se konkrétně říci, že dané vážení samostatně určí vlivy na cévy, nervy nebo pohybový aparát. Jedná se o posouzení všech zdravotních dopadů komplexně. Předpokládá se, že účinky vibrací jsou ve všech třech směrech stejné, proto se potenciál poškození odhaduje ze souhrnné hodnoty vibrací.

4.9. Kombinování vibrací ve více než jednom směru

4.9.1. Celkové vibrace

Souhrnná hodnota vibrací se z vážených efektivních hodnot zrychlení určených z vibrací v ortogonálních souřadnicích vypočítá podle následujícího vzorce (17).

$$a_v = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2) [m \cdot s^{-2}] \quad (17)$$

kde

a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} jsou vážené efektivní hodnoty zrychlení ve směru ortogonálních od x, y, z,
 k_x , k_y , k_z násobící činitelé.

Hodnoty násobících činitelů a typ frekvenčního vážení pro sedící osoby

- Osa x: W_d , $k_x = 1,4$,
- Osa y: W_d , $k_y = 1,4$,
- Osa z: W_k , $k_z = 1$.

Při kombinování vibrací se z hlediska posouzení na zdraví člověka uvažuje pouze frekvenční rozsah 1 Hz až 80 Hz.

4.9.2. Vibrace přenášené na ruce

Většina mechanizovaných náradí, stejně tak jako motocyklová řídítka, obsahují příspěvky ze všech tří měřených směrů. Předpokládá se, že vibrace v každém ze tří směrů jsou stejně škodlivé. Souhrnná hodnota se vypočítá podle vztahu:

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} [m \cdot s^{-2}] \quad (18)$$

kde a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz} jsou vážené efektivní hodnoty zrychlení $[m \cdot s^{-2}]$.

4.10. Výsledky

4.10.1. Celkové vibrace z hlediska posouzení vlivu na zdraví

Po realizaci měření pomocí impaktoru typu 4515-B a analyzátoru PULSE se ukázalo, že hodnoty které jsou analyzátozem zaznamenávány, jsou zcela chybné, a to o několik řádů mimo očekávaný rozsah. Vypůjčený Impaktor byl pravděpodobně poškozen. Proto bylo pro posouzení vlivu celkových vibrací na zdraví využito analyzátoru BK4447 s impaktorem, který byl jeho příslušenstvím. Analyzátor je přímo určený pro měření tohoto typu a veškeré výpočty spojené s vážením a korekcemi provede automaticky. Vybrané naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.

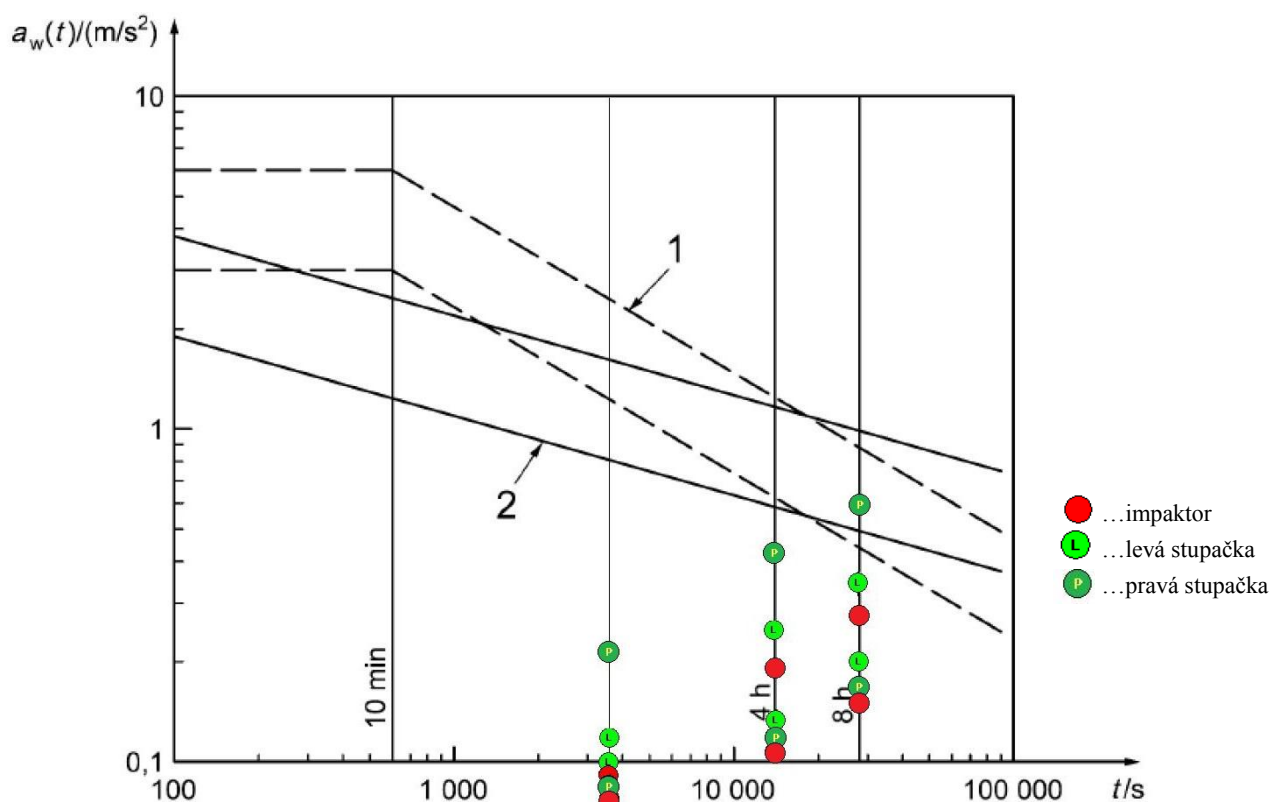
Tab. 14 Hodnoty pořízené analyzátozem BK4447

Měřicí místo	Režim	MTVV			VDV			A(1)	A(4)	A(8)
		X	Y	Z	X	Y	Z	Souhrnná	Souhrnná	Souhrnná
ŘÍDÍTKA L	Volnoběh	0,864	0,216	0,310	-	-	-	0,288	0,577	0,816
ŘÍDÍTKA P		1,793	0,202	0,593	-	-	-	0,442	0,885	1,251
STUPAČKA L		0,143	0,145	0,237	0,189	0,199	0,448	0,073	0,146	0,207
STUPAČKA P		0,166	0,178	0,208	0,221	0,219	0,356	0,061	0,123	0,175
IMPAKTOR		0,047	0,025	0,182	0,089	0,028	0,361	0,056	0,112	0,159
ŘÍDÍTKA L	5750 ot./min.	1,345	0,487	1,047	-	-	-	0,612	1,225	1,733
ŘÍDÍTKA P		1,609	1,021	0,780	-	-	-	0,667	1,335	1,888
STUPAČKA L		0,187	0,310	0,374	0,246	0,382	0,741	0,128	0,256	0,362
STUPAČKA P		0,166	0,157	0,615	0,222	0,226	1,180	0,214	0,428	0,606
IMPAKTOR		0,248	0,173	0,312	0,335	0,232	0,668	0,099	0,198	0,280

Tučně vyznačené hodnoty jsou následně zaneseny do grafu „Směrná pásma ohrožení zdraví“. Normované jsou pouze hodnoty pro vibrace na sedadle (viz Impaktor), které jsou v grafu červenou barvou. Pro porovnání byly uvedeny i hodnoty vibrací na stupačkách, které také přispívají k celkovým vibracím lidského těla.

Z grafu jasně vyplývá, že na motocyklovém sedadle nehrozí při osmihodinové expozici vibracím o velikosti A(8) – žádné ohrožení zdraví – viz tab. 14. Na stupačkách, které jsou vyznačeny zeleně, se v režimu 5750 ot./min. dostáváme do pásma, kdy se má dbát zvýšené opatrnosti vzhledem ke zdravotním rizikům.

Princip výpočtu hodnota vibrací A(8) je v analyzátoru prováděn na základě vztahu (19) popsaného v kapitole 4.10.3.



