

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vibrodiagnostika pohonu autobusu Scania  
Bc. Adéla Škarydová

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. Adéla ŠKARYDOVÁ**  
Osobní číslo: **D09783**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury**  
Název tématu: **Vibrodiagnostika pohonu autobusu Scania**  
Zadávací 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 studentka popíše metodiku měření vibrací a hluku a jejich využití v technické diagnostice. Navrhne způsob měření vibrací na převodovce a diferenciálu autobusu SCANIA a orientační měření hlučnosti pohonu autobusu. Měření realizuje dle možnosti u několika autobusů stejného typu. Naměřené hodnoty analyzuje vzhledem ke zjištěným informacím o provozu a údržbě jednotlivých autobusů. Doporučí, zda je možné tímto způsobem vibrodiagnostiky zjišťovat jejich aktuální technický stav.

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] JANOUSEK, 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 hlukem
- [10] Dokumentace fy SCANIA

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

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

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

Byla jsem seznámena 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 17. 5. 2011

Adéla Škarydová

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Kuklovi, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost, cenné rady a věcné připomínky, které mi poskytl při vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat vedení a zaměstnancům společnosti ProScan, a.s. za ochotu, poskytnutí informací a za možnost měření vibrací a hluku na autobusech SCANIA. Také děkuji svým rodičům a blízkým za neustálou podporu a trpělivost, kterou se mnou měli během studia a tvorbě této práce.

## **ANOTACE**

V teoretické části je popsána metodika měření vibrací a hluku a jejich využití v technické diagnostice. Dále je zde navrhnout způsob měření vibrací na převodovce a diferenciálu autobusu SCANIA a orientační měření hlučnosti pohonu autobusu.

Měření je realizováno u pěti autobusů stejného typu. Naměřené hodnoty jsou analyzovány vzhledem ke zjištěným informacím o provozu a údržbě jednotlivých autobusů.

V závěru práce je doporučení, zda je možné pomocí vibrodiagnostiky zjišťovat aktuální technický stav autobusů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vibrace, hluk, vibrodiagnostika, FFT, diagnostika pohonu.

## **TITLE**

Vibrodiagnostics of Scania bus gearing

## **ANNOTATION**

The theoretical part describes the methodology of vibration and noise measuring and their application in technical diagnostics. Then there is suggested way how to measure the vibration of the gearbox and differential of SCANIA bus and orientation noise measuring of the bus gearing.

Measurement has been realized in five buses of the same type. The measured values have been analyzed in view of identified information about operation and maintenance of buses.

There is recommendation whether it is possible to detect current technical condition of buses using vibrodiagnostics in the conclusion.

## **KEYWORDS**

Vibration, noise, vibrodiagnostics, FFT, gearing diagnostics.

# Obsah

Úvod.....	10
1 Vibrace .....	11
1.1 Definice .....	11
1.2 Veličiny .....	12
1.3 Měření vibrací .....	14
1.3.1 Snímače zrychlení.....	14
1.3.1.1 Piezoelektrický snímač .....	15
1.3.2 Rychlá Fourierova transformace.....	16
1.4 Upevnění snímačů .....	17
2 Hluk.....	20
2.1 Definice .....	20
2.2 Decibelové akustické veličiny.....	22
2.3 Šíření zvuku.....	23
2.3.1 Druhy vlnění .....	24
2.4 Měření hluku .....	24
2.4.1 Měřicí přístroje .....	25
2.4.1.1 Rozdělení mikrofonů.....	25
3 Měření vibrací a hluku autobusu.....	26
3.1 Popis měřených autobusů.....	26
3.1.1 Popis diferenciálu a převodovky .....	27
3.1.1.1 Diferenciál.....	27
3.1.1.2 Přebodovka.....	27
3.2 Popis měření.....	28
3.3 Měření vibrací .....	29



3.3.1 Analyzátor.....	29
3.3.2 Snímače zrychlení.....	31
3.3.3 Upevnění snímače.....	35
3.3.4 Frekvenční spektra.....	37
3.4 Měření hluku .....	37
4 Výsledky měření .....	39
4.1 Naměřená data.....	39
4.2 Vyhodnocení dat .....	40
4.2.1 Vibrace na motoru .....	41
4.2.2 Maximální hladina akustického tlaku.....	41
4.2.3 Vibrace na diferenciálu.....	41
Závěr .....	43
Seznam použité literatury a citací .....	44
Seznam obrázků .....	46
Seznam zkratk .....	47
Seznam příloh .....	48

## Úvod

Práce se zabývá sledováním vibrací a hluku. Vibrace byly měřeny na pohonu autobusu SCANIA OmniLink. Výsledky byly porovnány s měřením hluku jednotlivých pohonů. Měření na těchto autobusech nám umožnila firma ProScan, a.s. ve svém servisu ve Starém Hradišti nedaleko Pardubic.

Technická diagnostika je samostatný obor zabývající se bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. Měření vibrací a hluku jsou prostředky technické diagnostiky. Obor zabývající se měřením a vyhodnocováním vibrací se v technické diagnostice nazývá vibrodiagnostika. Měření intenzity hluku v technické diagnostice nazýváme hlukovou diagnostikou.

V práci je popsána základní teorie týkající se vibrací a hluku. Praktická část je věnována popisu realizovaného měření vibrací a hluku na čtyřech modelově totožných autobusech. Z naměřených hodnot vibrací se vytvoří frekvenční spektra, z kterých je možné ještě za pomoci údajů o konstrukčním řešení pohonu autobusů zjistit, jaký prvek pravděpodobně způsobuje vznik vyšších amplitud vibrací.

Cílem této diplomové práce je identifikovat, jaký prvek se více podílí na vibracích, zda převodovka nebo diferenciál. Vznik zvýšených vibrací souvisí se vznikem vyšších hodnot hluku v interiéru autobusu. Dalším cílem této práce je určit, zda je možné pomocí vibrodiagnostiky zjišťovat aktuální technický stav autobusů.

# 1 Vibrace

Měření vibrací je jedním z prostředků technické diagnostiky. Technická diagnostika je samostatný obor, který se zabývá bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky zjišťování technického stavu objektů.

Obor zabývající se měřením a vyhodnocováním vibrací se v technické diagnostice nazývá vibrodiagnostika. Prostřednictvím vibrodiagnostiky je možné zjistit, jaké prvky způsobují vibrace. Dále můžeme detekovat případné poruchy nebo dokonce zabránit jejich vzniku.

S vibracemi se můžeme setkat na mnoha místech, mohou mít pozitivní význam (například vibrační podavače, dopravníky, sbíječky, atd.) nebo negativní význam (vibrace mohou vyvolávat rezonance jiných dílů stroje nebo mohou být přenášeny na člověka, kde mohou mít negativní vliv na zdravotní stav člověka) [1, 2].

## 1.1 Definice

Pod pojmem vibrace rozumíme kmitání nebo též oscilaci mechanické soustavy. Dříve pro pojem vibrace byl používán název chvění.

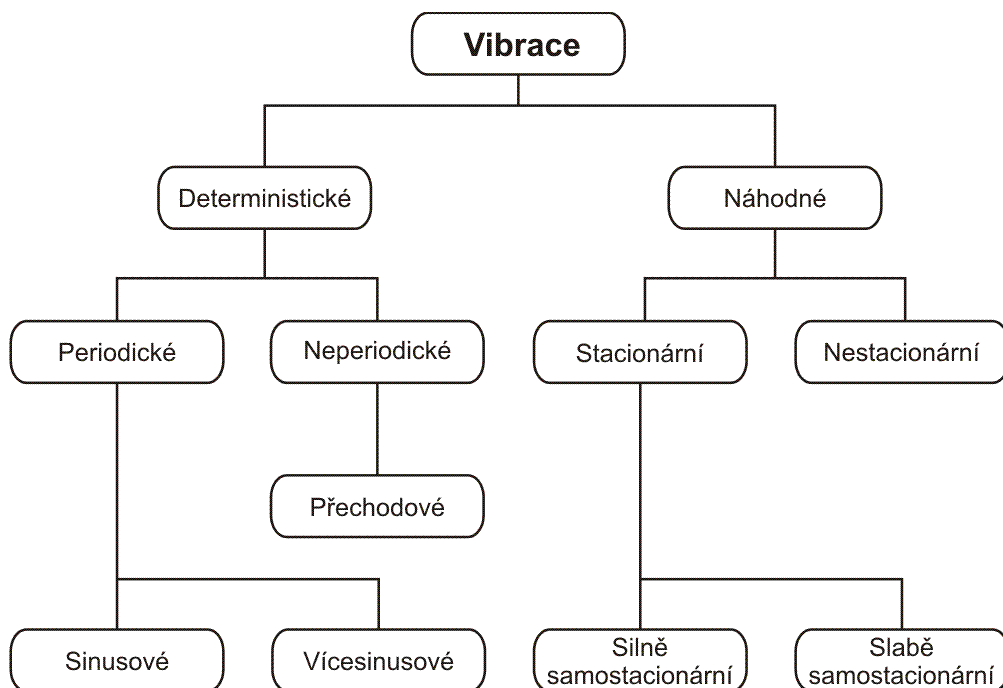
Dle normy ČSN ISO 2041 vibrace představují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Jednoduché kmitání můžeme popsat pomocí amplitudy a frekvence.

V analýze vibrací existují dvě základní složky, jsou jimi amplituda a frekvence (kmitočet). Amplituda určuje velikost vibrací. O amplitudě je možné říci, že čím vyšší je její hodnota, tím větší jsou i vibrace. Frekvenci můžeme definovat jako složku, která udává četnost jistého jevu v daném časovém úseku. Z velikosti zjištěné frekvence je možné identifikovat příčinu vibrací.

Mechanické rázy představují zvláštní skupinu kmitání. Mechanické rázy se vyznačují náhlou změnou síly, polohy, rychlosti nebo zrychlení. Tyto děje mohou v soustavě vybudit přechodové vzruchy [3, 4, 5].

## 1.2 Veličiny

Vibrace můžeme rozdělit podle časového průběhu do dvou skupin, jsou jimi vibrace deterministické a náhodné. Rozdělení vibrací podle časového průběhu je znázorněno na obrázku číslo 1. U deterministických vibrací je okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena přesně jejich časovým průběhem zaznamenaným dříve, než je daný časový okamžik. U náhodných vibrací nemůže být jejich okamžitá hodnota v daném čase určena z jejich časového průběhu. Deterministické vibrace je možné na rozdíl od náhodných vibrací popsat v čase matematickou funkcí.



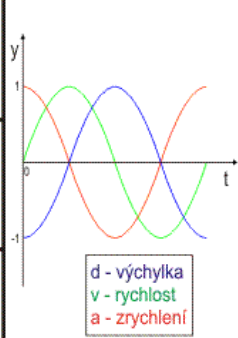
Obrázek 1: Rozdělení vibrací podle časového průběhu [4]

Veličiny, které charakterizují velikost vibrací, jsou výchylka, rychlost nebo zrychlení. Výchylku je vhodné použít pro určování mechanického napětí nebo u stavebních vibrací, atd. Rychlost vibrací se využívá pro určování energie vibrací. Zrychlení nalezne využití ve vibrační diagnostice nebo pro měření, která jsou předepsaná legislativou. Další možnou veličinou může být ryv kmitavého pohybu. Ryv je vektor, který udává časovou derivaci zrychlení.

Nejčastěji se pro zjištění velikosti vibrací používá zrychlení, protože měření zrychlení nevyklučuje použití jiných veličin - elektronické integrátory umožňují vyhodnocování rychlosti a výchylky na základě elektrických signálů.

V tabulce číslo 1 jsou zobrazeny jednotky, značky, souvislosti mezi jednotlivými veličinami a jejich fázový posun.

Tabulka 1: Veličiny, souvislosti

Veličina	Značení	Jednotka	Vztah	Fázový posun
Výchylka	$d$	$m$	$d = \int v dt$	
Rychlost	$v$	$m \cdot s^{-1}$	$v = \frac{dd}{dt}$	
Zrychlení	$a$	$m \cdot s^{-2}$	$a = \frac{dv}{dt}$	

Z této tabulky vyplývá, že při měření vibrací snímačem získáme signál úměrný některé z uvedených kinematických veličin. Z dané veličiny můžeme integrací nebo derivací získat zbývající dvě veličiny.

Výchylka, rychlost a zrychlení mohou být definovány následujícími vztahy:

$$d = d \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

$$v = d \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2)$$

$$a = -d \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3)$$

kde  $d$  značí výchylku,  $v$  rychlost,  $a$  zrychlení,  $t$  čas a  $\omega$  (omega) úhlovou rychlost [4].

## 1.3 Měření vibrací

Aby bylo možné měřit vibrace, musí být splněny následující požadavky, a to aby výstupní signál ze snímače odpovídal časovému průběhu mechanického kmitání a aby byl nastaven co nejširší kmitočtový rozsah. Další chyby mohou být důsledkem nepřesné kalibrace nebo mohou vyplývat z nelinearity snímače a měřicího systému. Snímače vibrací můžeme rozdělit podle typu snímané veličiny:

- *Snímače výchylky* (bezdotykové sondy,...),
- *Snímače rychlosti* (indukční snímače, mechanické otáčkoměry,...),
- *Snímače zrychlení* (akcelerometry), [4].

### 1.3.1 Snímače zrychlení

Akcelerometr je snímač, jehož výstup je přímo úměrný zrychlení. V praxi se k měření vibrací nejčastěji využívají snímače zrychlení.

Akcelerometry pokrývají široký dynamický rozsah (tento rozsah je dán poměrem mezi nejmenší a největší měřitelnou úrovní signálu). Často používaným akcelerometrem je piezoelektrický snímač zrychlení.

Snímače zrychlení je možné rozdělit podle způsobu použití na tři typy akcelerometrů:

- *Univerzální snímače zrychlení* - tento typ snímačů se v praxi používá velmi často. Dají se aplikovat na většinu oblastí použití,
- *Miniaturní snímače zrychlení* - jak z názvu vyplývá, jedná se o snímače velmi malých rozměrů. Váha těchto snímačů se pohybuje v rozmezí od poloviny gramu do dvou gramů. Používají se při měření lehkých nebo křehkých předmětů,
- *Speciální snímače zrychlení* - tento typ snímačů je možné používat pro měření zrychlení ve třech vzájemně kolmých směrech, nebo pro použití při vysokých teplotách nebo při cejchování jiných akcelerometrů, dále speciální snímače dokážou měřit chvění budov nebo mechanické rázy, atd.

Při měření vibrací na autobusech byly využity univerzální snímače zrychlení z důvodu, že nebyly měřeny vibrace za podmínek, které by vyžadovaly miniaturní nebo speciální snímače zrychlení [6].

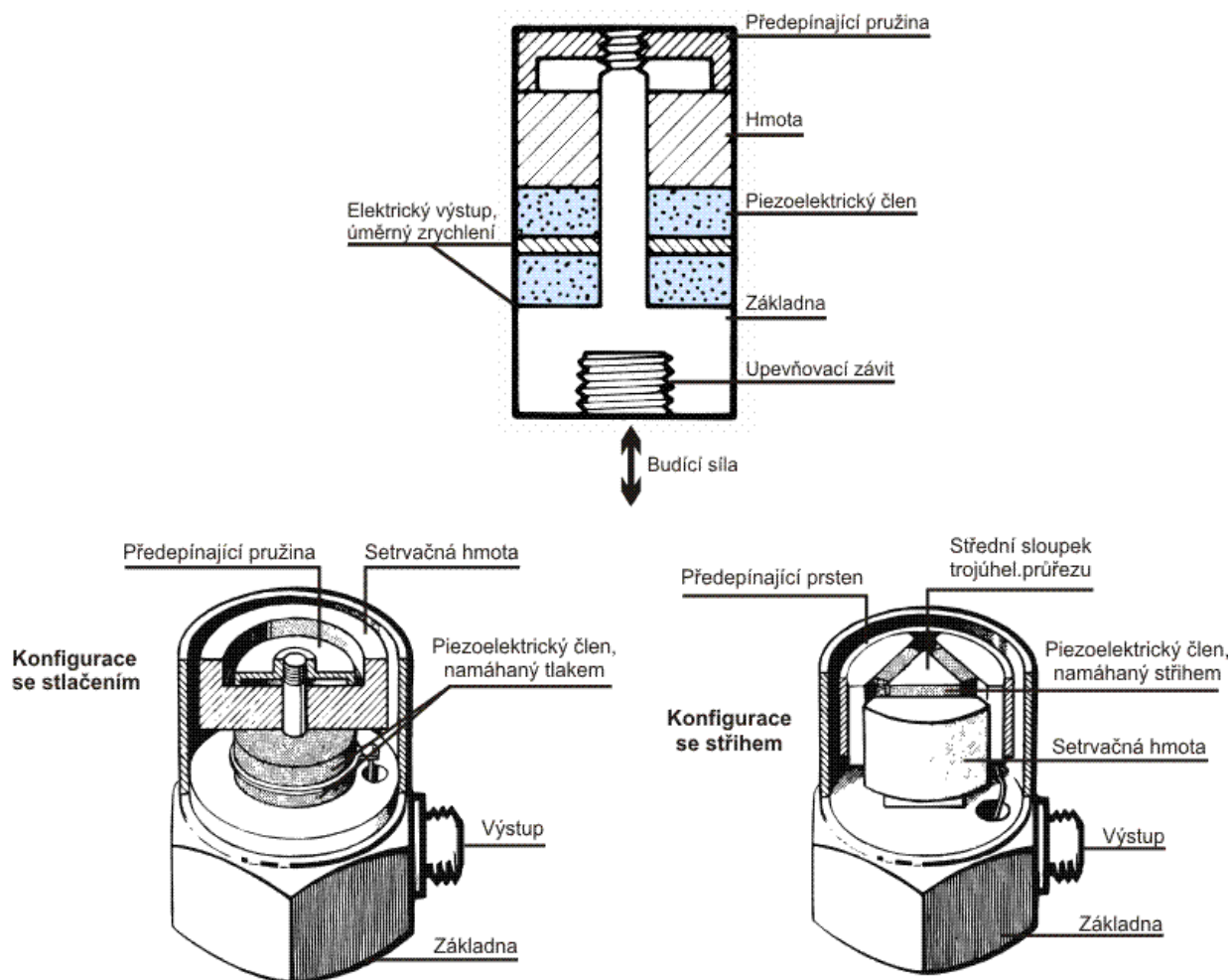
#### 1.3.1.1 Piezoelektrický snímač

Jak již z názvu vyplývá, tento snímač funguje na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalické látky generovat elektrické napětí při jejím deformování.

Základním prvkem tohoto snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, většinou se používá uměle polarizovaná piezoelektrická keramická hmota. Podstatou tohoto jevu je vznik elektrického náboje, který vzniká při mechanickém namáhání - v tahu, tlaku nebo střihu. Vznikající elektrický náboj je úměrný působící mechanické síle.

Existuje několik možných způsobů konstrukce akcelerometru, na obrázku číslo 2 jsou některé zobrazeny.

Piezoelektrické snímače zrychlení mají spoustu výhod, kvůli kterým jsou tak často v praxi využívány. Mezi tyto výhody patří jednoduchá konstrukce snímačů, široký pracovní kmitočtový a dynamický rozsah, mechanická odolnost, rozměry (mohou být velmi malé - lehké), pevná a odolná konstrukce, vysoká spolehlivost, dlouhodobá stabilita, atd.



Obrázek 2: Možné konstrukce akcelerometru [6]

Pro měření vibrací na pohonu autobusu byl využit piezoelektrický snímač zrychlení, který konstrukcí i měřicím rozsahem vyhovoval požadavkům na měření. [6].

### 1.3.2 Rychlá Fourierova transformace

Rychlou Fourierovu transformaci značíme zkratkou FFT z anglického výrazu Fast Fourier Transform. FFT je výpočetní metoda, jejímž cílem je převádět časový průběh do frekvenčního zobrazení. Metoda ukazuje vztah mezi jednotlivými frekvencemi a jejich amplitudami. FFT spektra pomáhají lokalizovat závadu na objektu nebo případně určit její příčinu.



Rychlá Fourierova transformace je algoritmus, který slouží pro efektivní výpočet diskrétní Fourierovy transformace (zkratka DFT) a její inverze. Podstatou metody FFT je volba zvláštní délky záznamu, a to  $N = 2^m$ , kde  $m$  je přirozené číslo.

Prostředky pro frekvenční analýzu signálů, které pracují na základě FFT, můžeme rozdělit do dvou skupin.

- FFT analyzátor s potřebnou úpravou vstupních signálů, tj. filtrace, A/D převod a jeho řízení,
- Software s FFT, který předpokládá záznam dat například kartou A/D převodníku.

V současnosti se používají analyzátor vibrací s FFT k vytváření spekter vibrací z naměřeného časového průběhu signálu. Takový typ analyzátoru byl využit při měření vibrací na autobusech [7].

## 1.4 Upevnění snímačů

Způsob, jakým se snímače upevňují k měřenému objektu, je jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují přesnost měření. Jestliže se snímač neupevní správně, sníží se jeho použitelný frekvenční rozsah. Aby snímání proběhlo co nejpřesněji, je nutné, aby upevnění snímače odpovídalo jeho požadavkům:

- *Velký dynamický rozsah,*
- *Široký kmitočtový rozsah,*
- *Zanedbatelný účinek rušivých vlivů - teplota, hluk nebo elektromagnetické pole, aj.,*
- *Nízké zkreslení výstupního signálu,*
- *Stabilita v čase.*

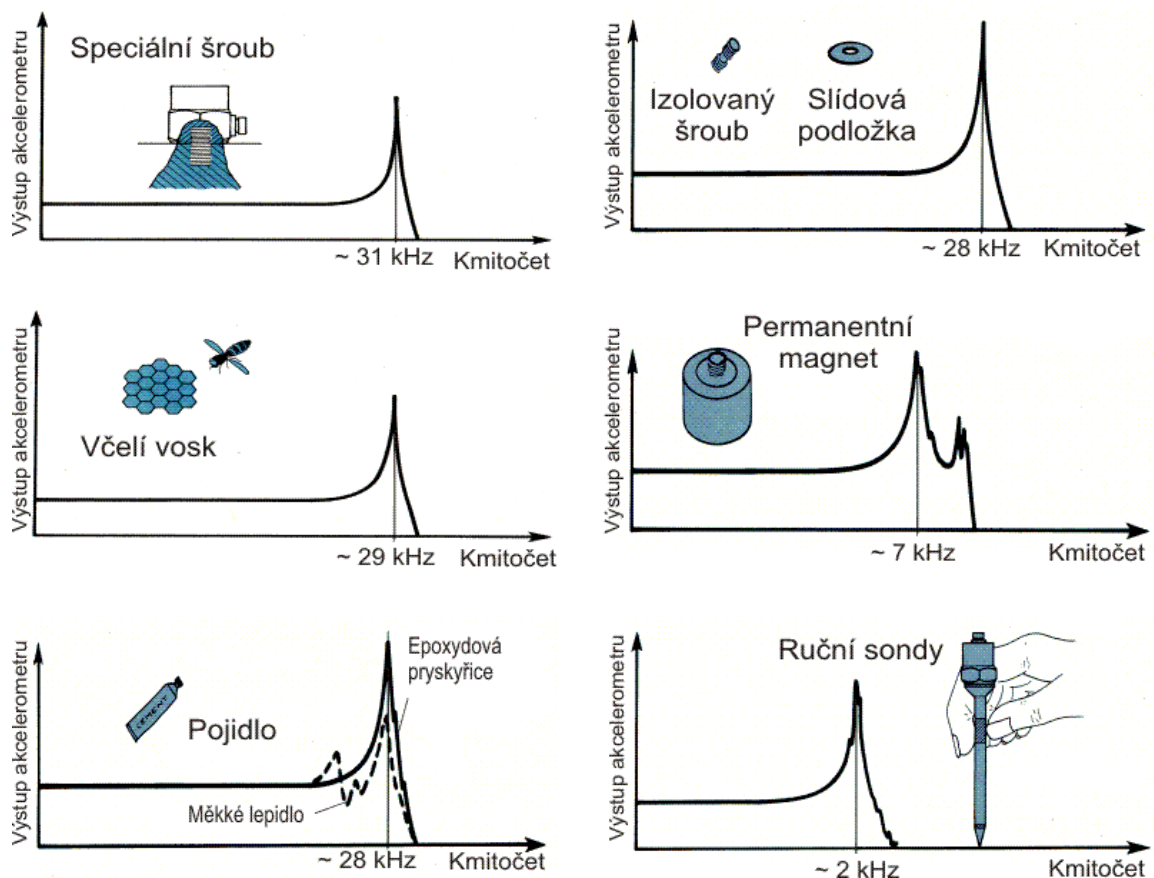
Způsob, kterým bude přichycen snímač k měřenému objektu, ovlivňuje snímání frekvenční rozsah vibrací. Možné způsoby upevnění snímačů:

1. *Šroubové spojení* - nejvýhodnější metoda (ideální upevnění je pomocí speciálních šroubů na rovném a hladkém povrchu). Je nutné, aby osa otvoru byla kolmá k povrchu zařízení. Dále je nutné, aby snímač byl

utáhnut předepsaným momentem. Pokud je šroub připevněn příliš silně nebo naopak, může dojít ke zkreslení naměřených hodnot.

2. *Včelí vosk* - tento způsob připevnění snímače vykazuje dobré vlastnosti. Připevnění včelím voskem není možné použít na místech, kde se objevuje teplota vyšší než 40°C.
3. *Pojivový materiál (lepidlo, tmel)* - přenosové vlastnosti záleží na druhu a tuhosti použitého lepidla.
4. *Lepicí páska* - má podobné vlastnosti jako při použití lepidla.
5. *Magnet* - jestliže má vyšetřovaná soustava vyšší hmotnost, není vhodné upevnění pomocí magnetu.
6. *Ruční sondy* - tento typ upevnění není vhodný pro měření vibrací. V případě použití ruční sondy jsou výsledky měření značně informativní.

Na obrázku číslo 3 jsou znázorněny jednotlivé techniky připevnění vibračních snímačů, je zde zobrazena i použitelná rezonanční frekvence.



Obrázek 3: Možnosti upevnění snímačů zrychlení [6]

U každého způsobu upevnění snímače je nutné, aby byly splněny základní požadavky:

1. Rezonanční frekvence by měla být výrazně vyšší než horní mezní frekvence měření.
2. Hmotnost snímače by měla být desetkrát nižší než je hmotnost vyšetřované soustavy.
3. Těžiště připevnění snímače by se mělo nacházet nad těžištěm zdroje vibrací.
4. Frekvenční rozsah akcelerometru by měl odpovídat předpokládanému rozsahu frekvence.

V rámci této práce bylo v praxi využito šroubové spojení snímače k měřenému objektu. Šroubové spojení zaručuje vysokou rezonanční frekvenci (tj. frekvence, na níž snímač rezonuje) [4].

## 2 Hluk

Hluk je jedním z mnoha faktorů, který ovlivňuje lidského činitele. Hluk může pocházet z různých druhů činností, například:

1. *Doprava* - silniční, železniční a letecká doprava se podílí na vzniku hluku. Ve velkých městech patří mezi hlavní zdroje hluku především doprava. Nejvyšší hlučnost se objevuje v okolí silnic, křižovatek, železničních přejezdů a letišť;
2. *Průmysl* - stroje a zařízení (sbíječky, vrtačky, motorové pily,...), které se používají v průmyslu, způsobují také velký hluk;
3. *Ostatní* - další činitelé, které souvisí se vznikem hluku, jsou samotní lidé a jimi prováděné činnosti. Mezi tyto činnosti patří například poslech hudby, užívání spotřebičů, atd. Dále se na hluku podílejí společenská zařízení (restaurační, sportovní,...).

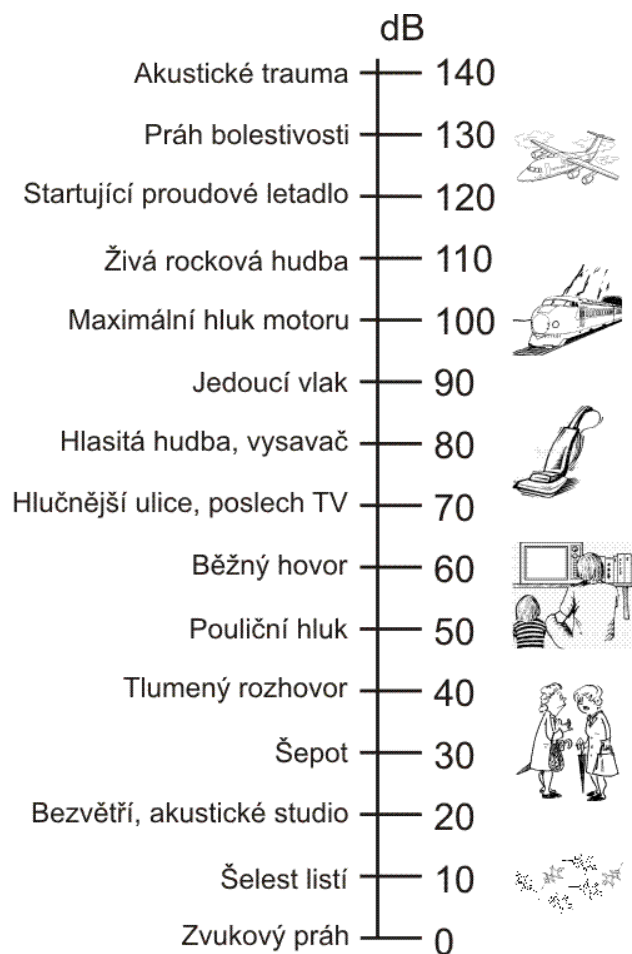
Hluk může mít negativní vliv na sluch, spánek, duševní zdraví, pracovní výkon nebo emocionální reakce. Proto je důležité tento děj eliminovat.

### 2.1 Definice

Hluk je možné charakterizovat jako zvuk obecného charakteru, který je nepříjemný lidskému sluchu. Hluk je pro člověka nežádoucím zvukem, který může mít škodlivé účinky na lidský organizmus (dlouhodobé působení hluku způsobuje trvalé zhoršení nebo dokonce ztrátu sluchu, dále hluk může negativně ovlivňovat kvalitu spánku, atd.).

Zvuk můžeme definovat jako mechanické kmitání pevného, kapalného nebo plynného prostředí v oblasti slyšitelných kmitočtů. Zvuk se tedy nešíří ve vakuu.

Lidské ucho je schopné vnímat kmitočty v rozmezí od 16 Hz až do 16 kHz (někdy se uvádí až 20 kHz). Na obrázku číslo 4 nalezneme příklady hladin intenzit zvuku z různých zdrojů činností. Nejčastěji používanou jednotkou pro hladinu intenzity zvuku je decibel (fyzikálně bezrozměrná míra - vyjadřuje podíl dvou hodnot).



Obrázek 4: Hladiny intenzit zvuku z různých zdrojů činností

Akustika se zabývá mechanickými kmity ve větším frekvenčním rozsahu než zvuk vnímaný lidským uchem. Ve frekvenčním rozsahu akustiky existují tři pásma:

- Infrazvuk* - zvuk o velmi nízkém kmitočtu, a to o frekvenci menší než 16 Hz;
- Slyšitelný zvuk* - mechanické vlnění pružného prostředí ve frekvenčním pásmu od 16 Hz do 20000 Hz;
- Ultrazvuk* - leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, tzn. frekvence je větší než 20000 Hz [8].

## 2.2 Decibelové akustické veličiny

Základní akustické veličiny se většinou přepočítávají na decibelové hladiny na základě jejich referenčních hodnot (všechny veličiny jsou uváděny ve stejných jednotkách - decibelech [dB]). K přepočtu dochází z důvodu lepší názornosti pro člověka (různé veličiny se v praxi liší o mnoho řádů - nepraktický zápis). Proto se v této kapitole budu zabývat decibelovými akustickými veličinami (hladina akustického tlaku, hladina akustického výkonu, hladina intenzity zvuku,...) a ne základními akustickými veličinami (akustický tlak, akustický výkon, intenzita zvuku,...).

Decibelové akustické veličiny jsou následující:

- a) *Hladina akustického výkonu* - akustický výkon je určen množstvím přenesené akustické energie za jednotku času. Hladinu akustického výkonu značíme  $L_w$  a je dána vztahem

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \text{ [dB]}, \quad (4)$$

kde  $P$  je sledovaný akustický výkon [W];

$P_0$  je referenční hodnota akustického výkonu,

$$P_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ [W]}.$$

- b) *Hladina akustického tlaku* - značíme  $L_p$  a je dána vztahem

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]}, \quad (5)$$

kde  $p$  je efektivní hodnota sledovaného akustického tlaku [Pa];

$p_0$  je referenční hodnota akustického tlaku,  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  [Pa].