Obr. 29 Směrná pásma ohrožení zdraví s vyznačenými naměřenými hodnotami

4.10.2. Celkové vibrace z hlediska posouzení vlivu účinků na pohodlí

Tato problematika posuzování je zahrnuta v normě ISO 2631-1. Úprava vstupních dat je nejprve podrobena frekvenčnímu vážení s činiteli W_D a W_k , popsány v kapitole 4.5, tabulka 13. Dále je nutné provést výpočet souhrnné hodnoty vibrací podle kapitoly 4.9, vztahu 17 s použitím následujících korekcí:

Tab. 15 Korekce pro posuzování účinku vibrací na pohodlí

Měřící místo	Povrch sedadla			Stupačky		
	x	y	z	x	y	z
Násobící činitel k	1	1	1	0,25	0,25	0,4

Měření musí zahrnovat všechny příslušné translační směry a může zahrnovat více než jeden bod, který ovlivňuje pohodlí. V případě motocyklu se jedná o povrch sedadla a stupačky. Vážené hodnoty naměřené v každé ose a každém měřícím bodu se musí dle normy uvádět samostatně. Přehled těchto vypočtených hodnot je v tabulce 16.

Tab. 16 Přehled dílčích vypočtených hodnot zrychlení (posouzení vlivu účinků na pohodlí)

Měřicí pozice	Režim měření	Osa	Efektivní vážená hodnota zrychlení (m.s ⁻²)
Stupačka LEVÁ	Volnoběh	X	0,013500
		Y	0,039798
		Z	0,065025
	5750 ot./min.	X	0,018509
		Y	0,108294
		Z	0,043815
Stupačka PRAVÁ	Volnoběh	X	0,007304
		Y	0,053584
		Z	0,068058
	5750 ot./min.	X	0,023997
		Y	0,148084
		Z	0,066890
Impaktor	Volnoběh	X	0,045233
		Y	0,035649
		Z	0,159273
	5750 ot./min.	X	0,107206
		Y	0,076794
		Z	0,280564

V každém měřicím bodu se pak musí vypočítat souhrnná hodnota vibrací jako druhá odmocnina ze součtu druhých mocnin, viz. vztah (18). Je-li pohodlí ovlivněno vibracemi ve více než jednom bodu, lze z druhé odmocniny součtu druhých mocnin souhrnných hodnot vibrací v bodu určit **celkovou souhrnnou hodnotu vibrací**. V našem případě se jedná o vibrace na sedadle a na stupačkách.

Tab. 17 Výsledné hodnoty posouzení vlivu na pohodlí řidiče motocyklu

Měřicí režim	Měřicí pozice	Souhrnná hodnota vibrací ($m.s^{-2}$)	Celková souhrnná hodnota vibrací ($m.s^{-2}$)	Hodnocení
Volnoběh	Stupačka LEVÁ	0,07742349	0,20551346	Vibrace nejsou nepohodlné
	Stupačka PRAVÁ	0,08692812		
	Impaktor	0,16936614		
5750 ot./min.	Stupačka LEVÁ	0,11827937	0,37023693	Vibrace jsou trochu nepohodlné
	Stupačka PRAVÁ	0,16425300		
	Impaktor	0,31001020		

Hodnocení proběhlo v souladu s ISO 2631-1, tato norma nestanovuje limitní hodnotu, ale pouze pravděpodobné reakce exponované osoby. Kompletní rozmezí hodnot a stupnice jsou uvedeny v tabulce 3.

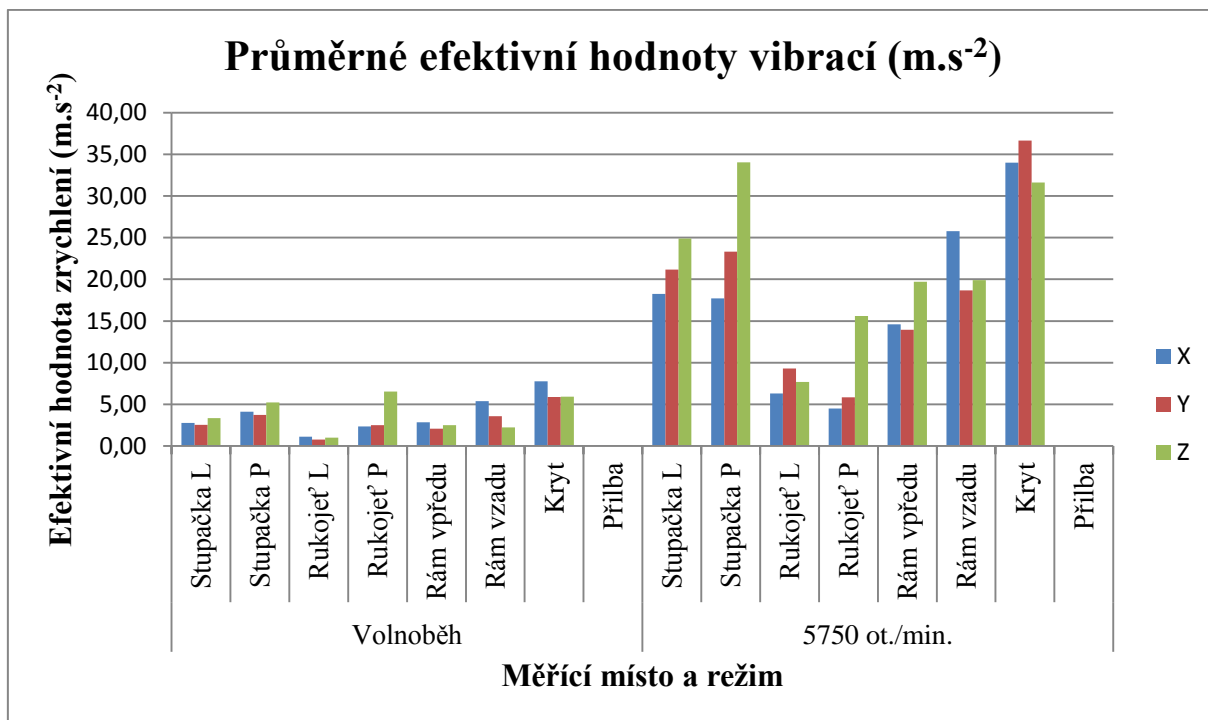
Tab. 18 Výsledky vibračních měření (bez použití vah a korekcí)

Režim	Měřicí pozice	Efektivní hodnoty vibrací ($m.s^{-2}$)								
		x			y			z		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Volnoběh	Stupačka L	3,89	2,41	2,04	2,54	2,36	2,68	3,42	3,77	2,86
	Stupačka P	4,32	4,13	3,87	3,15	3,04	5,00	5,85	5,73	4,06
	Rukojeť L	0,98	1,16	1,24	0,77	0,74	0,82	1,12	0,92	0,98
	Rukojeť P	0,75	1,81	4,51	1,21	1,01	5,22	1,51	1,31	16,76
	Rám vpředu	2,77	2,90	-	1,69	2,44	-	2,45	2,53	-
	Rám vzadu	5,16	5,57	-	3,34	3,80	-	2,37	2,06	-
	Kryt	7,70	7,85	-	8,06	3,68	-	9,10	2,74	-
	Přilba	0,06	0,00	-	0,18	0,00	-	0,17	0,00	-
5750 ot./min.	Stupačka L	20,59	18,78	15,34	16,28	19,13	28,15	23,94	27,52	23,26
	Stupačka P	17,87	18,55	16,70	17,79	22,86	29,30	30,60	37,78	33,74
	Rukojeť L	4,58	7,37	6,99	9,20	10,12	8,55	9,47	7,24	6,38
	Rukojeť P	3,79	5,15	4,51	6,82	5,46	5,22	12,61	17,45	16,76
	Rám vpředu	13,73	15,48	-	15,75	12,16	-	17,53	21,87	-
	Rám vzadu	24,78	26,75	-	17,44	19,94	-	19,89	19,95	-
	Kryt	33,77	34,24	-	47,03	26,28	-	42,78	20,48	-
	Přilba	0,12	0,00	-	0,18	0,00	-	0,17	0,00	-

Dominantní efektivní hodnoty zrychlení jsou v tabulce 18 vyznačeny tučně. Jedná se o nejvyšší hodnoty vibrací vyskytující se na daném měřicím místě při daném měřicím režimu.