Akustický tlak je skalární veličina

- c) *Hladina intenzity zvuku* - značíme  $L_i$  a je dána vztahem

$$L_i = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]}, \quad (6)$$

kde  $I$  je intenzita zvuku sledovaného akustického signálu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ];

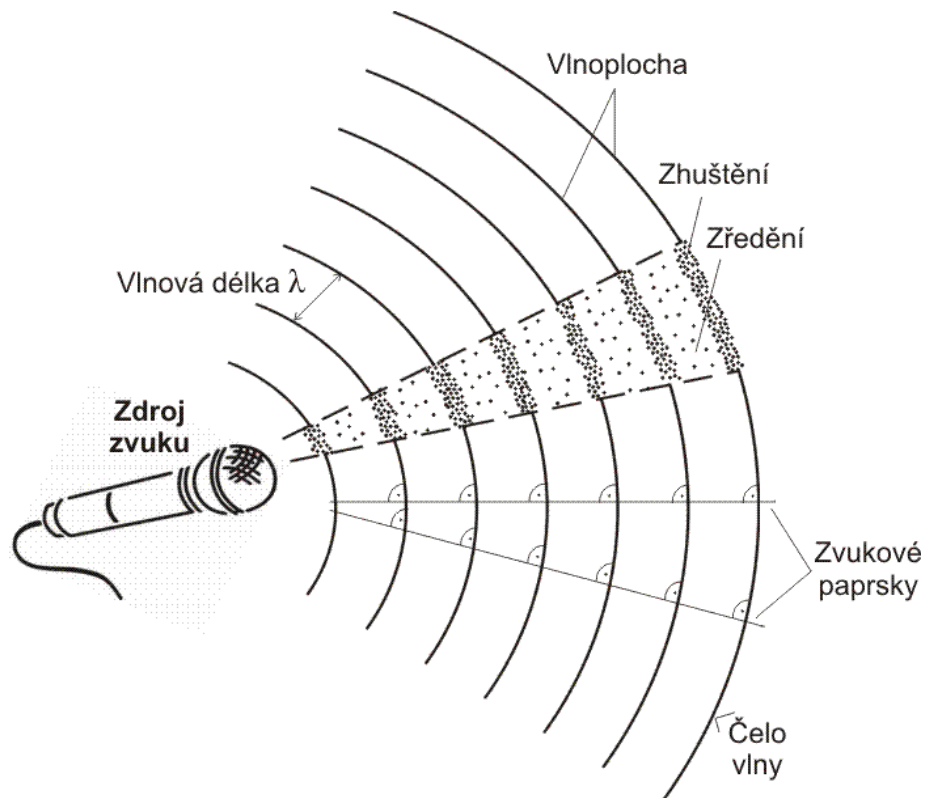
$I_0$  je referenční hodnota intenzity zvuku,  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Decibelovou akustickou veličinou byla v rámci měření hluku v praktické části maximální hladina akustického tlaku [8, 9].

### 2.3 Šíření zvuku

Za příčinu chvění a hluku považujeme kmitání. Kmitavý pohyb je zdrojem rozruchu, šíření rozruchu označujeme jako vlnění. Vlnoplochou nazýváme pomyslnou plochu mezi místy, kam se dostane rozruch ve stejný okamžik a s totožnou fází. Rozruch se šíří vlnami a směry kam se šíří vlnoplochy, jsou paprsky (jsou kolmé na vlnoplochy - v prostředích, kde jsou vlastnosti prostředí směrově nezávislé).

Na obrázku číslo 5 je znázorněno šíření zvukové vlny, vlnoplochy a zvukového paprsku [4].



Obrázek 5: Šíření zvuku [4]

### 2.3.1 Druhy vlnění

Během vlnění nedochází k přemístování částic v prostředí, pouze kmitají kolem rovnovážných poloh. Částice kmitají se stejnou amplitudou, ale s odlišnou fází.

Rozlišujeme dva typy vlnění podle směru šíření vlnění:

1. *Podélné vlnění (longitudinální)* - částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění. Pokud v prostředí vznikají pružné síly při stlačování a rozpínání, šíří se v prostředí právě tento druh vlnění;
2. *Příčné vlnění (transverzální)* - částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění. Tento druh vlnění může vzniknout tehdy, když při posuvu jedné vrstvy prostředí vzhledem ke druhé vznikají pružné síly, které se snaží vrátit posunutou vrstvu zpět do rovnovážné polohy. Existuje několik druhů příčného vlnění:
  - a) Torzní vlnění;
  - b) Ohybové vlnění;
  - c) Povrchové vlny [4].

### 2.4 Měření hluku

Jestliže chceme, aby výsledek měření byl akceptovatelný, reprodukovatelný a průkazný, je nutné, aby byl správně zvolen a dodržen postup měření. V některých případech je dokonce nutné řídit se podle příslušných norem a předpisů.

Měření hluku strojů a zařízení, měření hluku silniční dopravy, leteckého provozu, měření hluku v pracovním nebo mimopracovním prostředí probíhá v každém případě poněkud odlišně, a proto je důležité zvolit správnou metodiku měření.

Hluk je možné měřit pomocí různých metod, jako je například určování hladiny akustického tlaku, měření frekvenční analýzy signálů, určení akustického výkonu a mnoho dalších metod.



## 2.4.1 Měřicí přístroje

K měření hluku se používají hlukoměry. Jako snímač se pro měření hluku používá měřicí mikrofón. Konstrukce těchto mikrofónů bývá často založena na principu kondenzátoru. Jedná se tedy o kondenzátorový mikrofón, který obsahuje jednu pevnou elektrodu a druhou pohyblivou (ta tvoří membránu). Pohybem membrány se mění kapacita mezi elektrodami. Funkcí mikrofónu je přeměna akustické energie na energii elektrickou.

### 2.4.1.1 Rozdělení mikrofónů

Mikrofóny je možné dělit do kategorií podle různých kritérií. Například podle druhu akustického přijímače (tlakové, gradientní a vlnové) nebo také podle směrové charakteristiky, atd.

Rozdělení mikrofónů dle druhu elektromechanického měniče:

- *Uhlíkové* - pracují na principu změny přechodového odporu uhlíkových zrnků, kterými prochází stejnosměrný napájecí proud. Nevýhodou tohoto uhlíkového mikrofónu je velké zkreslení a nestabilní přenosové vlastnosti;
- *Elektrodynamické* - vyznačují se širokým kmitočtovým pásmem a malým zkreslením;
- *Elektrostatické*;
- *Elektretové*;
- *Piezoelektrické* - tyto mikrofóny jsou založeny na principu piezoelektrického jevu;
- *Elektromagnetické* - vhodné pouze pro přenos řeči.

U mikrofónů je důležité, jakou mají amplitudově frekvenční charakteristiku. Ta udává schopnost mikrofónu měřit hluk v určitém frekvenčním rozsahu. Dále je u mikrofónů důležitá směrová charakteristika, která udává citlivost mikrofónu ke zvuku určité frekvence přicházejícímu z různých směrů [8].

## 3 Měření vibrací a hluku autobusu

### 3.1 Popis měřených autobusů

Hluk a vibrace na diferenciálu a převodovce byly měřeny na autobusech SCANIA OMNILINK CL94 UB4X2LB. Popisovaný autobus je na obrázku číslo 6. Měření na těchto autobusech nám umožnila firma ProScan, a.s. (oficiální servis a dealer vozů a originálních dílů společnosti SCANIA). Byly změřeny celkem čtyři autobusy, jeden z těchto autobusů byl změřen dvakrát (v přibližně půlročním intervalu).



Obrázek 6: Autobus SCANIA OMNILINK [10]

Ujeté kilometry v době měření se pohybovaly v rozmezí od 150 000 do 500 000 kilometrů. Motory měřených autobusů se lišily výkonem, diferenciály měly rozdílný počet zubů na kuželovém soukolí.

Autobusy mají automatickou převodovku, z tohoto důvodu nebylo možné určit zařazený rychlostní stupeň.

Hluk a vibrace na autobusech byly měřeny v časovém období od prosince 2010 do února 2011. Naměřené hodnoty autobusu, který byl změřen dvakrát, pocházejí z června 2010.

V příloze č. 2 se nacházejí technické údaje o měřených autobusech (typ motoru a rozvodovky, převod zadní nápravy), dále je zde uvedeno datum měření a ujeté kilometry v době měření. Typ motoru u autobusů je stejný, liší se pouze výbavou (výkonem). Převod zadní nápravy je dvojího typu (4,22 nebo 4,88), tyto dva typy mají odlišný počet zubů na kuželovém soukolí. Počet zubů nebyl přesně identifikován, z frekvenčních spekter naměřených hodnot byly porovnávány pouze rozdíly amplitud.

O technickém stavu autobusů bylo pouze zjištěno, že u žádného z autobusů nebyla provedena žádná oprava týkající se pohonu autobusu a diferenciálu.

### **3.1.1 Popis diferenciálu a převodovky**

#### **3.1.1.1 Diferenciál**

Funkci diferenciálu u autobusu, ale i ostatních vozidel, můžeme definovat následovně. Diferenciál je takový mechanismus v poháněcí soustavě, který přenáší výkon motoru na kola a dále umožňuje kolům na stejné nápravě otáčet se různými rychlostmi. Kola na stejné nápravě se musí otáčet různými rychlostmi z toho důvodu, aby vozidlo mohlo projet zatáčku. Kolo, které projíždí vnitřní stranu zatáčky, musí jet pomaleji než kolo, které projíždí vnější stranou zatáčky.

Použitím diferenciálu nedojde k situaci, že by jedno kolo nebo dokonce obě, projížděla zatáčku smykem.

Rozvodovka je převodová skříň, jejímž úkolem je rozdělení točivého momentu vstupní hřídele na více hřídelí výstupních. Diferenciál je součástí rozvodovky, umožňuje diferencii otáček na výstupních hřídelích.

V příloze č. 1 je zobrazena rozvodovka autobusu SCANIA typu R660. Tento typ rozvodovky byl u všech měřených autobusů stejný [11].

#### **3.1.1.2 Převodovka**

Význam převodovky ve vozidlech je takový, že mění převodový poměr mezi motorem a koly. Z tohoto důvodu je možné efektivně využívat průběh točivého momentu. V autobusech, ale i jiných motorových vozidlech, se využívají převodovky víceúhňové.

Rozeznáváme dva typy převodovek, a to manuální a automatickou. Měřené autobusy mají převodovku automatickou. Automatická převodovka umožňuje řazení rychlostních stupňů za stálého tahu motoru. V tomto se automatické převodovky liší od manuálních. Dalším rozdílem je, že automatická převodovka řadí samovolně na rozdíl od mechanické. Všechny autobusy, které byly v rámci této práce měřeny, mají převodovku automatickou.

Převodovky byly u měřených autobusů totožné s výjimkou autobusu 2AB 0691, který měl program řazení čtyř rychlostní, ostatní autobusy měly program řazení pěti rychlostní.

### **3.2 Popis měření**

Měření probíhalo u všech autobusů vždy na stejné trase. Tato trasa vedla ze Starého Hradiště, kde sídlí firma ProScan, a.s. až k elektrárně u Opatovic nad Labem a zpět. Měření se provádělo vždy na rovných úsecích této silnice. Trasa je znázorněna na obrázku číslo 7.



Obrázek 7: Trasa měření [12]

### 3.3 Měření vibrací

K měření vibrací byl k dispozici analyzátor Brüel & Kjær modelového označení PULSE 3032A a dva snímače Brüel & Kjær Vibro s označením AS-062.

#### 3.3.1 Analyzátor

Analyzátor PULSE - šestikanálový modul typ 3032A je výrobkem dánské firmy Brüel & Kjær. Na obrázku číslo 8 je tento analyzátor zobrazen.

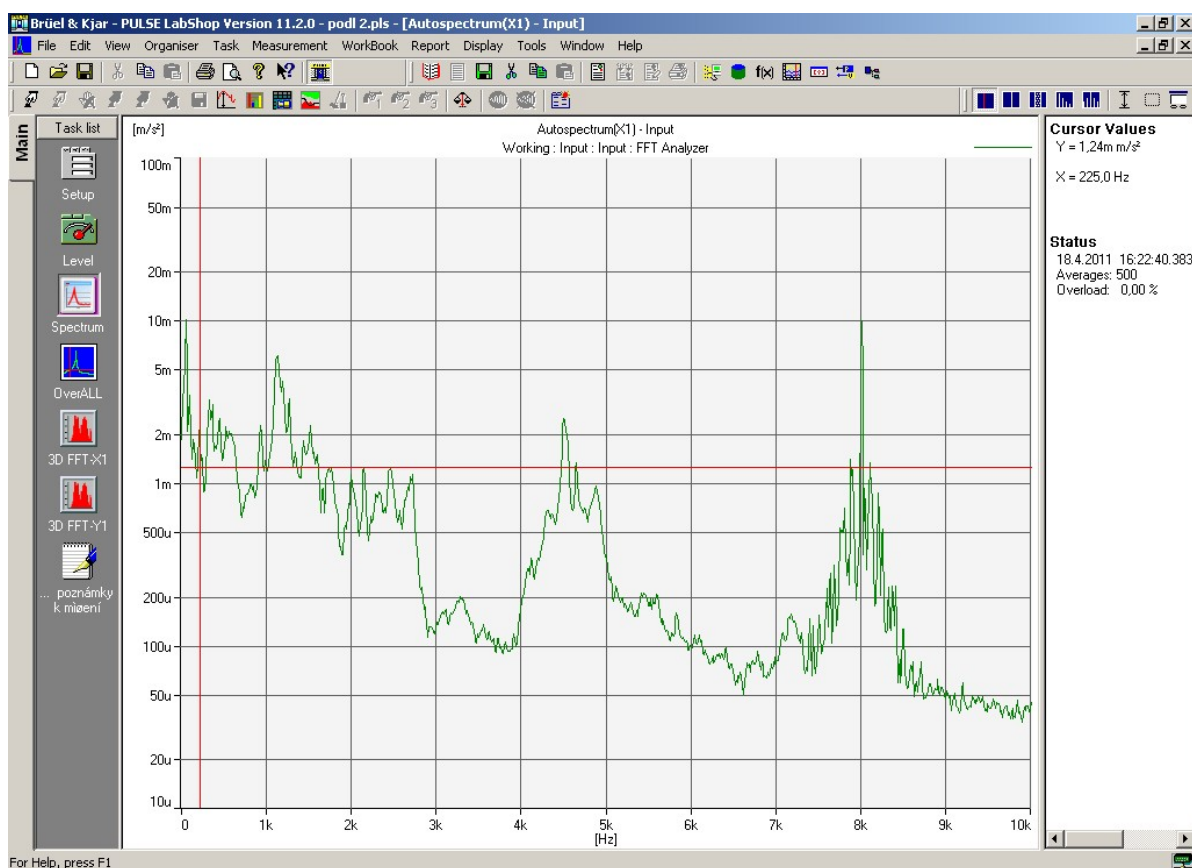


Obrázek 8: Analyzátor PULSE 3032A

Analyzátor se propojí s notebookem, ve kterém je nainstalovaný program LabShop. V tomto programu se před samotným měřením vytvoří projekt, po odměření hodnot se zde data zpracují a vyhodnotí.

V projektu měření je možné nastavit způsob zpracování měřeného signálu, dále lze definovat zobrazení měření na monitoru (např. časový průběh spektrum, kaskádové spektrum, atd.). Pro měření vibrací na autobusech SCANIA bylo nastaveno zobrazení časového průběhu a frekvenční spektrum vibrací od 0 do 10 kHz.

Prostředí programu LabShop je na obrázku číslo 9. Na tomto obrázku je ukázka spektra z měření vibrací, při kterém byl zkoumán rozdíl upevnění snímače bez podložky a s podložkou.



Obrázek 9: Prostředí programu LabShop

Princip analyzátoru je takový, že z akcelerometru se získá analogový signál, tento signál vstupuje do analyzátoru. Převod analogového signálu na digitální zajistí A/D převodník. Výsledný výpočet frekvenčního spektra se provede pomocí FFT.

Snímače zrychlení jsou s analyzátozem propojeny pomocí koaxiálních kabelů, dále je nutné propojit notebook s analyzátozem prostřednictvím kříženého síťového kabelu [13].

### 3.3.2 Snímače zrychlení

Snímání vibrací bylo realizováno pomocí dvou stejných piezoelektrických snímačů typu AS-062 od firmy Brüel & Kjær Vibro.

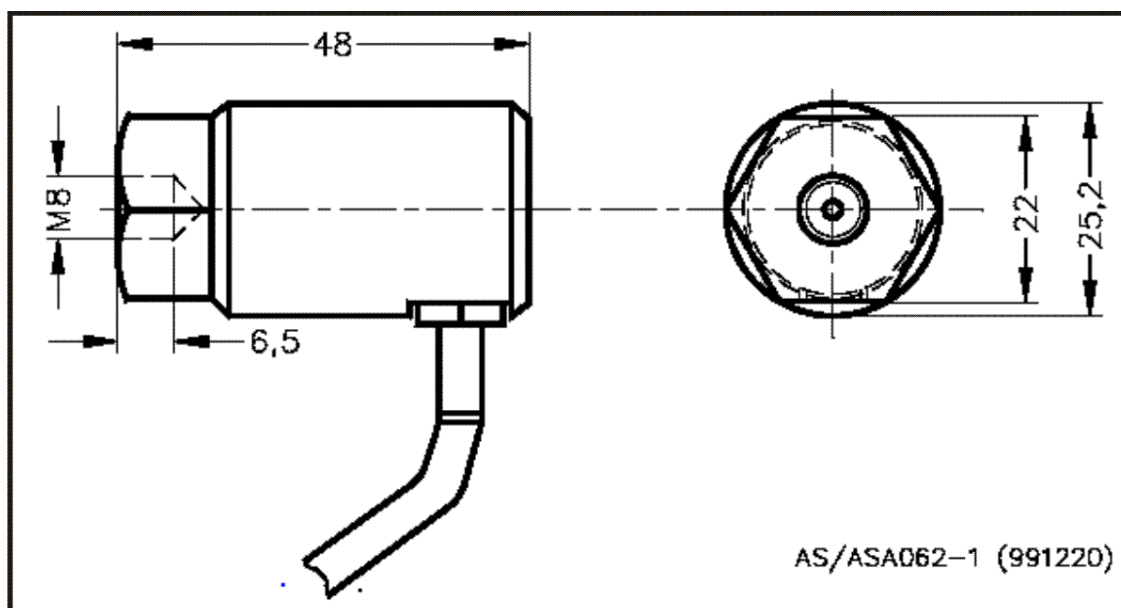
Měřicí rozsah těchto snímačů je od 4 Hz do 10 kHz s přesností  $\pm 0,5$  dB, rezonanční frekvence je vyšší než 20 kHz.