Tab. 19 Výsledky vibračních měření [průměrné efektivní hodnoty ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) z 1. – 3. měření]

Režim	Měřicí pozice	Průměrná efektivní hodnota vibrací ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)		
		x	y	z
Volnoběh	Stupačka L	2,78	2,53	3,35
	Stupačka P	4,11	3,73	5,21
	Rukojeť L	1,13	0,78	1,01
	Rukojeť P	2,36	2,48	6,53
	Rám vpředu	2,83	2,06	2,49
	Rám vzadu	5,36	3,57	2,21
	Kryt	7,77	5,87	5,92
	Přilba	0,03	0,09	0,09
5750 ot./min.	Stupačka L	18,24	21,19	24,91
	Stupačka P	17,71	23,32	34,04
	Rukojeť L	6,31	9,29	7,70
	Rukojeť P	4,48	5,83	15,61
	Rám vpředu	14,61	13,96	19,70
	Rám vzadu	25,77	18,69	19,92
	Kryt	34,01	36,66	31,63
	Přilba	0,06	0,09	0,09



Obr. 30 Průměrné efektivní hodnoty vibrací (1. – 3. měření) bez použití korekcí a vah

4.10.3. Vibrace přenášené na ruce – posouzení možnosti vzniku bělení prstů

Denní expozice vibracím se odvozuje z velikosti vibrací (souhrnné hodnoty vibrací) a denní doby trvání expozice. Aby se usnadnilo porovnání denních expozic o různých dobách trvání, musí se denní expozice vibracím vyjádřit ve tvaru energeticky ekvivalentní frekvenčně vážené souhrnné hodnoty vibrací za 8 h – $A(8)$.

Teoretické souvislosti pro posuzování možnosti vzniku bělení prstů uvedeny v kapitole č.3. Souhrnné vážené hodnoty vibrací je nejprve nutné přepočíst na hodnotu $A(8)$, která odpovídá denní osmihodinové expozici. Tento přepočet je nutný, protože v tomto tvaru se uvádějí zákonné limitní hodnoty, stejně tak jako hodnoty pro posuzování vzniku podobných nemocí v normách. V tomto případě je podkladem norma ISO 5349-1. Výpočet hodnoty $A(8)$ provedeme podle vzorce (19):

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hvi}^2 T_i} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (19)$$

kde a_{hvi} je souhrnná hodnota vibrací [$m \cdot s^{-2}$],

N počet dílčích expozic vibracím,

T_i doba trvání i -té činnosti [s],

T_0 referenční doba 8 h (28800s).

Předpokládá se, že vibrace v každém ze tří směrů jsou stejně škodlivé. Proto použijeme stejné frekvenční vážení pro každou osu popsané v kapitole 4.5.2. Potenciál poškození z vibrací přenášených na ruce se proto odhaduje ze souhrnné hodnoty vibrací a_{hv} .

V teoretické části na obrázku 6 je zobrazena denní expozice vibracím $A(8)$, která se odhaduje za původce bělení prstů u 10% exponovaných osob. Následujícím vztahem (20) je možné vypočítat, ze jakou dobu v letech hrozí nebezpečí bělení prstů při dané denní expozici $A(8)$. Hodnoty pro průměrné expozice a výsledné vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 20.

$$D_y = 31,8 \cdot (A(8))^{-1,06} \quad (20)$$

kde $A(8)$ je denní expozice vibracím [$m \cdot s^{-2}$],

D_y průměrná celková doba trvání expozice v letech [7].

Tab. 20 Naměřené a vypočtené hodnoty pro posouzení rizika vzniku bělení prstů

Režim měření	Měřící místo	Souhrnná efektivní hodnota ($m \cdot s^{-2}$)	$A(8)$ ($m \cdot s^{-2}$)	D_y (roky)
Volnoběh	Rukojeť PRAVÁ	1,04103	0,01735	2338
	Rukojeť LEVÁ	0,34948	0,00582	7434
5750 ot./min.	Rukojeť PRAVÁ	15,70181	0,26170	132
	Rukojeť LEVÁ	4,25351	0,07089	526

Z tabulky je patrné, že ani v jednom režimu měření nejsou hodnoty vibrací nebezpečné. I při uvážení reálného provozu, kdy se vibrace budou měnit v závislosti na stylu jízdy a velikosti otáček motoru, je zde velká rezerva pro vznik rizika.

4.11. Analýza dat z pohledu legislativy

4.11.1. Pohled směrnice č. 44/2002

Tato směrnice definuje limitní hodnoty ve dvou kategoriích – vibrace působící na celé tělo (celkové vibrace) a vibrace soustavy ruka-paže (vibrace přenášené na ruce). Limitní hodnoty jsou dané ve tvaru A(8) – osmihodinové denní expozice. Viz. tabulka 21.

Tab. 21 Srovnání vypočtených hodnot A(8) a limitních hodnot dle směrnice č. 44/2002

Režim měření	Měřicí pozice	Vypočítaná hodnota A(8) (m.s ²)	Limitní hodnota expozice A(8) (m.s ²)	Limitní hodnota expozice vyvolávající akci A(8) (m.s ²)
Volnoběh	Rukojeť PRAVÁ	0,01735	5,00	2,50
	Rukojeť LEVÁ	0,00582		
	Stupačka PRAVÁ	0,00002	1,15	0,50
	Stupačka LEVÁ	0,00002		
	Impaktor	0,15900		
5750 ot./min.	Rukojeť PRAVÁ	0,26170	5,00	2,50
	Rukojeť LEVÁ	0,07089		
	Stupačka PRAVÁ	0,00050	1,15	0,50
	Stupačka LEVÁ	0,00102		
	Impaktor	0,28000		

4.11.2. Pohled zákona č. 148/2002

Zákon č. 148 definuje limitní hodnoty ve třech oblastech:

- Vibrace přenášené na ruce ($a_{ha,8h} = 1,4 \text{ m.s}^{-2}$),
- Celkové vertikální a horizontální vibrace ($a_{ew,8h} = 0,315 \text{ m.s}^{-2}$),
- Vibrace způsobující intenzivní kmitání v horní části páteře a hlavy ($a_{ew,8h} = 0,1 \text{ m.s}^{-2}$).

Podle této metodiky se vypočítají pouze vážené a souhrnné hodnoty vibrací a další přepočítání např. na osmihodinovou dobu se neprovádí. Upravuje se zákonná limitní hodnota přepočtením na dobu, po kterou se provádělo měření. V našem případě, kdy doba měření, resp. průměrování efektivní hodnoty byla pouze 8 vteřin, nemá tento výpočet smysl. Limitní hodnota byla několikanásobně vyšší.

Můžeme ale provést výpočet doby, po jejímž uplynutí by se při daném zatížení (jízdním režimu) dosáhlo limitní hodnoty a hrozilo by poškození zdraví.

Vztah pro korekčního činitele, ze kterého vycházíme:

$$k_T = \frac{480}{T} [-] \quad (21)$$

Kde k_T je korekční činitel,

T pracovní doba, po kterou vibrace působí na člověka.

Touto hodnotou korekce se násobí limitní hodnota podle vztahu

$$a_{max} = a_{max,8h} \cdot k_T [m \cdot s^{-2}] \quad (22)$$

Do vzorce za a_{max} dosadíme námi naměřenou hodnotu vibrací, limitní hodnotu $a_{max,8h}$ a spočítáme korekční činitel k_T . Dosadíme do vzorce (21) a obdržíme dobu, po kterou nehrozí v daném režimu ohrožení zdraví.

Pro přehlednější porovnání hodnot provedeme stanovení celkové souhrnné hodnoty vibrací, které v sobě zahrnuje účinek vibrací působících na člověka z více bodů najednou. V našem případě se jedná o:

- současné působení vibrací na sedadle a obou stupačkách,
- současné působení vibrací na levé a pravé rukojeti řidítek.

Tento výpočet je prováděn analogicky podle kap. 4.10.2, kdy celková hodnota vibrací z více pozic se počítá jako odmocnina ze součtu druhých mocnin jednotlivých měřicích pozic.

Tab. 22 Vypočtené hodnoty podle metodiky zákona č.148/2006

Režim provozu	Měřicí pozice	Souhrnná vážená hodnota vibrací (m.s ²)	Celková souhrnná vážená hodnota vibrací (m.s ²)	Doba provozu bez rizika poškození zdraví	
				min	h
Volnoběh	Stupačka LEVÁ	0,00108	0,17141	882	14,70
	Stupačka PRAVÁ	0,00090			
	Sedadlo (Impaktor)	0,17140			
	Řídítka LEVÁ	0,34948	1,09812	612	10,20
	Řídítka PRAVÁ	1,04103			
	Přilba	0,00199	0,00199	24178	402,97
5750 ot./min.	Stupačka LEVÁ	0,06117	0,34271	441	7,35
	Stupačka PRAVÁ	0,03013			
	Sedadlo (Impaktor)	0,33586			
	Řídítka LEVÁ	4,25351	16,26774	41	0,69
	Řídítka PRAVÁ	15,70181			
	Přilba	0,00212	0,00212	22637	377,29
10000 ot./min.	Přilba	0,01028	0,01028	4671	77,86

5. Závěr

Na základě širokého rozboru legislativy související s problematikou vibrací působících na člověka a díky velmi dobré kvalitě technického zázemí, byla provedena série technických experimentů, při kterých byla objektivně vyhodnocena naměřená data. Pro správné uchycení snímačů vibrací na měřeném objektu – motocyklu, bylo nutné vytvoření vlastních úchytů a využití speciálních snímačů, které mají zaručit velmi dobrý vztah mezi skutečnou (reálnou) hodnotou vibrací a naměřenými hodnotami.

Měření na motocyklu bylo prováděno v určitých provozních režimech v laboratoři Dopravní fakulty Jana Pernera. Metodika výpočtů byla dodržena v souladu s legislativou a limitní hodnoty evropské směrnice č. 44/2002/ES nebyly překročeny ani na jedné měřicí pozici, v žádném provozním režimu. Metodika, kterou stanovuje zákon č. 148/2006 je odlišná. Na jejím základě byly vypočteny časové úseky, po které nehrozí řidiči motocyklu, při soustavné jízdě, poškození zdraví. Nejrizikovější expozice byla naměřena a vypočtena na pravé rukojeti řídítek, kde je tato doba pouhých 41 minut.

Hodnoty prezentované v této práci se nedají uniformně přenést na jiný motocykl, ale mohou sloužit jako vodítko při provádění podobných analýz, které se v České republice z hlediska homologací a různých schvalování neprovádějí.

Použitá literatura

- [1] ČSN ISO 2041. Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 64 s.
- [2] SMETANA, Ctirad, et al. Hluk a vibrace, měření a hodnocení. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, c1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Ladislav. Technická diagnostika : Senzory - metody - analýza signálu. Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [4] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. Technická diagnostika a spolehlivost II. : Vibrodiagnostika. Vyd. 1. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-2948-0650-9.
- [5] *Sbírka zákonů Česká republika: Částka 51*. Praha: Ministerstvo vnitra, 2006. Dostupný z WWW: <<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2006/sb051-06.pdf>>. Nařízení vlády č. 148 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, s.1846-1855.
- [6] ČSN ISO 2631-1. Vibrace a rázy Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím : Část 1: Všeobecné požadavky. Vyd. 2. Praha: Český normalizační institut, Listopad 1999. 36 s.
- [7] ČSN ISO 5349-1. Vibrace – měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce – Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2002. 32 s.
- [8] BROCH, Jens Trampe Prof. Dipl. Ing. E.T.H. . Mechanical Vibration and Shock Measurement. Vyd. 4. Glostrup, Denmark : Brüel & Kjær, 1984. 370 s. ISBN 87-87355-36-1.
- [9] Brüel & Kjær. Brüel & Kjær : Creating sustainable value [online]. 2010 [cit. 2011-04-10]. What is PULSE?. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/Products/PULSEAnalyzerPlatform/WhatisPULSE.aspx>>.
- [10] MATOUŠEK, Oldřich; BAUMRUK, Jaroslav. Vibrace [online]. Vyd. 1. Praha : Státní zdravotní ústav, 1998 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf>>.
- [11] ČSN ISO 5349-2. Vibrace – měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce – Část 2: Praktický návod pro měření na pracovním místě. Praha: Český normalizační institut, 2002. 32 s.
- [12] Product Data : Miniature Triaxial DeltaTron® Accelerometers □ Types 4506, 4506 B, 4506 B002, 4506 B003 [online]. Naerum, Denmark : Brüel & Kjær, 2004 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/bp1838.pdf>>.

- [13] Brüel & Kjær : Creating sustainable value [online]. 2010 [cit. 2011-05-13]. Miniature Triaxial Piezoelectric IEPE Accelerometer, Brüel&Kjær. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/products/transducersconditioning/vibrationtransducers/accelerometers/4506.aspx>>.
- [14] Product Data : Piezoelectric Accelerometer DeltaTron® Triaxial Seat Accelerometer . Types 4515-B and 4515-B-002 [online]. Naerum, Denmark : Brüel & Kjær, 2007 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/bp2142.pdf>>.
- [15] FZS600 Service Manual [online]. Vyd. 1. [Japonsko] : Yamaha Motor Co., Ltd., Prosinec 1997 [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://homepage.ntlworld.com/whitem/Sevice%20Man%20Faz600.zip>>.
- [16] EU. Směrnice Evropského parlamentu a rady 2002/44/ES ze dne 25. června 2002 o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli (vibracemi). In Úřední věstník Evropské unie. 2002, 05/sv.4, 44, s. 235-241. Dostupný také z WWW: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:177:0013:0019:EN:PDF>>.
- [17] Česká republika. Nařízení vlády č. 148 : o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In Sbírka zákonů č.148/2006. 2006, 2006, 51, s. 1842-1854.
- [18] VDOLEČEK, František. SPOLEHLIVOST A TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA : Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu. Brno : FSI VUT, 2002. 49 s. Dostupné z WWW: <<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>>.
- [19] Measuring Vibration. Naerum, Denmark : Brüel & Kjær, 1982. 42 s. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>>.
- [20] Product Data : Human Vibration Analyzer Type 4447 [online]. Naerum, Denmark : Brüel & Kjær, 2009 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/bp2147.pdf>>.
- [21] SKEEN, Michael; LUCAS, Geoff. Brüel & Kjær Pulse Labshop Primer [online]. Vyd. 2. Sydney : University of New South Wales, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2005 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.varg.unsw.edu.au/Assets/link%20pdfs/Pulse%20Labshop%20Primer%20Rev%202.pdf>>.

Seznam tabulek

Tab. 1	Stupnice ze Stockholmského semináře (1986) [7]	17
Tab. 2	Hodnoty expozice vibracím A(8), u nichž lze očekávat vyvolání bělení prstů [7]	18
Tab. 3	Vliv vibrací na pohodlí člověka [6].....	19
Tab. 4	Limitní hodnoty vibrací dané směrnicí 44/2002/ES [16].....	21
Tab. 5	Limitní hodnoty vibrací dané zákonem č. 148/2006 [17]	21
Tab. 6	Parametry piezoelektrického snímače BK 4506	26
Tab. 7	Technické parametry impaktoru BK 4515-B [14]	27
Tab. 8	Požadavky na některé parametry snímačů [2].....	29
Tab. 9	Analyzátor Brüel & Kjær – platforma PULSE a jeho moduly.....	32
Tab. 10	Specifikace motocyklu	36
Tab. 11	Stanovení a popis pozic pro snímání vibrací na motocyklu.....	38
Tab. 12	Vnější podmínky jednotlivých vibračních měření	45
Tab. 13	Použití křivek frekvenčního vážení při základním vážení	52
Tab. 14	Hodnoty pořízené analyzátozem BK4447	57
Tab. 15	Korekce pro posuzování účinku vibrací na pohodlí.....	58
Tab. 16	Přehled dílčích vypočtených hodnot zrychlení (posouzení vlivu účinků na pohodlí) ..	59
Tab. 17	Výsledné hodnoty posouzení vlivu na pohodlí řidiče motocyklu	60
Tab. 18	Výsledky vibračních měření (bez použití vah a korekcí).....	61
Tab. 19	Výsledky vibračních měření [průměrné efektivní hodnoty ($m \cdot s^{-2}$) z 1. – 3. měření] ..	62
Tab. 20	Naměřené a vypočtené hodnoty pro posouzení rizika vzniku bělení prstů.....	64
Tab. 21	Srovnání vypočtených hodnot A(8) a limitních hodnot dle směrnice č. 44/2002	65
Tab. 22	Vypočtené hodnoty podle metodiky zákona č.148/2006	67