Tento akcelerometr se používá především pro měření zrychlení na strojích, které se otáčejí (například turbíny, čerpadla, kompresory, atd.).

Snímač zrychlení pracuje v souladu s piezoelektrickým principem komprese. Piezo-keramický disk a vnitřní čidlo hmoty vytváří systém hmotné pružiny ve snímači. Pokud je tento systém vystaven vibracím, hmota produkuje střídavé síly na keramickém disku. V důsledku piezo-efektu začne vyrábět elektrický náboj, který je úměrný velikosti zrychlení. Integrovaný zesilovač převádí tento elektrický signál do použitelného signálu - napětí.

Základní pravidlo pro upevnění těchto, ale i jiných snímačů, je: Hmotnost snímače zrychlení by měla být vždy alespoň desetkrát nižší než je hmotnost objektu, na kterém je snímač upevněn.

Na obrázku číslo 10 je zobrazen snímač zrychlení AS - 062, jsou zde uvedeny i jeho rozměry (v milimetrech).



Obrázek 10: Snímač zrychlení AS - 062 [14]

Snímače byly upevněny v horizontálním směru (osa měření - x) pomocí šroubového spojení na motoru a diferenciálu. Šroubové spojení snímače k měřenému objektu zaručuje vysokou rezonanční frekvenci. Ke snímači byla upevněna kovová podložka a tato kovová podložka byla poté přichycena také pomocí šroubu k měřicímu



místu. Snímač má deset metrů dlouhý integrovaný kabel, kvůli kterému by nebylo možné na motoru a diferenciálu snímač připevnit přímo. Dále tato podložka usnadnila a urychlila připevnění snímače. Výška podložky je 8 mm, šířka 30 mm a délka 60 mm. Možný vliv podložky na měření vibrací je popsán v následující kapitole.

Na obrázku číslo 11 je zobrazeno uchycení snímače na kovové podložce pomocí šroubu.



Obrázek 11: Přichycení snímače ke kovové podložce

Snímač na diferenciálu byl upevněn vždy na stejném místě, snímač na motoru nebylo možné kvůli uložení motoru jednoho z autobusů připevnit vždy na stejném místě, ale byla snaha uložit snímač vždy vodorovně (u tohoto autobusu byla osa měření mírně šikmo pod osou x). Na obrázcích číslo 12 a 13 je zobrazeno upevnění snímače na motoru a diferenciálu [14].



Obrázek 12: Upevnění snímače na motoru - pohled zdola

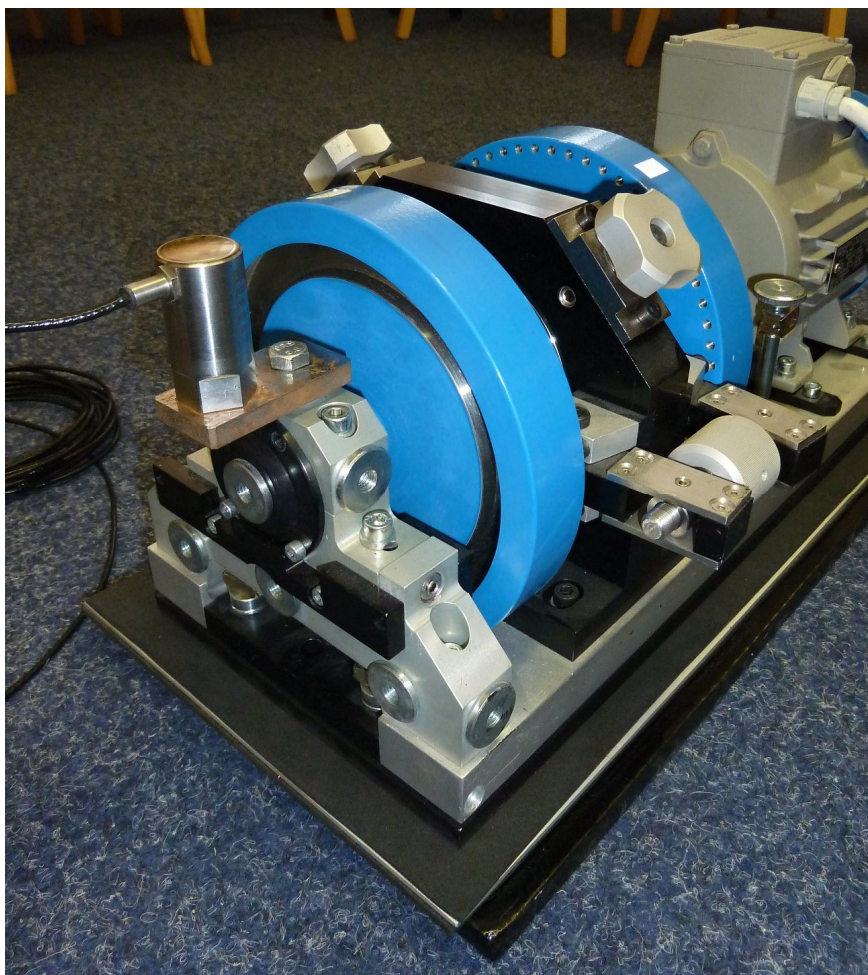


Obrázek 13: Upevnění snímače na diferenciálu - pohled ze strany

### 3.3.3 Upevnění snímače

Tato kapitola je věnována posouzení, zda měření vibrací ovlivňuje podložka, která byla připevněna šroubem ke snímači (upevnění snímače na kovové destičce je na obrázku číslo 11).

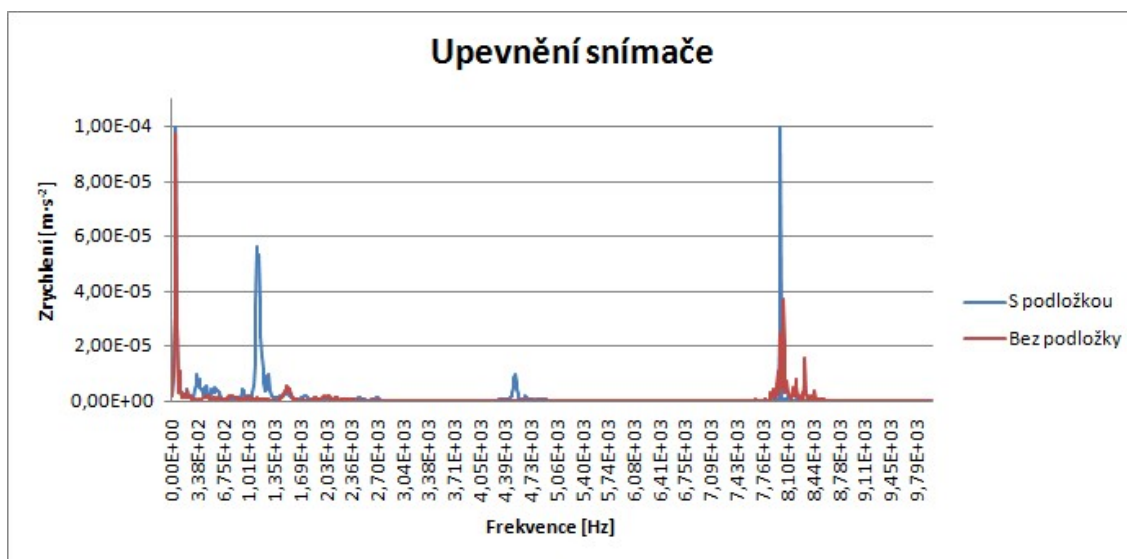
Toto měření bylo provedeno na zkušebním zařízení určenému k měření vibrací (viz. obrázek číslo 14). Bylo realizováno měření na snímači bez podložky a následně na snímači upevněném s podložkou.



Obrázek 14: Zkušební zařízení k měření vibrací

Oba dva způsoby upevnění byly realizovány za totožných podmínek. Vibrace byly naměřeny při otáčkách 1200 otáček za minutu.

Na obrázku číslo 15 je frekvenční spektrum, na kterém se nachází průběh měření vibrací. V tomto frekvenčním spektru jsou dvě datové řady - na jedné jsou vibrace s použitím podložky na snímači a na druhé bez použití podložky na snímači.



Obrázek 15: Upevnění snímače - s podložkou, bez podložky

Dle frekvenčního spektra výše by mohlo dojít k malému zkreslení naměřených hodnot vibrací. Jelikož byly vibrace pohonu měřeny vždy s použitím podložky, bylo by toto zkreslení stejné u všech frekvenčních spekter a výsledné porovnání hodnot by nemělo výrazně ovlivnit.

Na obrázku číslo 15 je patrné, že upevnění snímače s podložkou vykazuje vyšší amplitudy zrychlení při frekvenci přibližně 1 kHz a 8 kHz. Po porovnání všech spekter z přílohy číslo 3 bylo zjištěno, že při frekvenci kolem 8 kHz je amplituda konstantní - nedochází zde k jejímu výraznému nárůstu či poklesu. Při frekvenci kolem 1 kHz se u některých frekvenčních spekter (z přílohy číslo 3) objevují kolem této frekvence vyšší amplitudy, ale u spektra na obrázku číslo 15 má osa zrychlení řádově nižší hodnoty než u spekter z přílohy číslo 3. Z tohoto důvodu můžeme vliv podložky na naměřené hodnoty zanedbat.

Na výsledné porovnání frekvenčních spekter tedy nemá významný vliv použití snímače s podložkou.

### 3.3.4 Frekvenční spektra

U všech autobusů byly měřeny vibrace i hluk při rychlostech  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Vibrace byly měřeny u každého autobusu a při každé rychlosti několikrát (dvakrát až třikrát), poněvadž byly naměřené hodnoty při každé rychlosti podobné, byl proveden aritmetický průměr a z aritmetického průměru těchto hodnot byly vytvořeny jednotlivá frekvenční spektra.

Během měření vibrací byl měřicí rozsah u měřicího přístroje nastaven do 10 kHz. U frekvenčních spekter, kde je pouze jedna datová řada (spektra uvedená v příloze číslo 3), je zachován měřicí rozsah do 10 kHz. U frekvenčních spekter s výslednými křivkami pro všechny tři rychlosti se v intervalu od 6 do 10 kHz nenacházejí žádné výrazné amplitudy, u těchto spekter je tedy frekvenční osa pro zobrazení zkrácena na 6 kHz. Zkrácení frekvenční osy by bylo možné i u spekter uvedených v příloze číslo 3.

Ve frekvenčních spektrech jsou používána stejná měřítka pro amplitudy (měřítka pro amplitudy u grafů popisujících vibrace diferenciálu a motoru se liší). Totožná měřítka pro amplitudy jsou používána z toho důvodu, aby spektra byla lépe vzájemně porovnatelná.

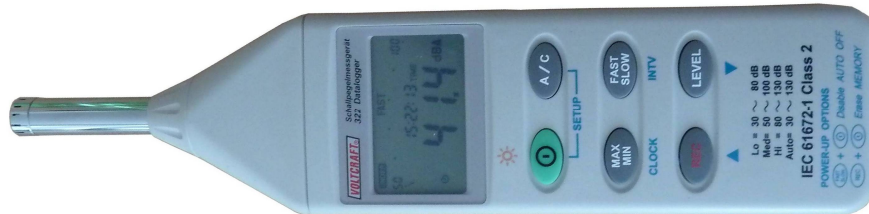
## 3.4 Měření hluku

Maximální hladina akustického tlaku byla měřena vždy během měření vibrací, pro každou rychlost zvlášť (tj. pro rychlost  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

K měření hluku byl použit hlukoměr firmy VoltCraft - model 322 Datalogger. Měřicí rozsah tohoto hlukoměru je od 30 do 130 dB s rozlišením 0,1 dB. Frekvenční rozsah přístroje je od 31,5 do 8000 Hz.

Přesnost dle ČSN EN 61672, Elektroakustika - Zvukoměry je typu 2, tj.  $94 \text{ dB}/1 \text{ kHz} \pm 1,5 \text{ dB}$ . Pomocí tohoto hlukoměru je možné měřit okamžitou hodnotu, minimum a maximum.

Na obrázku číslo 16 je zobrazen hlukoměr, pomocí kterého byla měřena maximální hladina akustického tlaku u autobusů.



Obrázek 16: Hlukoměr VoltCraft 322 Datalogger

Hlukoměr byl vždy umístěn uprostřed mezi sedačkami ve výšce 50 cm. Měření bylo provedeno při demontovaném krytu motoru. Na obrázku číslo 17 je fotografie z měření.



Obrázek 17: Měření hluku

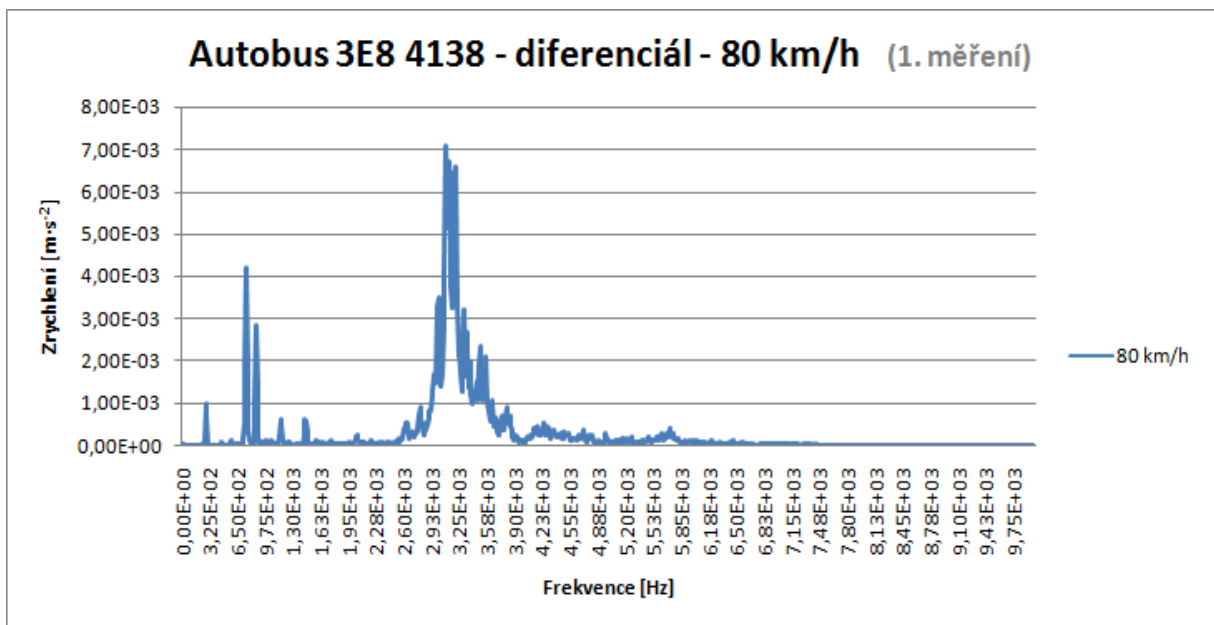
## 4 Výsledky měření

Tato kapitola je věnována porovnání jednotlivých frekvenčních spekter získaných z naměřených hodnot vibrací. Tato spektra jsou zde poté porovnávána s naměřenými hodnotami hluku. V závěru kapitoly se nachází vyhodnocení dat.

### 4.1 Naměřená data

Na obrázcích v přílohách číslo 3 a 4 jsou frekvenční spektra, která byla získána z naměřených hodnot vibrací. Na ose x jsou měřené frekvence dle rozsahu měření. Velikost amplitudy na ose y představuje podíl příslušné frekvence na vibracích v měřeném rozsahu. Na některých obrázcích jsou samostatná spektra pro uvedená měření, na některých je pro porovnání několik barevně odlišených spekter (např. pro rychlosti 40, 60 a 80 km·h<sup>-1</sup>).

V příloze č. 3 jsou umístěna frekvenční spektra z naměřených hodnot vibrací. Pro každou rychlost, každý autobus a měřicí místo je uvedeno jedno frekvenční spektrum. Příklad takového spektra je na obrázku číslo 18.