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení vibrací dle časového průběhu.....	11
Obr. 2 Znárodnění rezonančních frekvencí lidského těla [10]	12
Obr. 3 Soustava souřadnic lidského těla při poloze vsedě [6].....	14
Obr. 4 Soustava souřadnic ruky [7]	14
Obr. 5 Směrná pásma ohrožení zdraví [6].....	15
Obr. 6 Expozice vibracím k 10% prevalenci bělení prstů vyvolaného vibracemi [7].....	18
Obr. 7 Model piezoelektrického akcelerometru	25
Obr. 8 Třiosý piezoelektrický akcelerometr Brüel & Kjær typ 4506 [13]	25
Obr. 9 Impaktor sedací části lidského těla – Brüel & Kjær typ 4515-B [14].....	26
Obr. 10 Řez impaktorem a jeho rozměry [14].....	27
Obr. 11 Způsoby přichycení snímače a jejich rezonanční frekvence [3]	28
Obr. 12 Montážní klip Brüel & Kjær typ 4506	30
Obr. 13 Aplikační prostředí softwaru LabShop [21].....	33
Obr. 14 Analyzátor vibrací lidského těla BK 4447 [20].....	33
Obr. 15 Originální úchyty snímače dodávané s analyzátozem BK 4447 [20].....	34
Obr. 16 Třiosý akcelerometr 4524-B-001 [20].....	35
Obr. 17 Motocykl Yamaha FZS 600	36
Obr. 18 Znárodnění měřicích míst na motocyklu Yamaha FZS 600.....	39
Obr. 19 Uchycení snímače na víku předního ozubeného kola	40
Obr. 20 Snímač přilepený včelím voskem přímo na motocyklový rám.....	40
Obr. 21 Připevnění snímače pomocí úchyťů dle normy ISO 5349-2	41
Obr. 22 Úchyt pro měření vibrací na řídítkách.....	42
Obr. 23 Umístění impaktoru na motocyklovém sedadle	43
Obr. 24 Uchycení snímače na stupače motocyklu.....	43
Obr. 25 Umístění snímače na přilbě v oblasti výklenku pro komunikační systém Intercom...44	
Obr. 26 Křivky frekvenčního vážení pro celkové vibrace [6].....	52
Obr. 27 Křivky frekvenčního vážení pro vibrace přenášené na ruce [7].....	53
Obr. 28 Třetinooktávová analýza dat na motocyklových řídítkách - vlevo	54
Obr. 29 Směrná pásma ohrožení zdraví s vyznačenými naměřenými hodnotami.....	58
Obr. 30 Průměrné efektivní hodnoty vibrací (1. – 3. měření) bez použití korekcí a vah	63

Seznam zkratek

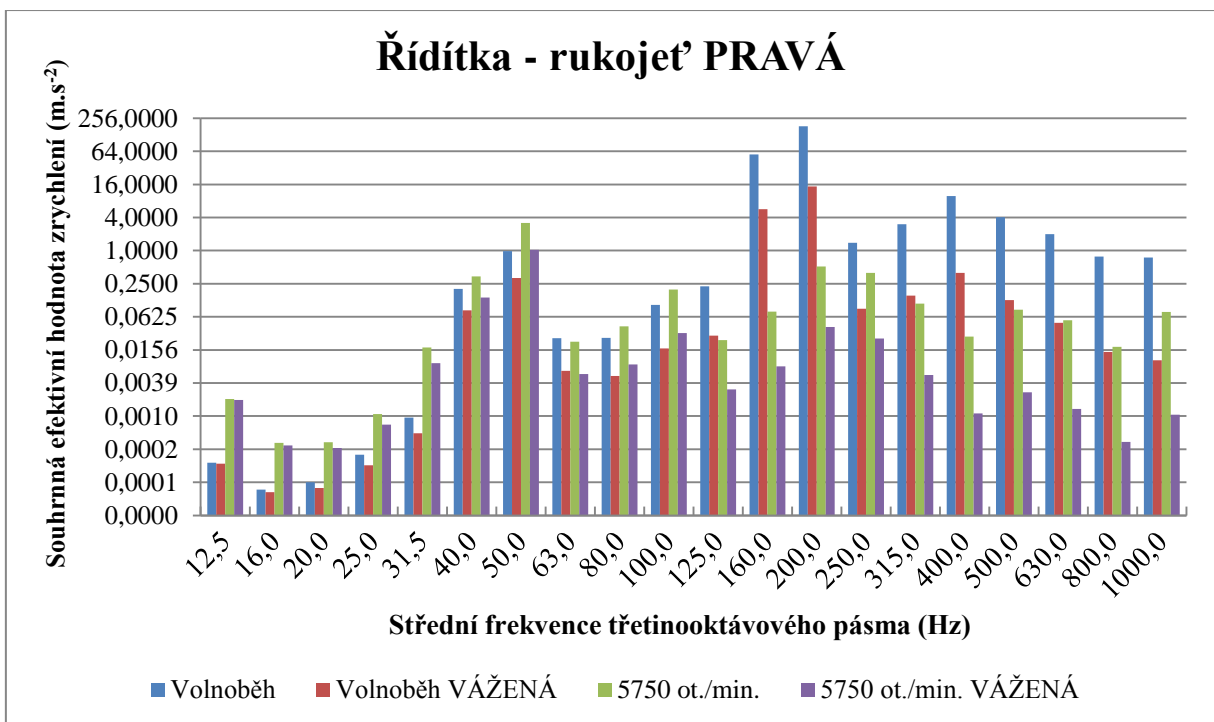
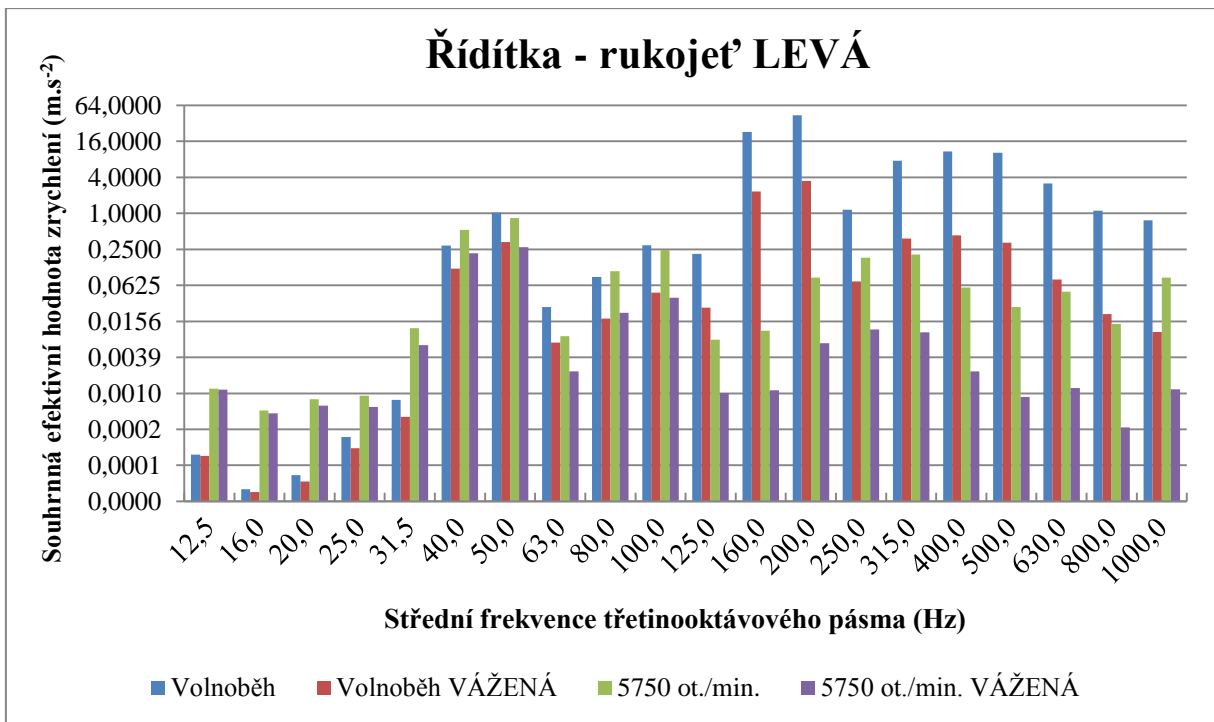
- CPB.....Constant percentage bandwidth – Procentuálně konstantní šířka pásma,
- CTS.....Carpal Tunnel Syndrome - Syndrom karpálního tunelu,
- DOHC.....Double Over Head Camshaft – Typ ventilového rozvodu pístového motoru,
- FFTFast Fourier Transform – Rychlá Fourierova transformace,
- ISO.....International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci,
- LCDLiquid crystal display – Displej z tekutých krystalů,
- MTVVMaximum Transient Vibration Value - Maximální přechodná hodnoty zrychlení,
- RMS.....Root Mean Square – Efektivní hodnota,
- USBUniversal Serial Bus – Univerzální sériová sběrnice,
- VDVVibration Dose Value - Hodnota dávky vibrací.

Seznam příloh

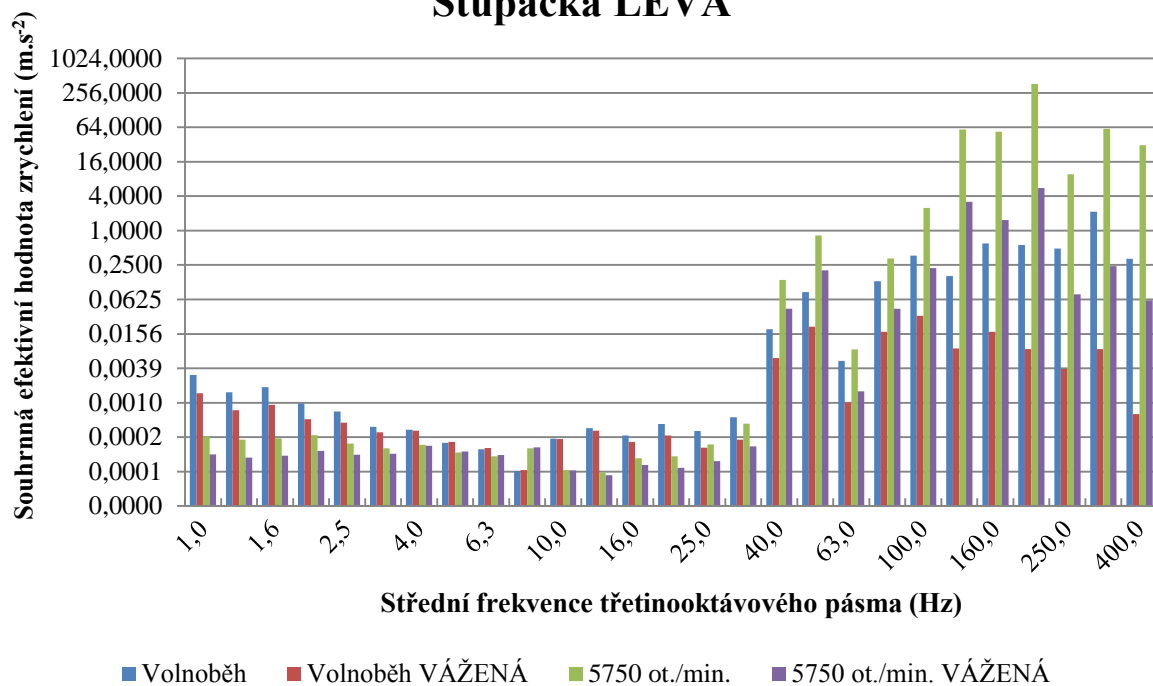
Příloha A – Výsledky třetinooktávová analýzy

Příloha B – Fotodokumentace procesu měření

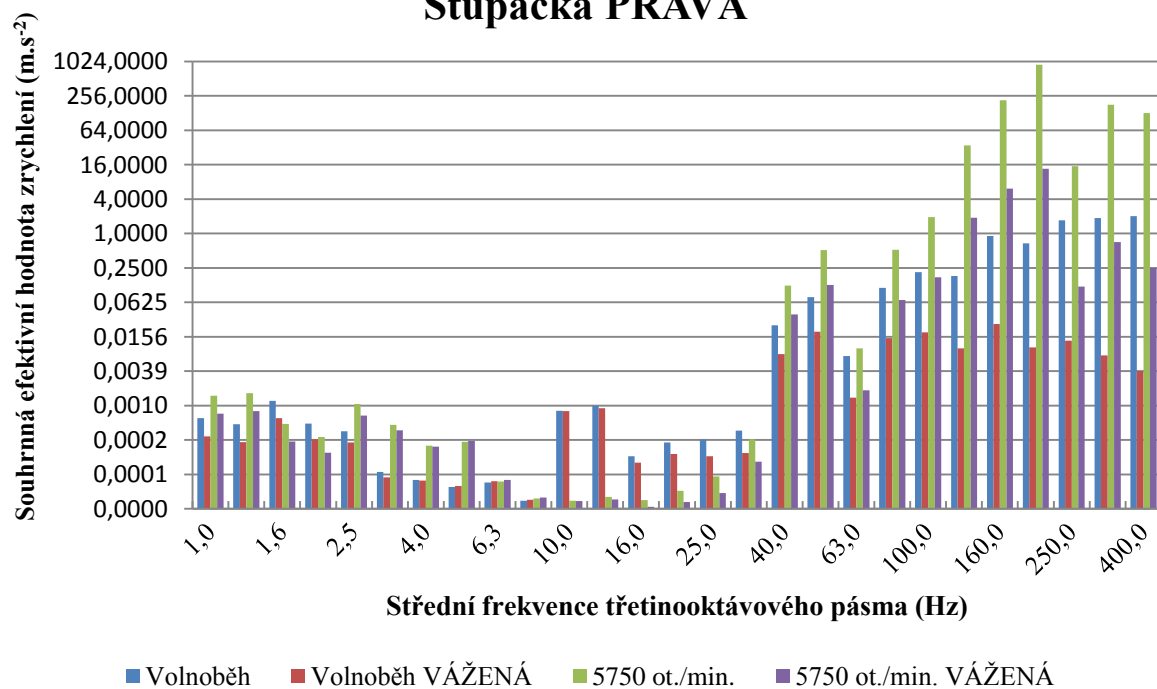
Příloha A – Výsledky třetinooktákové analýzy