Obrázek 18: Příklad frekvenčního spektra z naměřených hodnot vibrací

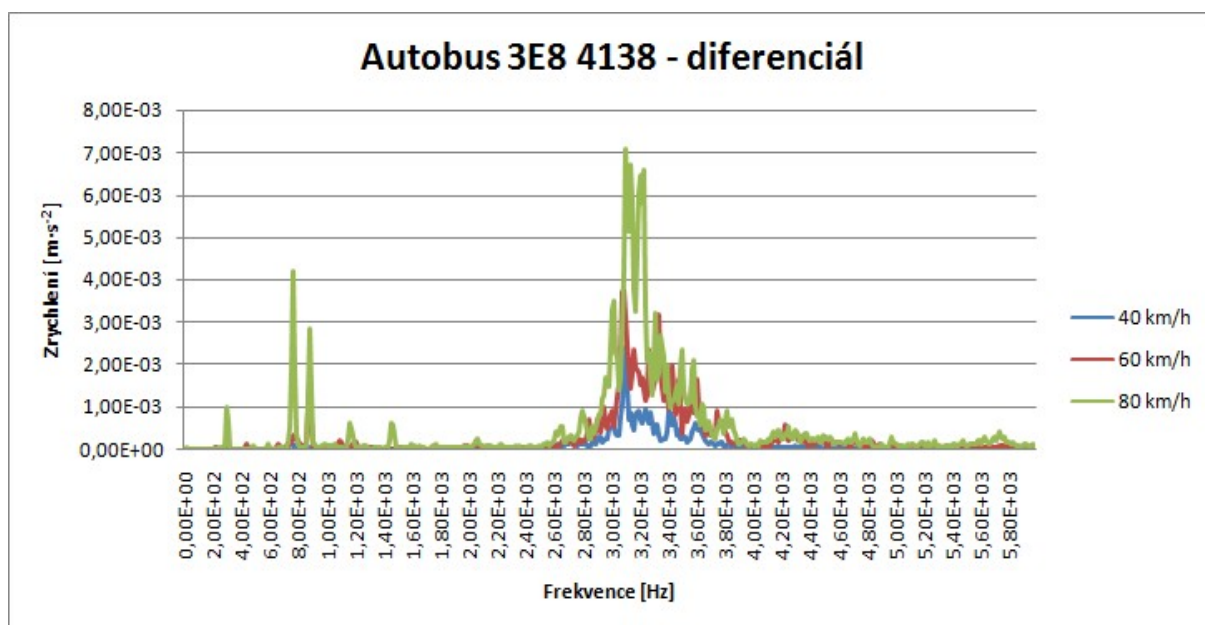
V horní části obrázku číslo 18 je uvedena SPZ autobusu, kterého se týká dané spektrum. V tomto případě byl měřen autobus 3E8 4138. Dále je zde uvedeno místo, na kterém byl umístěn snímač (motor nebo diferenciál). Další údaj poskytuje informaci, při jaké rychlosti bylo měření uskutečněno (40, 60 nebo 80 km·h<sup>-1</sup>). V tomto případě je na spektru ještě další údaj, který označuje, že autobus byl měřen vícekrát.

Z frekvenčního spektra uvedeného na obrázku číslo 18 vyplývá, že při frekvenci kolem 700 Hz a 3 kHz vznikaly výraznější amplitudy, ostatní amplitudy jsou v tomto grafu zanedbatelné.

V rámci této práce bylo měření hluku pouze okrajové, naměřené hodnoty maximální hladiny akustického tlaku sloužily k porovnání, při které rychlosti, byl autobus hlučnější. Naměřené hodnoty maximální hladiny akustického tlaku se nacházejí v příloze č. 5.

## 4.2 Vyhodnocení dat

V příloze č. 4 jsou uvedena spektra vytvořená z naměřených hodnot vibrací. V každém obrázku jsou vždy zobrazena tři spektra vibrací naměřených u jednoho autobusu při rychlostech 40, 60 a 80 km·h<sup>-1</sup>. Pro každý autobus a každé měřené místo (diferenciál, motor) je vytvořen jeden obrázek s uvedenými třemi frekvenčními spektry. Příklad takových spekter je na obrázku číslo 19.



Obrázek 19: Příklad spekter z naměřených vibrací - pro rychlosti 40, 60 a 80 km·h<sup>-1</sup>



### 4.2.1 Vibrace na motoru

Z naměřených hodnot vibrací a hluku vyplývá, že vyšší hluk v autobusu souvisí převážně s vibracemi na diferenciálu. Je nutné zdůraznit, že hluk byl měřen při otevřeném krytu motoru a neodpovídá tedy vnitřnímu hluku při běžném provozu autobusu. Zvýšený hluk s vibracemi na motoru nesouvisí z důvodu, že při zvyšování hluku (hodnoty maximální hladiny akustického tlaku) se vibrace na motoru snižovaly. Toto je zřejmé ze spekter zobrazených v příloze č. 3.

Amplitudy vibrací na motoru dosahovaly maximálně hodnoty  $9 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Často však byly naměřeny hodnoty nižší, a to přibližně do  $4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Hodnoty amplitud vibrací na motoru se snižovaly se zvyšující rychlostí, například u autobusu 3E8 1143 se amplituda snižovala o přibližně  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  při přechodu z rychlosti  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  na  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a o stejnou hodnotu z rychlosti  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  na  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 4.2.2 Maximální hladina akustického tlaku

Jestliže porovnááme hluk při rychlostech  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , dochází ke zvyšování hluku s rostoucí rychlostí přibližně o 2 dB. Při porovnání rychlostí  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  vzhledem k hluku, dochází taktéž k jeho navýšení o 1 dB až 3 dB.

Maximální hladina akustického tlaku se pohybovala v rozmezí od 89,7dB do 97,6 dB. Nejnižší naměřená hodnota - 89,7 dB - nastala při rychlosti  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  u autobusu 2AB 0691, nejvyšší naměřená hodnota - 97,6 dB - nastala při rychlosti  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  u autobusu 3E8 4138.

### 4.2.3 Vibrace na diferenciálu

Ze spekter zobrazujících amplitudy vibrací a frekvence, při kterých vznikaly vibrace na diferenciálu, bylo zjištěno, že se zvyšováním rychlosti docházelo zároveň ke zvyšování amplitud vibrací. Hodnoty amplitud se u jednotlivých spekter zvyšovaly

různě, například u autobusu 3E8 4138 (u 1. i 2. měření) přibližně o  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  při růstu rychlosti ze 40 na  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a o stejnou hodnotu při změně rychlosti z 60 na  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

U všech autobusů vznikají vibrace přibližně ve stejných frekvencích. Jelikož byly mezi měřenými autobusy dva různé typy převodu zadního soukolí (tj. odlišný počet zubů na převodovce), z frekvenčních spekter naměřených hodnot byly porovnávány rozdíly amplitud a přibližné hodnoty frekvence, při kterých vibrace vznikaly. Je možné tvrdit, že vznik vibrací a jejich rozvoj je závislý na technickém stavu diferenciálu, ale i jeho uložení. Vibrace na diferenciálu vznikaly vždy přibližně při frekvenci 1 kHz a pak při 4 kHz.

Amplitudy vibrací na diferenciálu dosahovaly maximálně hodnoty  $7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , nejčastěji se pohybovaly kolem hodnoty  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

## Závěr

Měření vibrací na diferenciálu a převodovce bylo provedeno celkem na čtyřech různých autobusech stejné modelové řady - Scania OmniLink, jeden z těchto autobusů byl změřen dvakrát. Měřenou veličinou u vibrací bylo zrychlení. Z naměřených dat byla vytvořena frekvenční spektra. Orientační měření hluku proběhlo u všech čtyř autobusů v průběhu měření vibrací. U hluku byla měřenou akustickou veličinou maximální hladina akustického tlaku. U každého autobusu byla monitorována data u vibrací i hluku při rychlostech 40, 60 a 80 km·h<sup>-1</sup>. U vibrací byly použity dva snímače zrychlení (jeden na diferenciálu, druhý na motoru).

Z naměřených hodnot vibrací a hluku vyplývá, že hluk u autobusu významně souvisí s vibracemi diferenciálu. Dále je možné tvrdit, že vzhledem k naměřeným hodnotám, hluk i vibrace se vzrůstající rychlostí rostou. Vznik výraznějších amplitud u vibrací je závislý hlavně na technickém stavu diferenciálu, dále potom na tuhosti jeho uložení.

Ze závěrů, které vyplývají z vyhodnocení naměřených hodnot, je možné říci, že pomocí vibrodiagnostiky lze posuzovat aktuální technický stav pohonu (diferenciálu a motoru) autobusu. Pro stanovení hraničních hodnot vibrací by bylo nutné dále provést větší množství opakovaných měření.

## Seznam použité literatury a citací

- [1] LÁNSKÝ, M.; MAZÁNEK, J. *Diagnostika a informační diagnostické systémy I.* Univerzita Pardubice : [s.n.], listopad 1998. 108 s. ISBN 80-7194-155-7.
- [2] VDOLEČEK, F. *Spolehlivost a technická diagnostika : (Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu)* [online]. Brno : [s.n.], 2002 [cit. 2011-02-06]. Dostupné z WWW: <<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>>.
- [3] ČSN ISO 2041 : *Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník* . Česká republika : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.10.2010. 64 s.
- [4] SMETANA, C. a kol. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika 1998, 188 s. ISBN 80-90 1936-2-5.
- [5] SKF Condition Monitoring. *Průvodce vibrační diagnostikou I.* USA, 1995
- [6] *Measuring Vibration* [online]. Dánsko : Brüel & Kjær, 1982 [cit. 2010-11-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>>.
- [7] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika 1997, 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [8] GRAJA, M.; ZIKMUND, T. *Měření hluku* [online]. 2010 [cit. 2010-10-12]. Hluk. Dostupné z WWW: <<http://stag.upce.cz>>.
- [9] VLACHOVÁ, M.; KÁŽA, J. *Techmania - Edutorium* [online]. 2010 [cit. 2011-03-14]. Akustika. Dostupné z WWW: <[http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h)>
- [10] *Fotografie autobusů MHD* [online]. 2011 [cit. 2011-03-14]. Fotografie autobusu Scania OMNILINK. Dostupné z WWW: <<http://www.mhdfoto.cz/cs/typ-scania-omnilink/foto/15914?iec=1>>
- [11] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technický slovník naučný, Svazek 2*. Praha: Encyklopedický dům, 2005. 436 s. ISBN 80-86044-18-1.
- [12] *Mapy ČR* [online]. 2011 [cit. 2011-03-17]. Mapa Pardubice. Dostupné z WWW: <<http://mapy.cz/#mm=ZTtTcP@x=136153088@y=135945728@z=11>>.

- [13] GLIBERT, P. *Innovative Measurement Technologies Beyond Classic Analyzer Architecture* [online]. Denmark : Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, [cit. 2011-03-31]. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/imac2003innovativemeasurementtechnologiesbeyondclassicanalyzerarchitecture.pdf>>.
- [14] *Brüel & Kjær Vibro* [online]. 2010 [cit. 2011-04-21]. Sensor AS - 062. Dostupné z WWW: <<http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/internet/PDF/Documentation/Sensors/AS/AS062def.pdf>>.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení vibrací podle časového průběhu [4] .....	12
Obrázek 2: Možné konstrukce akcelerometru [6] .....	16
Obrázek 3: Možnosti upevnění snímačů zrychlení [6] .....	18
Obrázek 4: Hladiny intenzit zvuku z různých zdrojů činností .....	21
Obrázek 5: Šíření zvuku [4] .....	23
Obrázek 6: Autobus SCANIA OMNILINK [10] .....	26
Obrázek 7: Trasa měření [12] .....	29
Obrázek 8: Analyzátor PULSE 3032A .....	30
Obrázek 9: Prostředí programu LabShop .....	31
Obrázek 10: Snímač zrychlení AS - 062 [14] .....	32
Obrázek 11: Přichycení snímače ke kovové podložce .....	33
Obrázek 12: Upevnění snímače na motoru - pohled zdola .....	34
Obrázek 13: Upevnění snímače na diferenciálu - pohled ze strany .....	34
Obrázek 14: Zkušební zařízení k měření vibrací .....	35
Obrázek 15: Upevnění snímače - s podložkou, bez podložky .....	36
Obrázek 16: Hlukoměr VoltCraft 322 Datalogger .....	38
Obrázek 17: Měření hluku .....	38
Obrázek 18: Příklad frekvenčního spektra z naměřených hodnot vibrací .....	39
Obrázek 19: Příklad spekter z naměřených vibrací - pro rychlosti 40, 60 a 80 km·h <sup>-1</sup> ..	40

## **Seznam zkratek**

ČSN	Česká státní norma
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
SPZ	Státní poznávací značka

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 - Rozvodovka R660

Příloha č. 2 - Popis autobusů

Příloha č. 3 - Vibrace - naměřená data

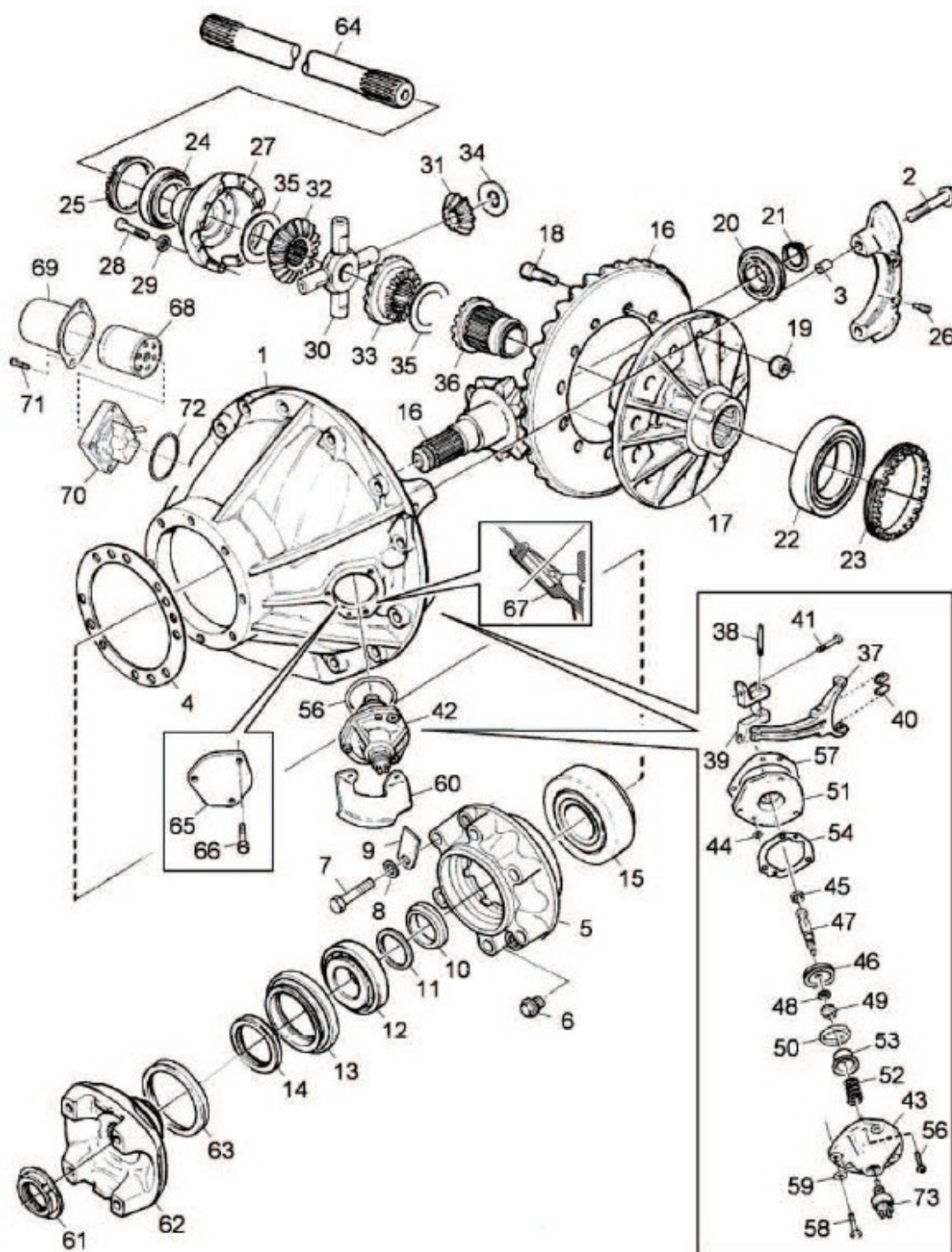
Příloha č. 4 - Vibrace - vyhodnocení dat

Příloha č. 5 - Hluk - naměřená data



## Příloha č. 1 - Rozvodovka R660

Na následujícím obrázku je zobrazena rozvodovka autobusu SCANIA OmniLink modelového typu R660.



## Příloha č. 2 - Popis autobusů

V následující tabulce jsou uvedeny technické údaje o autobusech - typ motoru a diferenciálu. Dále jsou zde uvedeny ujeté kilometry, data měření. Autobusy budou rozlišovány podle státních poznávacích značek (dále jen SPZ).