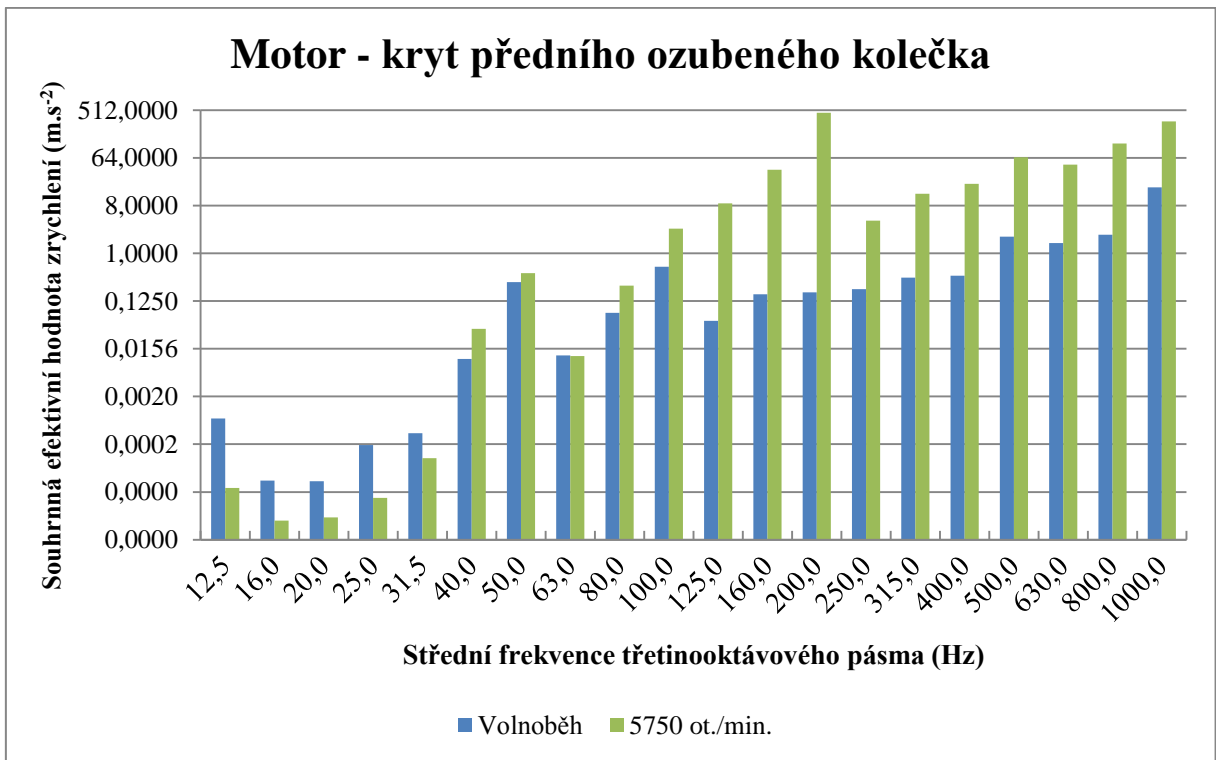
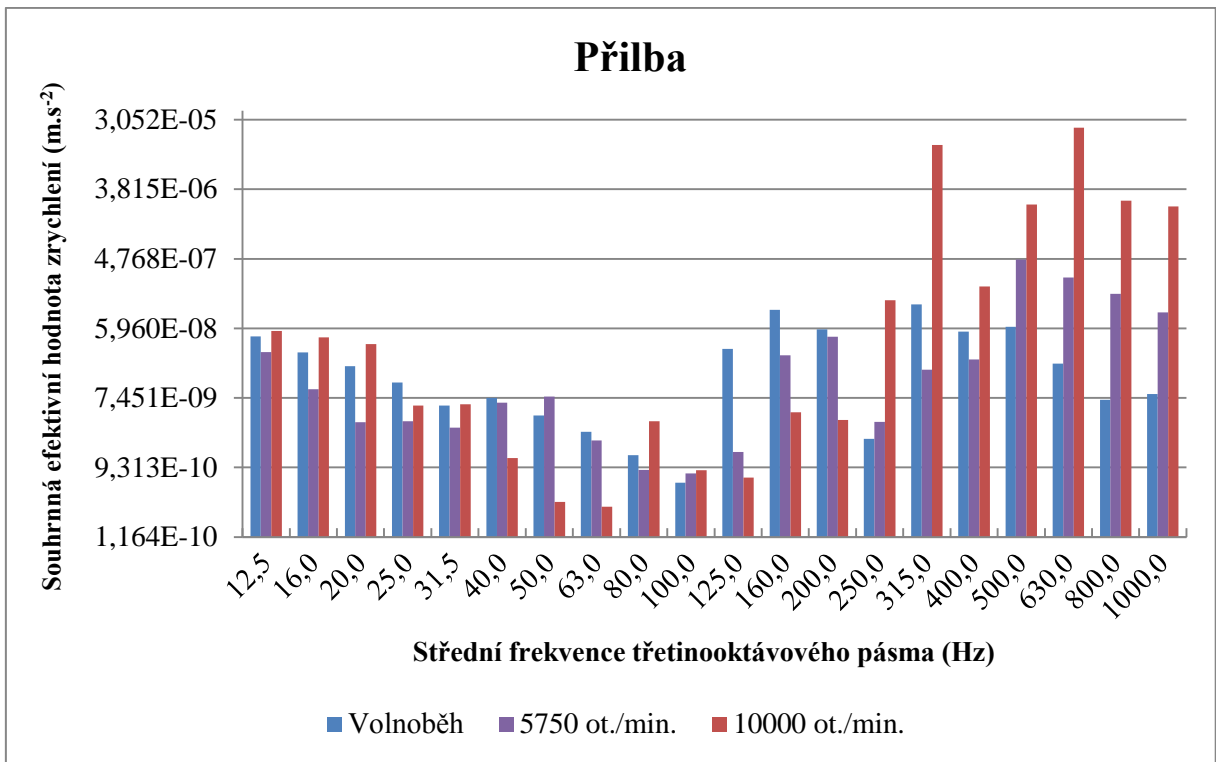