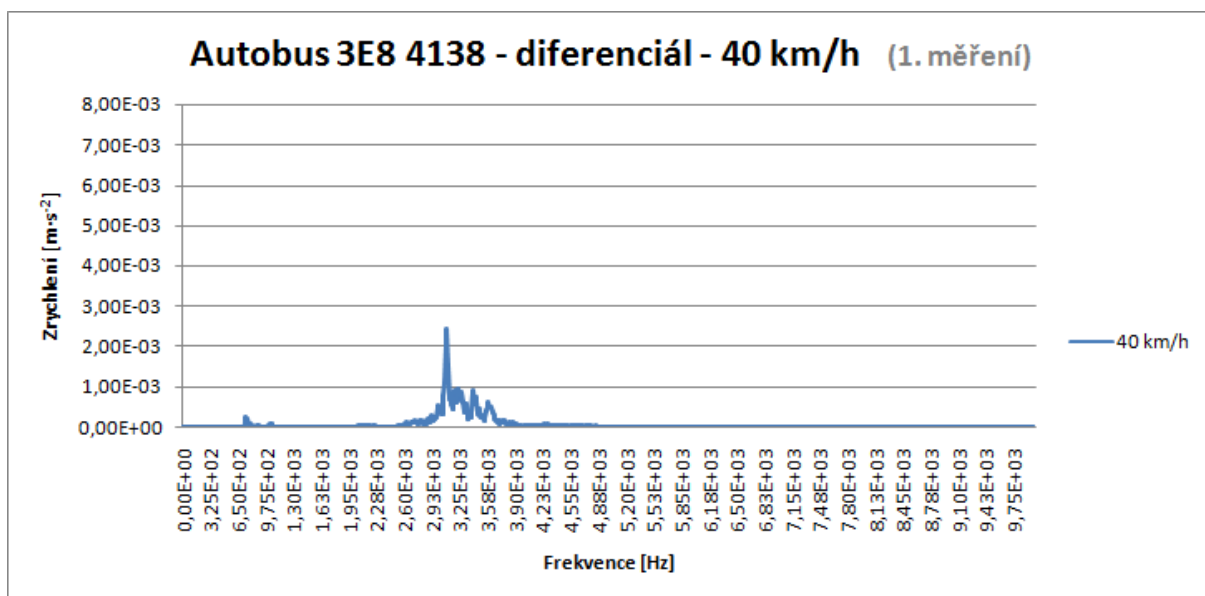
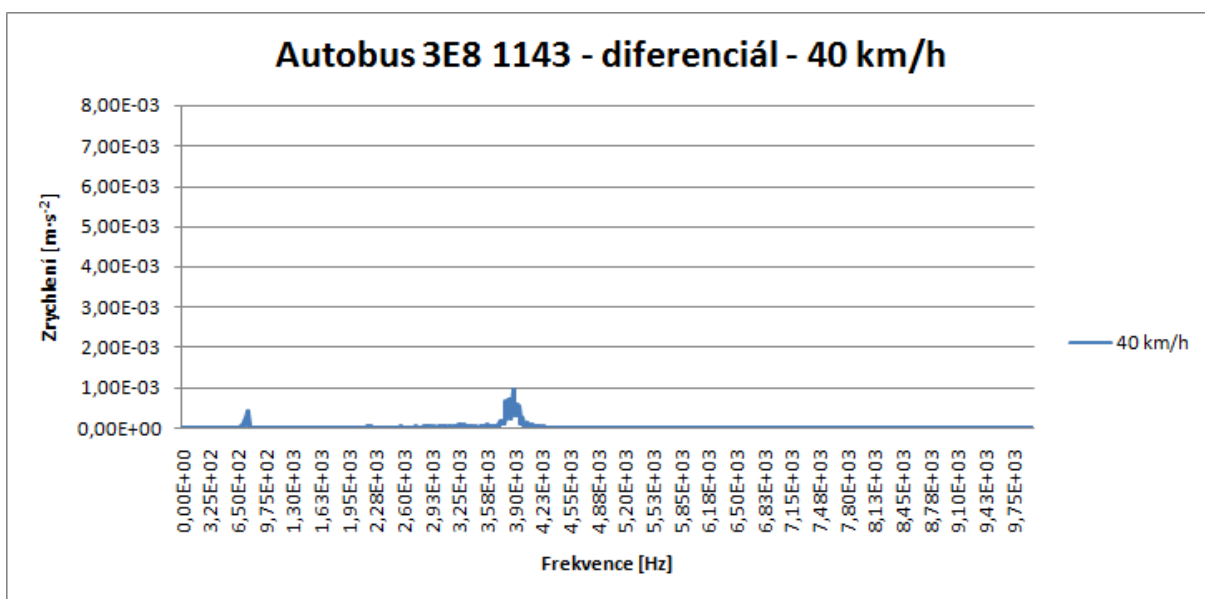
<b>SPZ</b>	<i>Typ motoru</i>	<i>Typ rozvodovky</i>	<i>Převod zadní nápravy</i>	<i>Datum měření</i>	<i>Ujeté kilometry</i>
<b>3E8 1143</b>	DC9 01 B01	R660	4,88	21.12. 2010	321 000 km
<b>3E8 4138</b>	DC9 01 B01	R660	4,88	5.1. 2011	201 000 km
<b>2AB 0691</b>	DC9 04 B01	R660	4,22	8.2. 2011	444 000 km
<b>2AB 4566</b>	DC9 02 B01	R660	4,22	11.2. 2011	494 000 km
<b>3E8 4138</b>	DC9 01 B01	R660	4,88	29.6. 2010	161 000 km

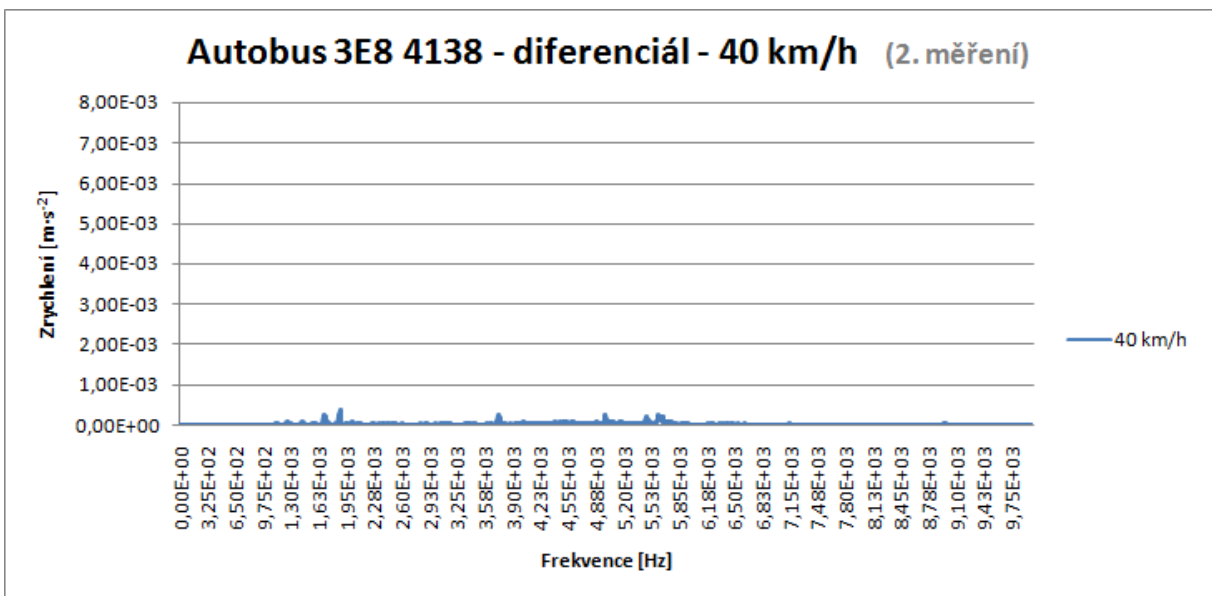
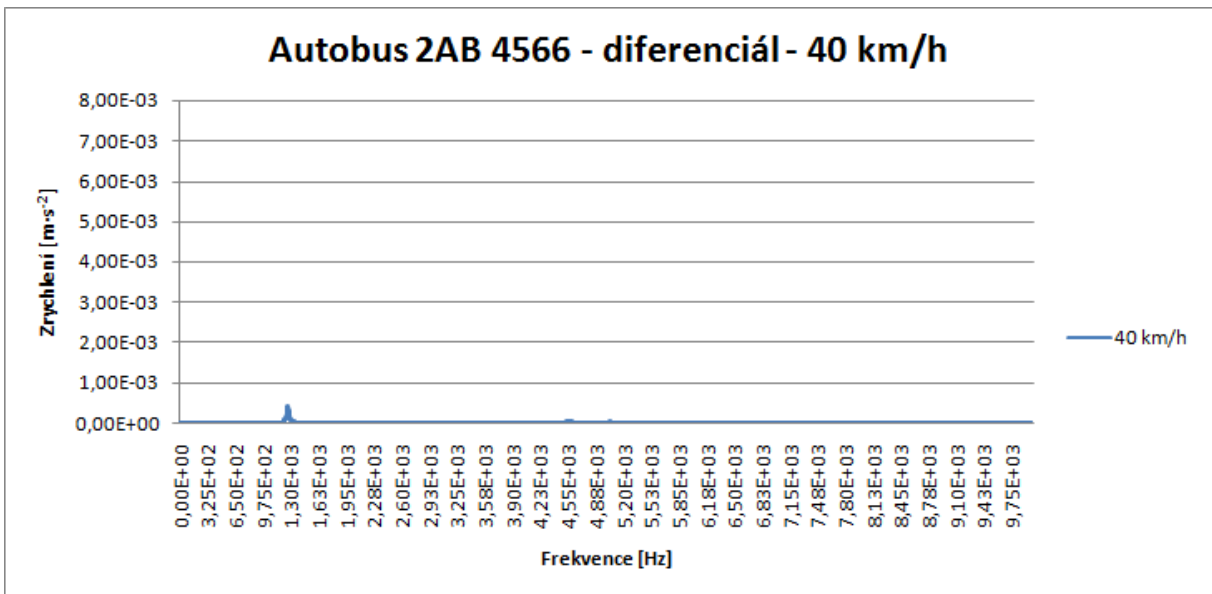
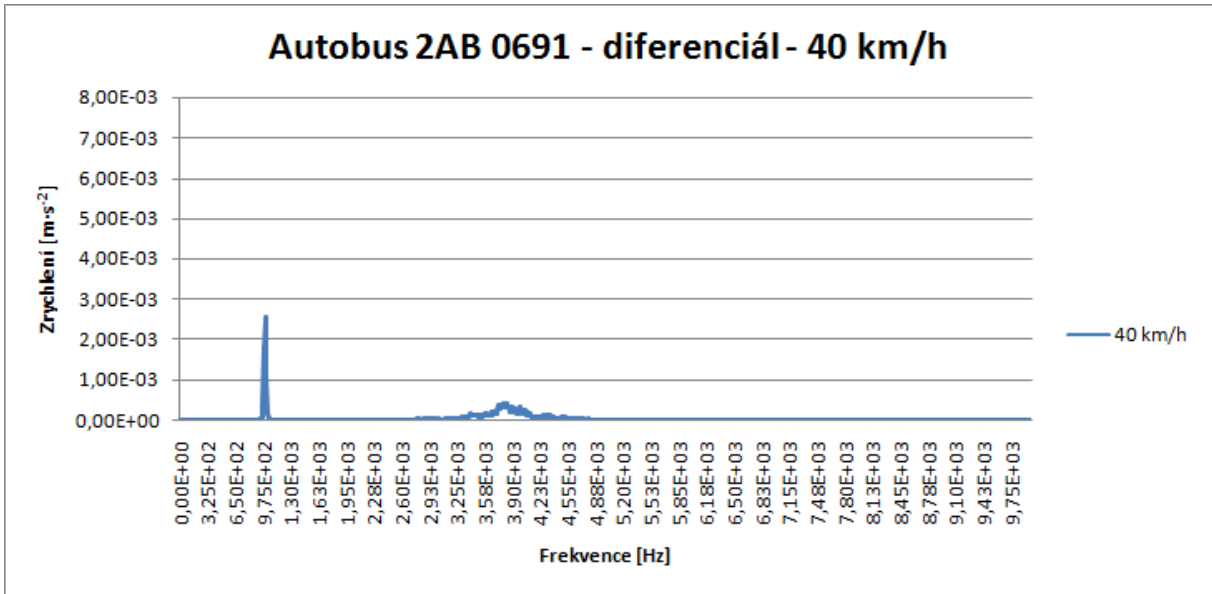
### Příloha č. 3 - Vibrace - naměřená data

V následujících grafech se nacházejí naměřené hodnoty vibrací na diferenciálu a motoru při rychlostech 40 km·h<sup>-1</sup>, 60 km·h<sup>-1</sup> a 80 km·h<sup>-1</sup>. U autobusu 2AB 0691 se nepodařilo naměřit vibrace u rychlosti 80 km/h, z důvodu nastavení malého měřicího rozsahu.

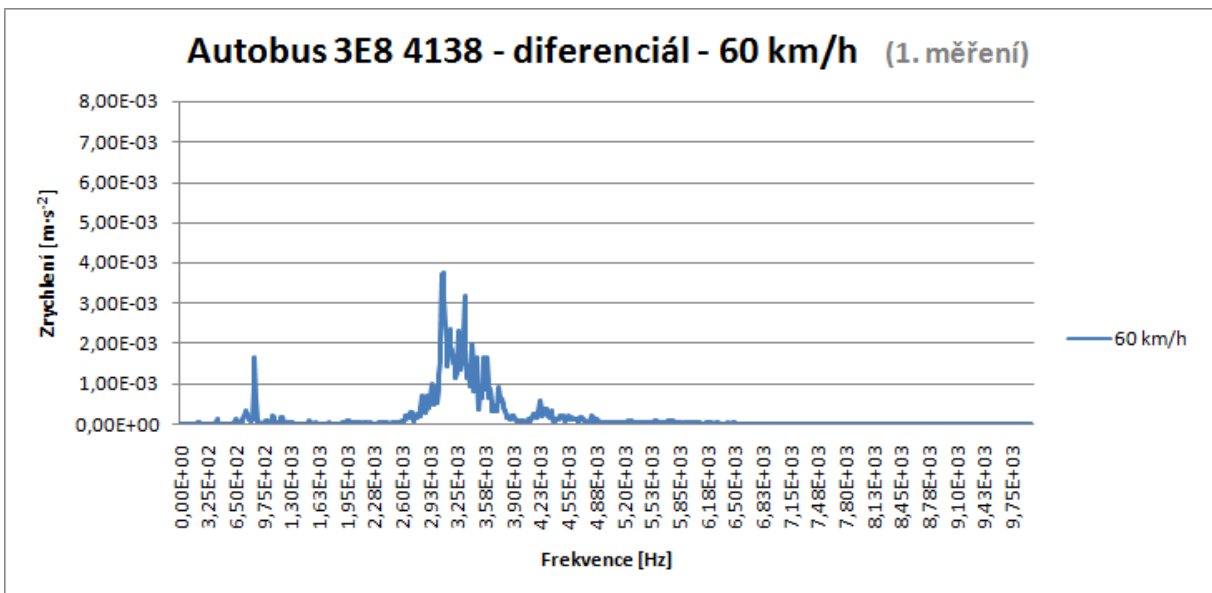
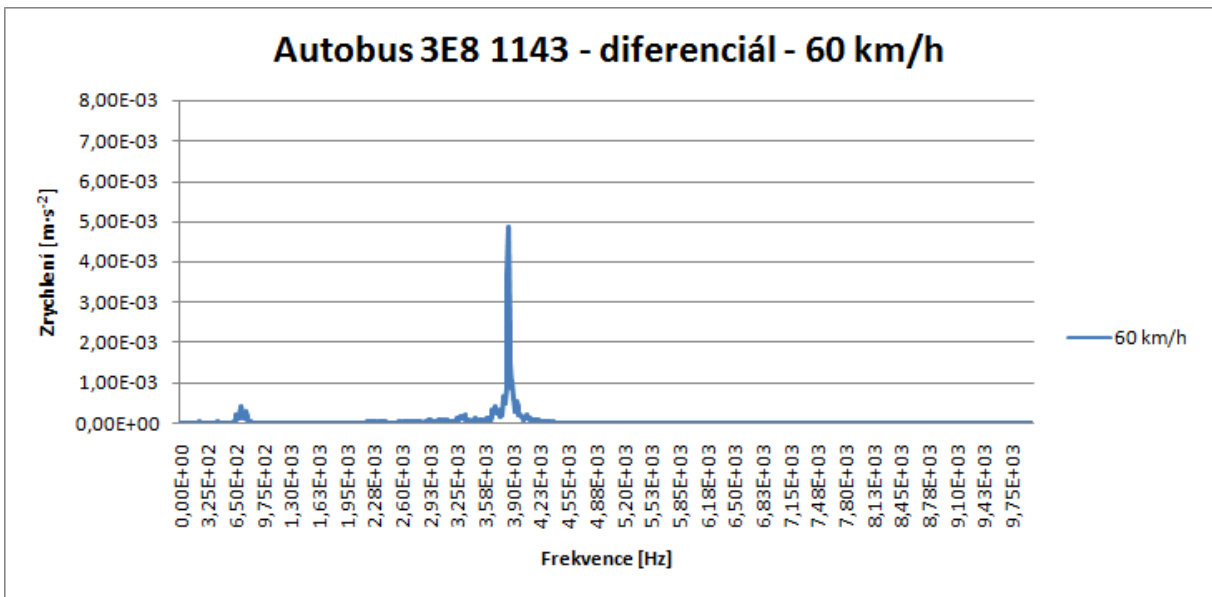
#### Vibrace na diferenciálu:

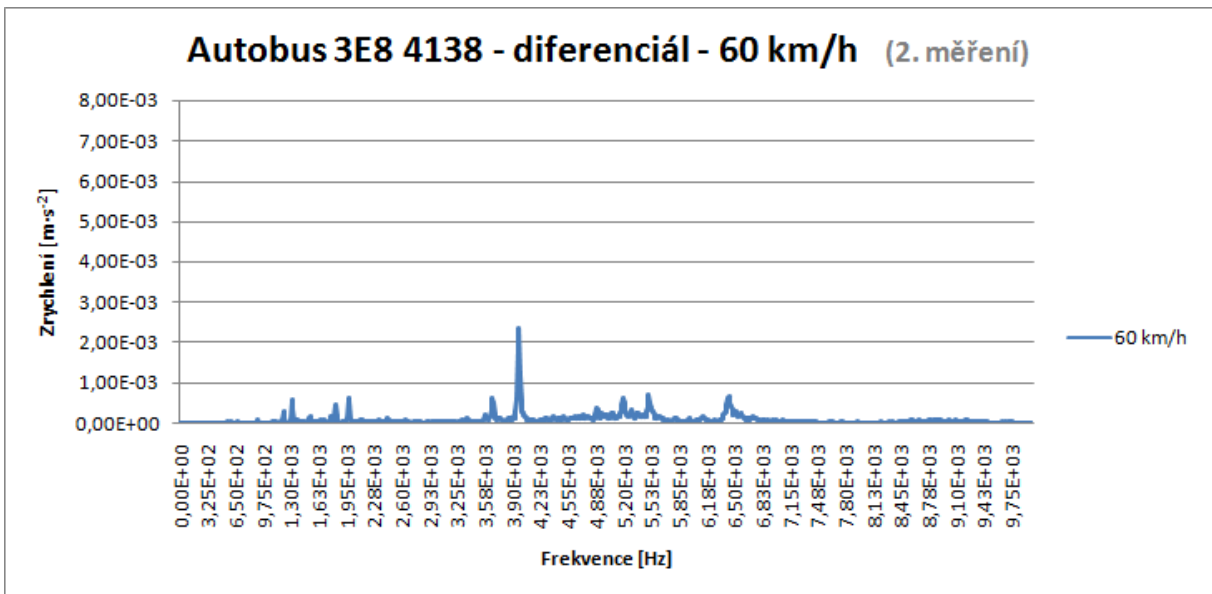
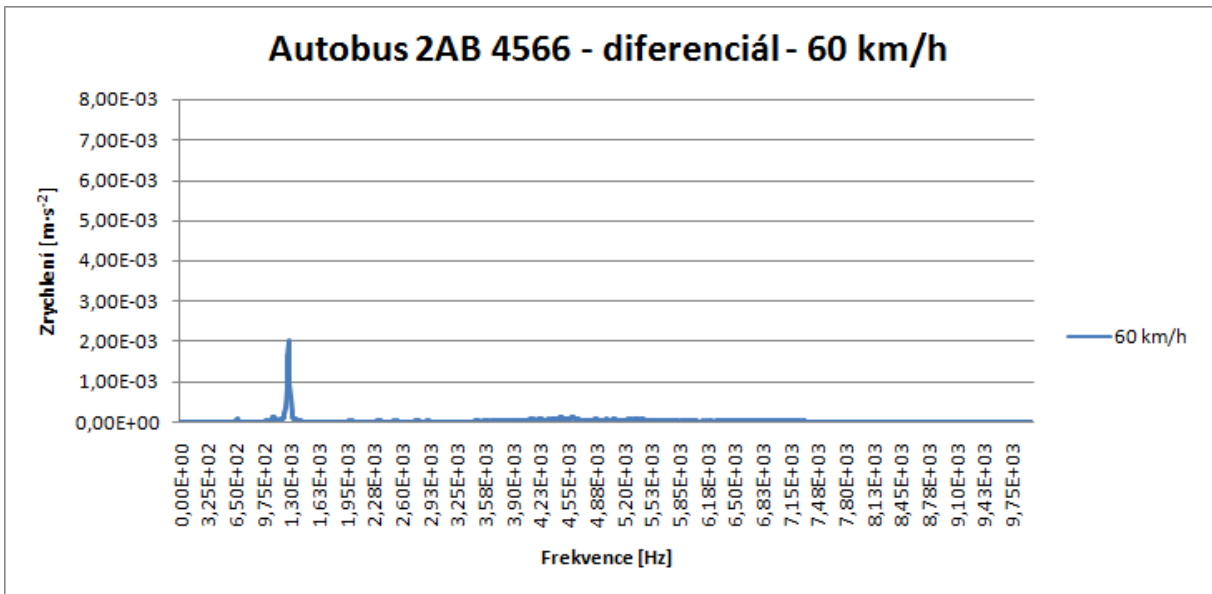
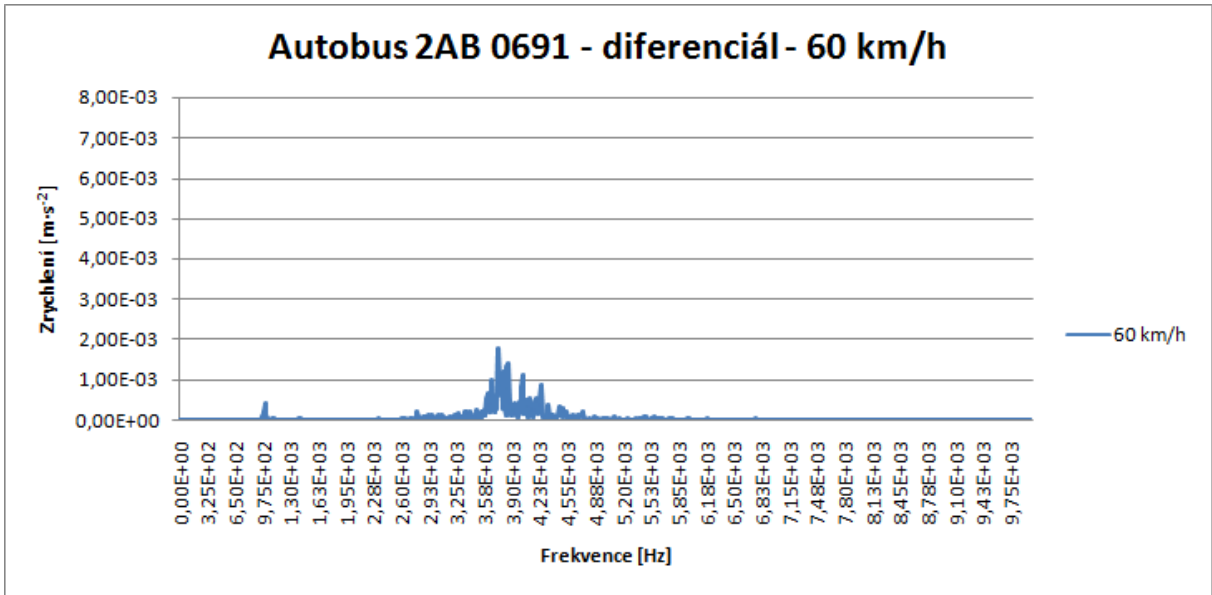
##### 1. Rychlost - 40 km/h



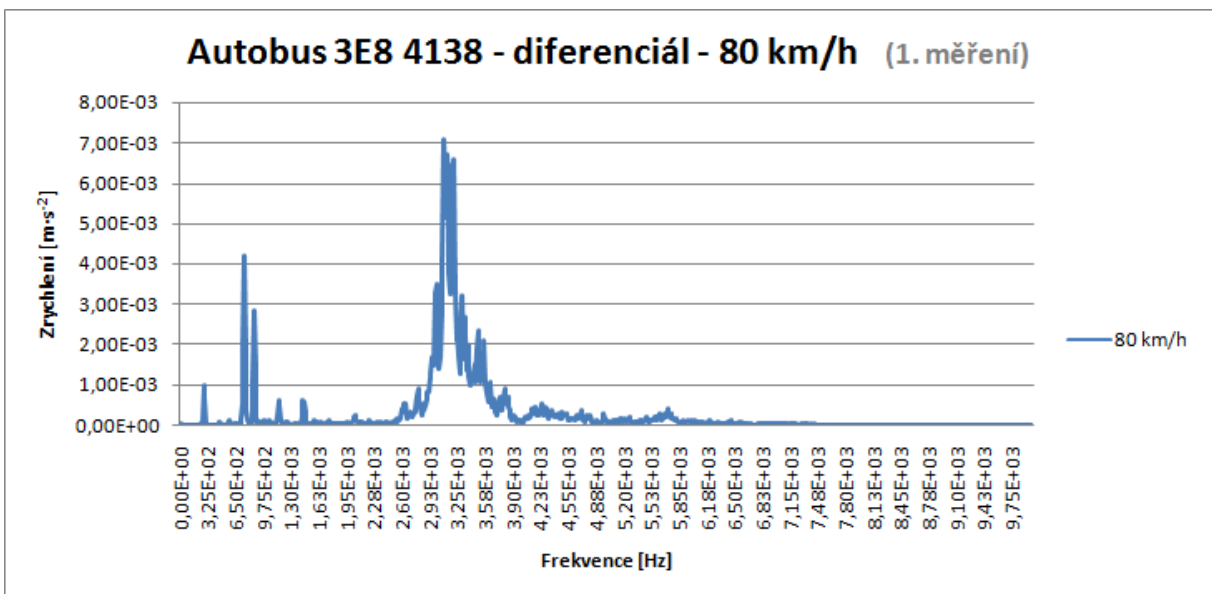
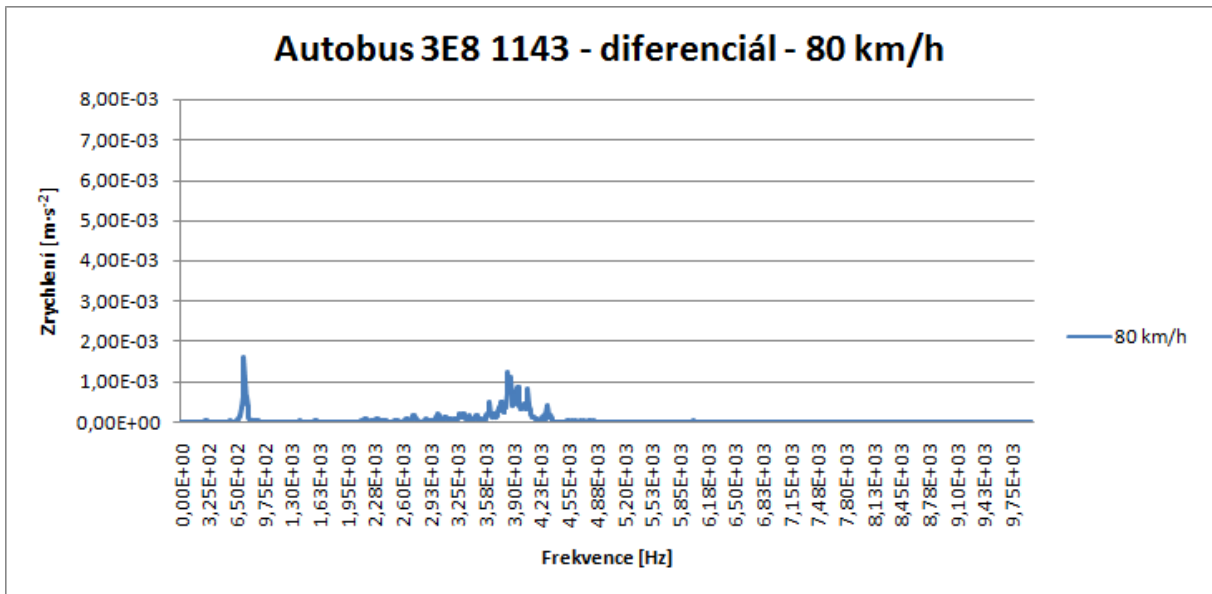


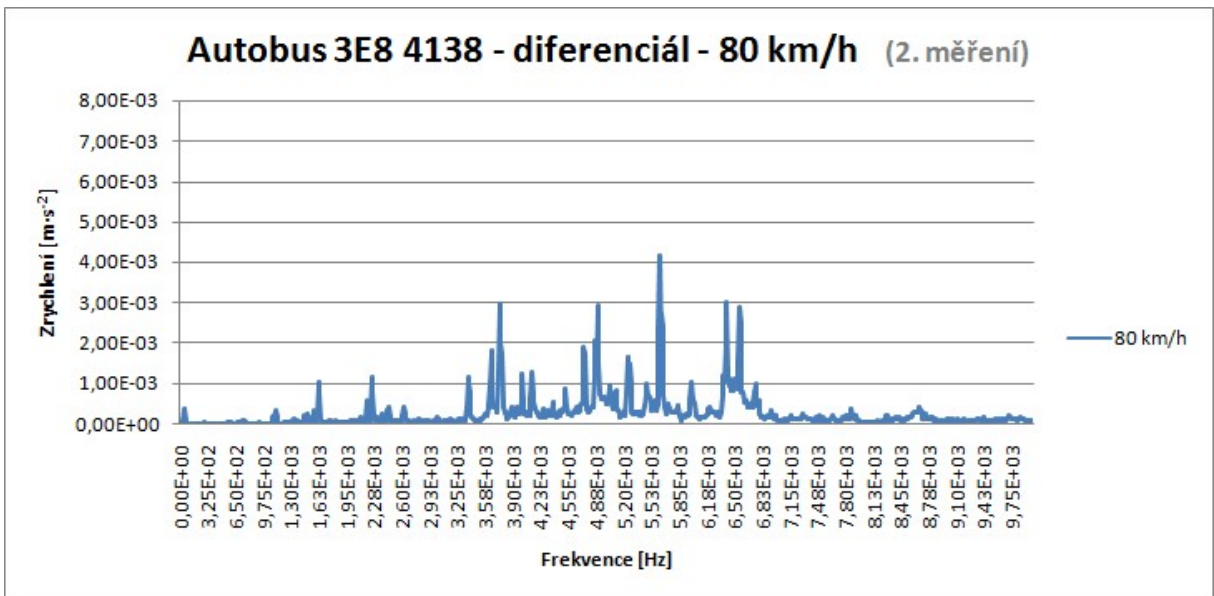
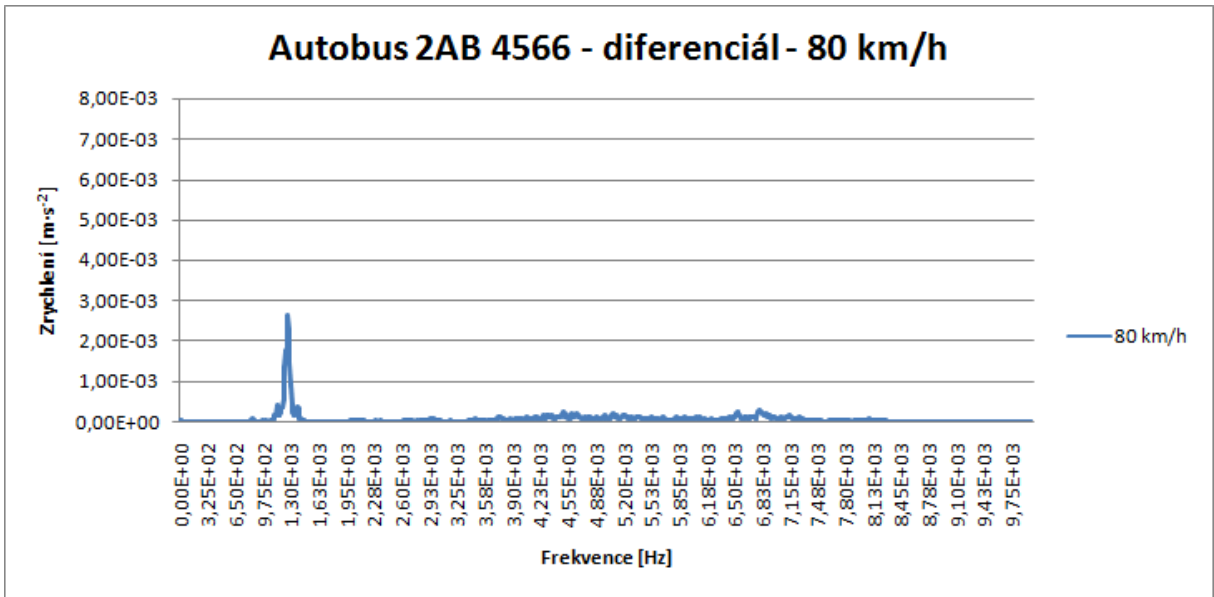
## 2. Rychlost - 60 km/h