Stupačka LEVÁ

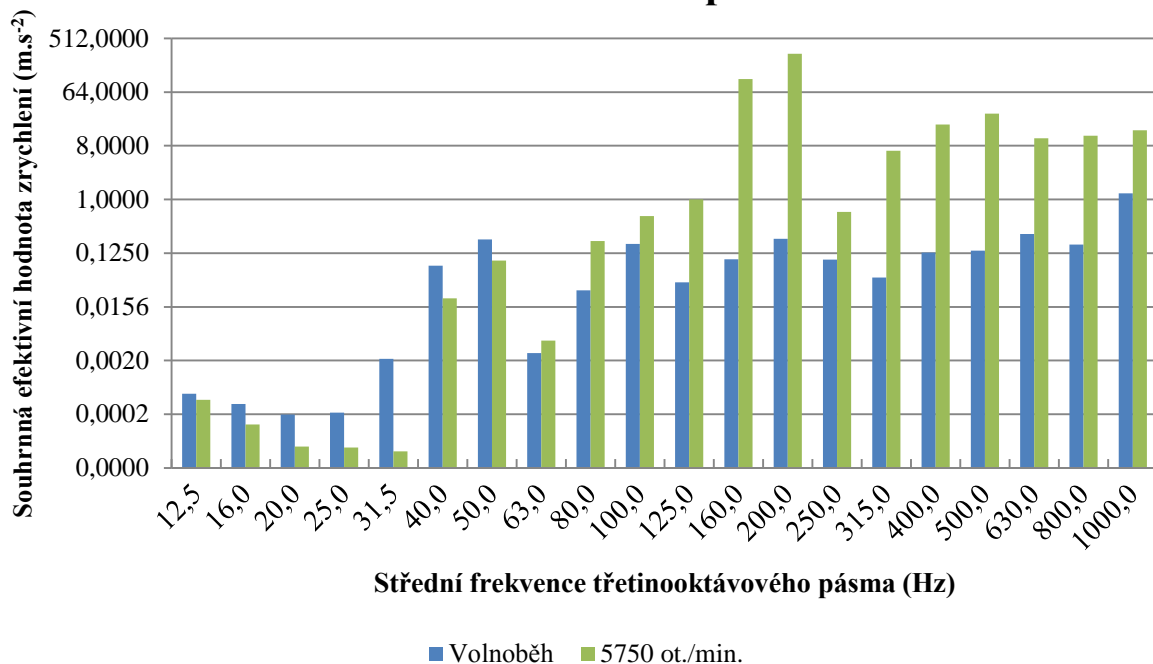


Stupačka PRAVÁ

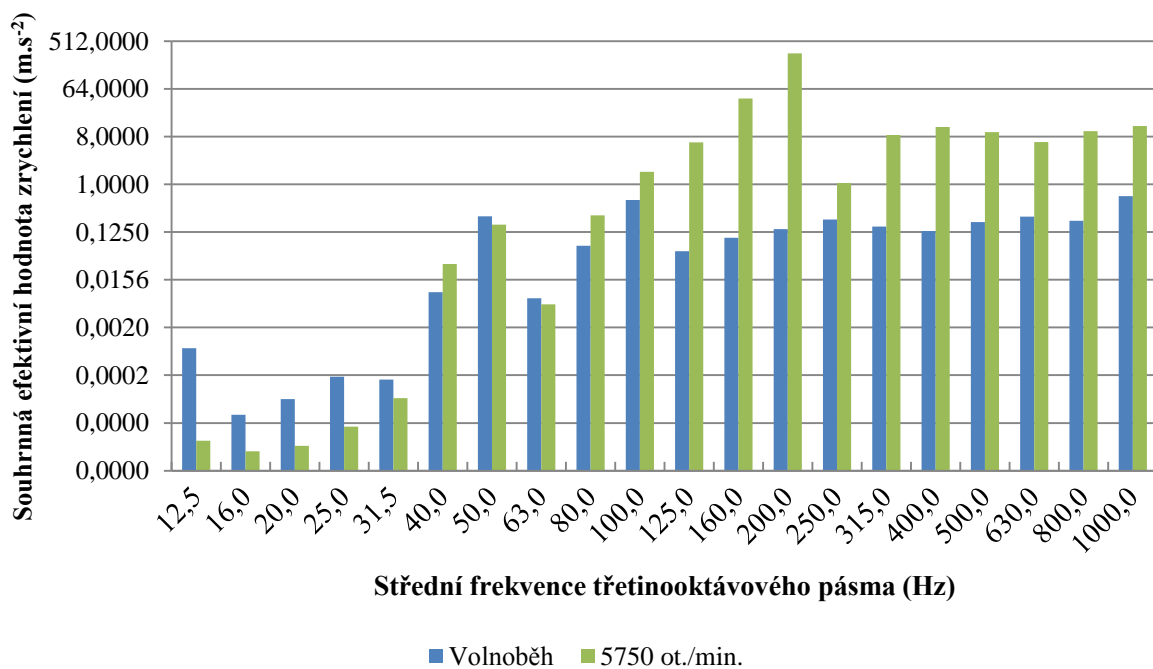




Rám - levá strana vpředu



Rám - levá strana vzadu



Příloha B – Fotodokumentace procesu měření



Nahřívání včelího vosku a jeho aplikace na snímač



Lepení snímače na levou rukojeť řídicí



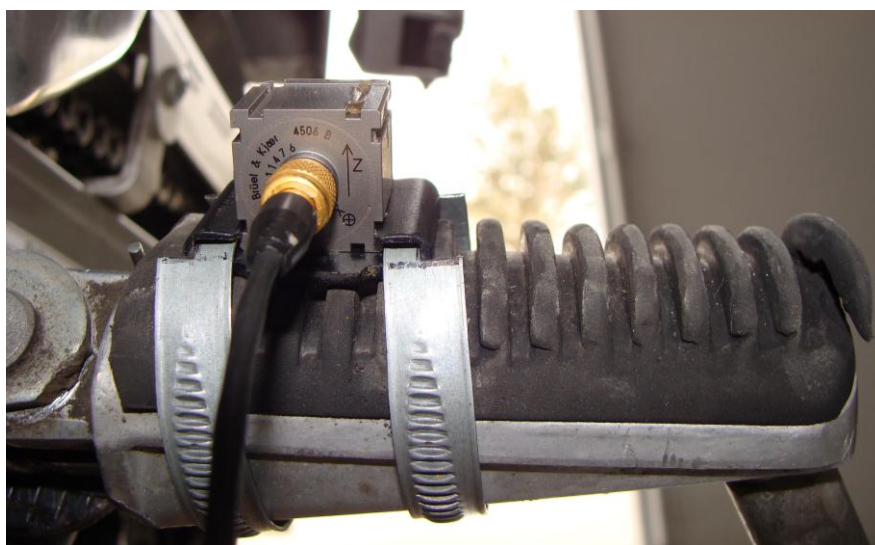
Proces měření – nutné zatížení tělem pro simulaci reálného zatížení v provozu



Speciální úchyt pro snímání vibrací na rukojeti – dodávaný společně s analyzátozem BK 4447



Uchopení snímače v průběhu měření



Snímač připevněný na levé stupačce pomocí podložky a upravených hadicových objímek



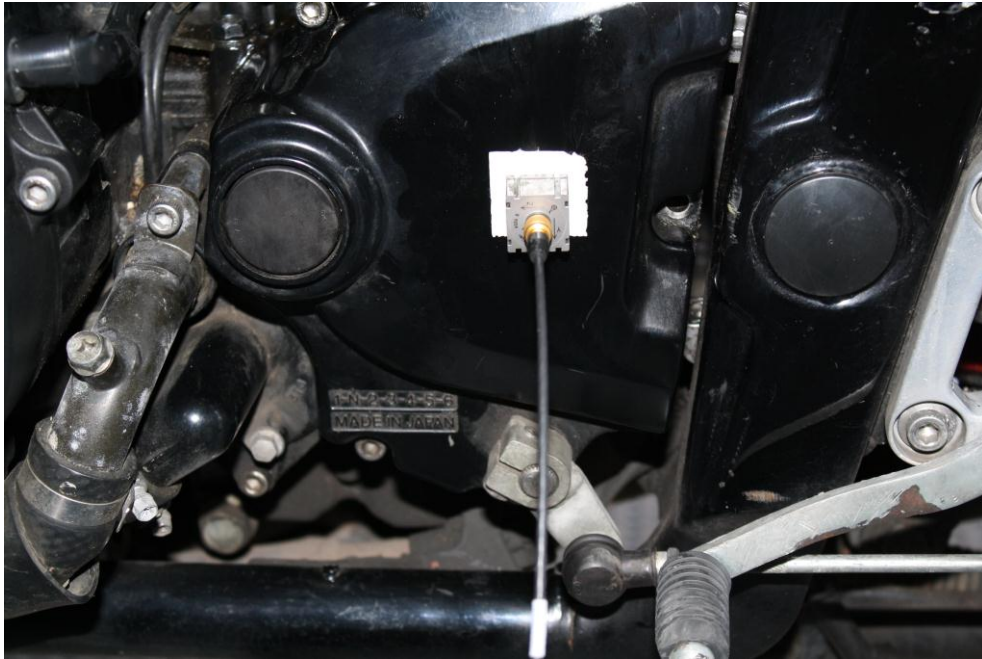
Zatížení stupačky vahou řidiče v průběhu měření



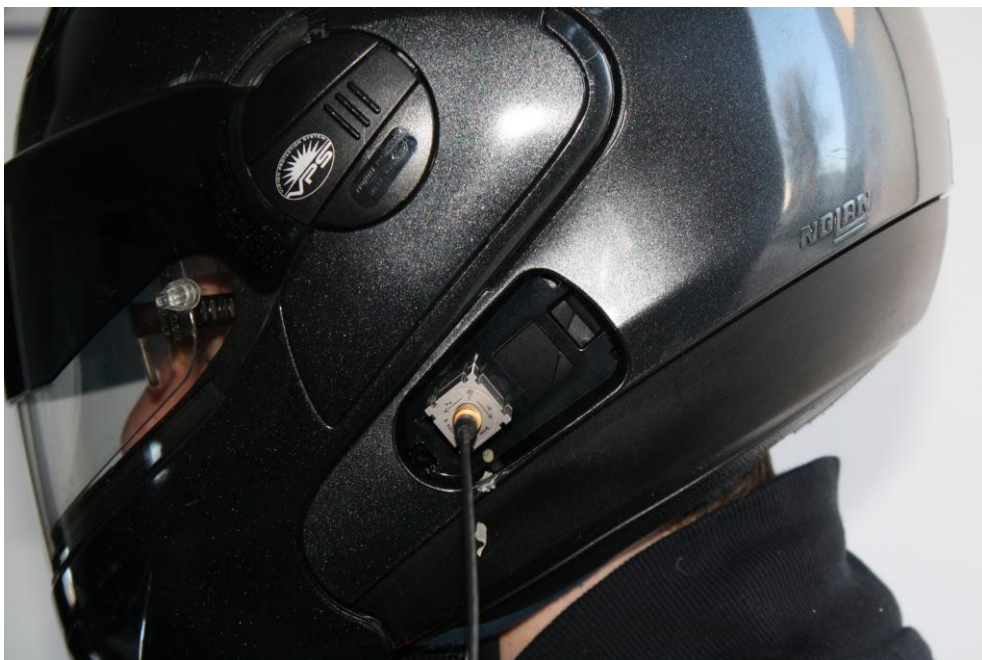
Snímač umístěný na motocyklovém rámu vzadu



Snímač na motocyklovém rámu vpředu



Snímač uchycený na víku předního ozubeného kola pomocí oboustranné lepicí pásky



Snímač umístěný na motocyklové přilbě (výklenek pro komunikační systém Intercom)



Celkový pohled na motocykl s připraveným impaktorem sedací části lidského těla



Průběh měření celkových vibrací na sedadle