### 3. Rychlost - 80 km/h

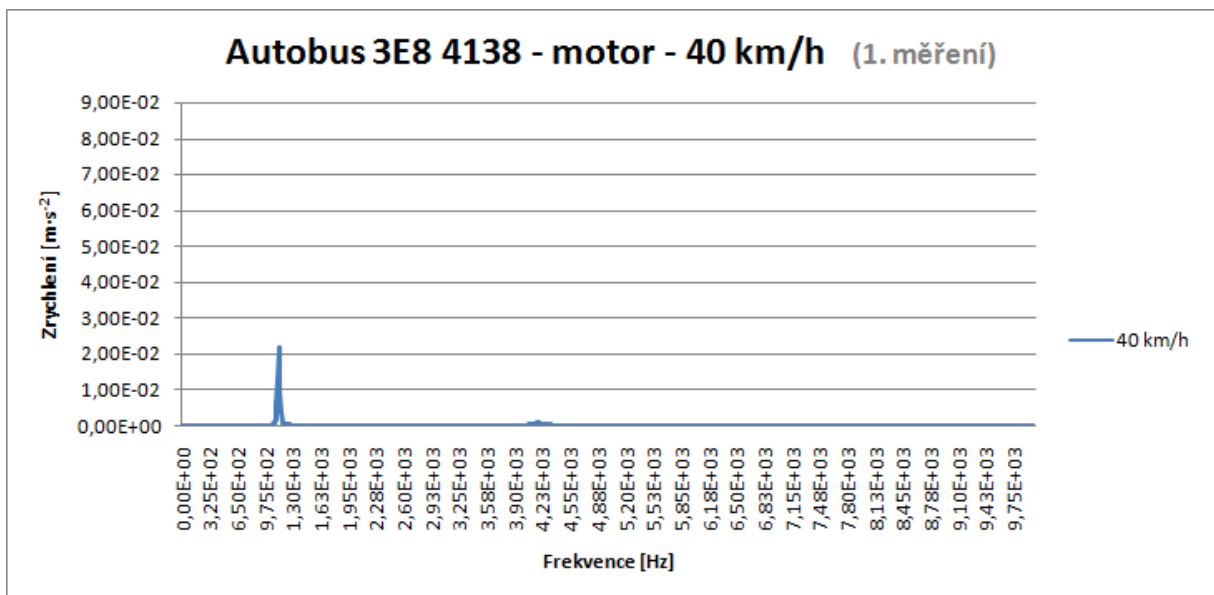
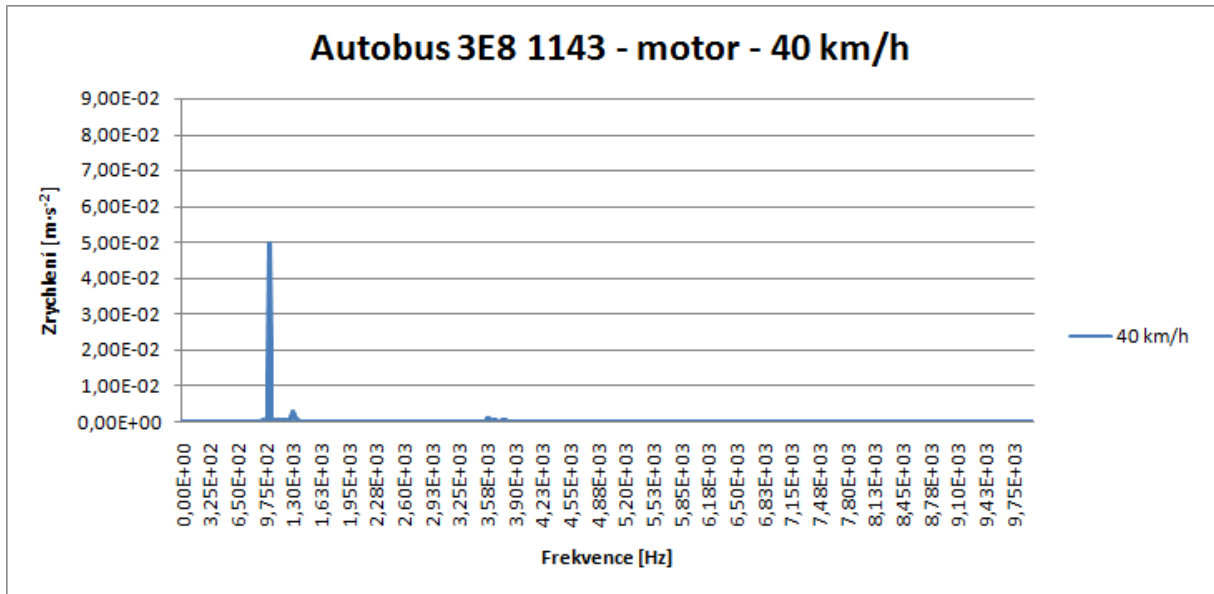


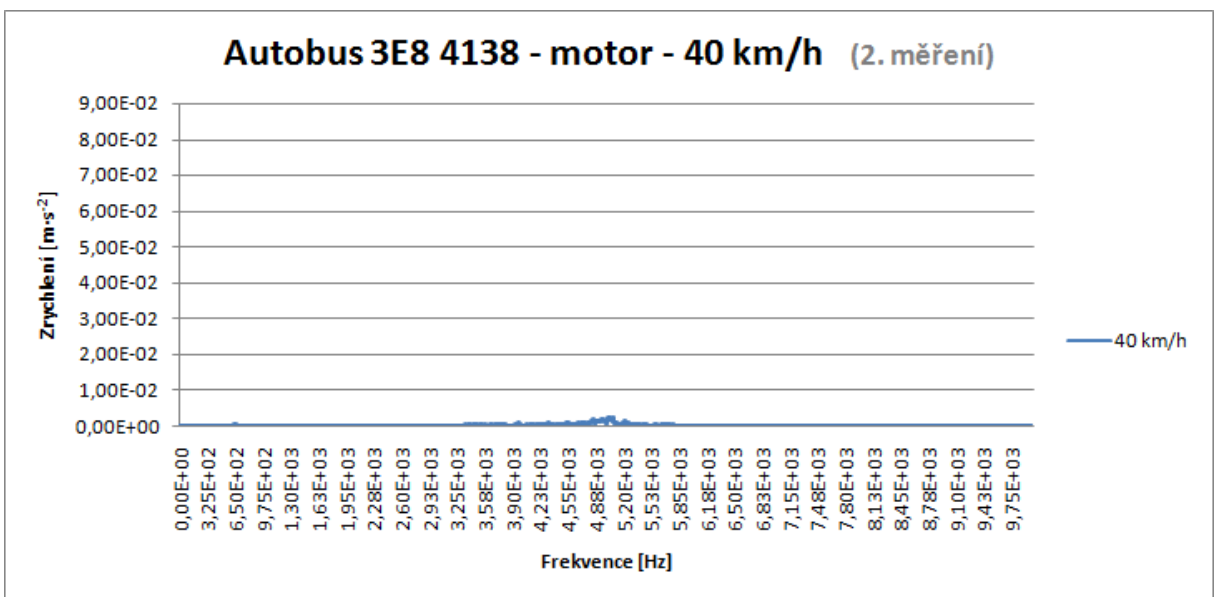
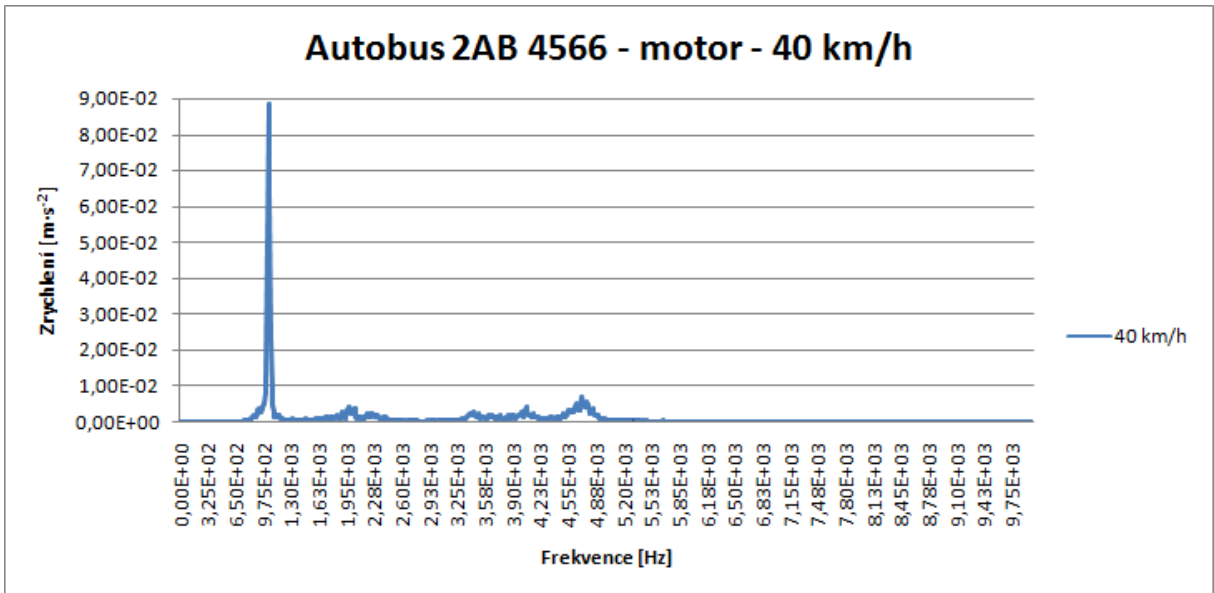
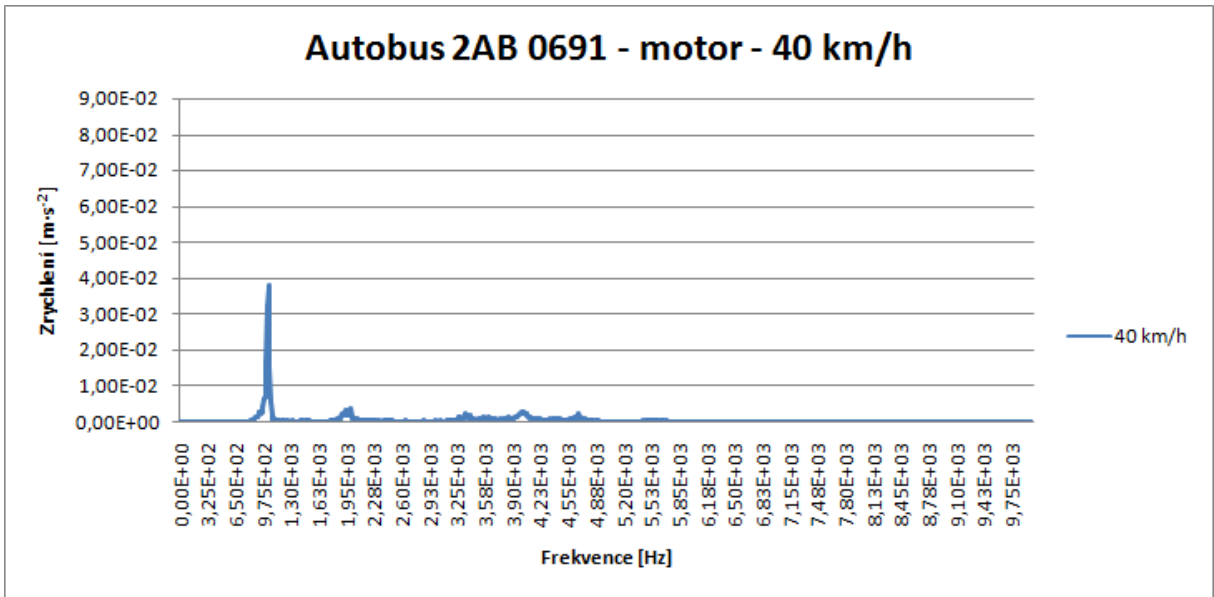




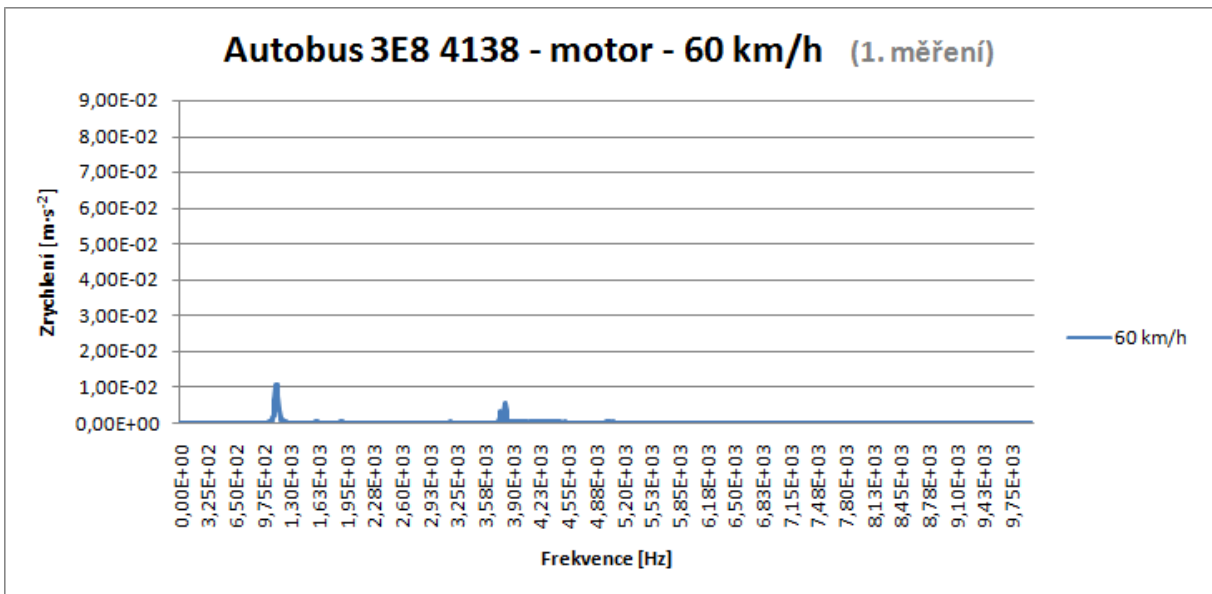
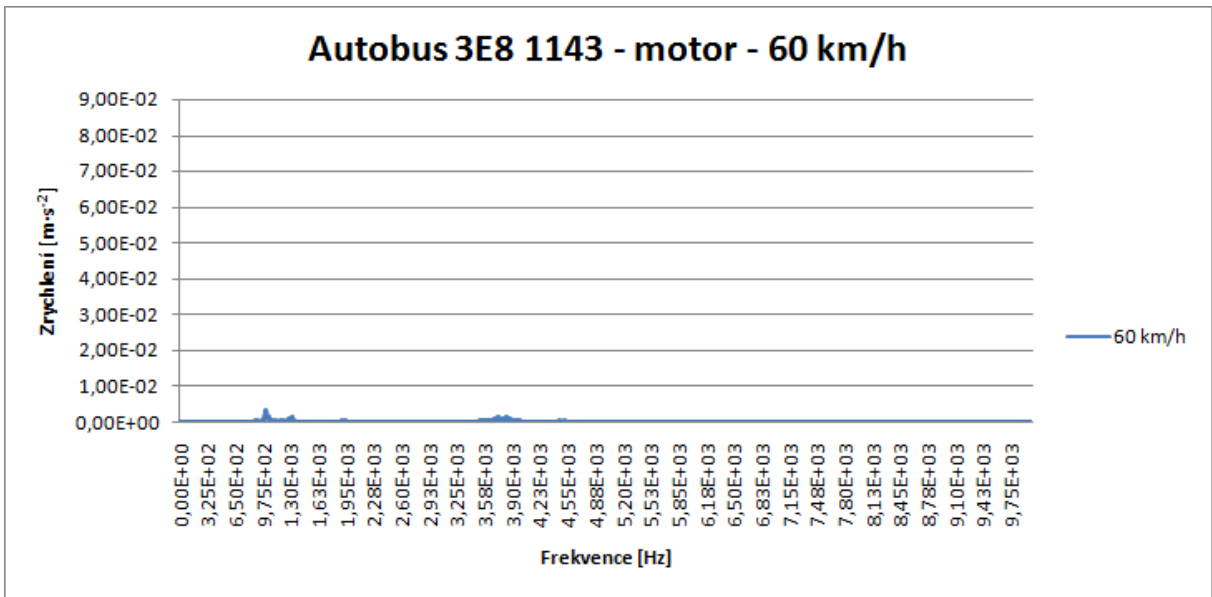
## Vibrace na motoru:

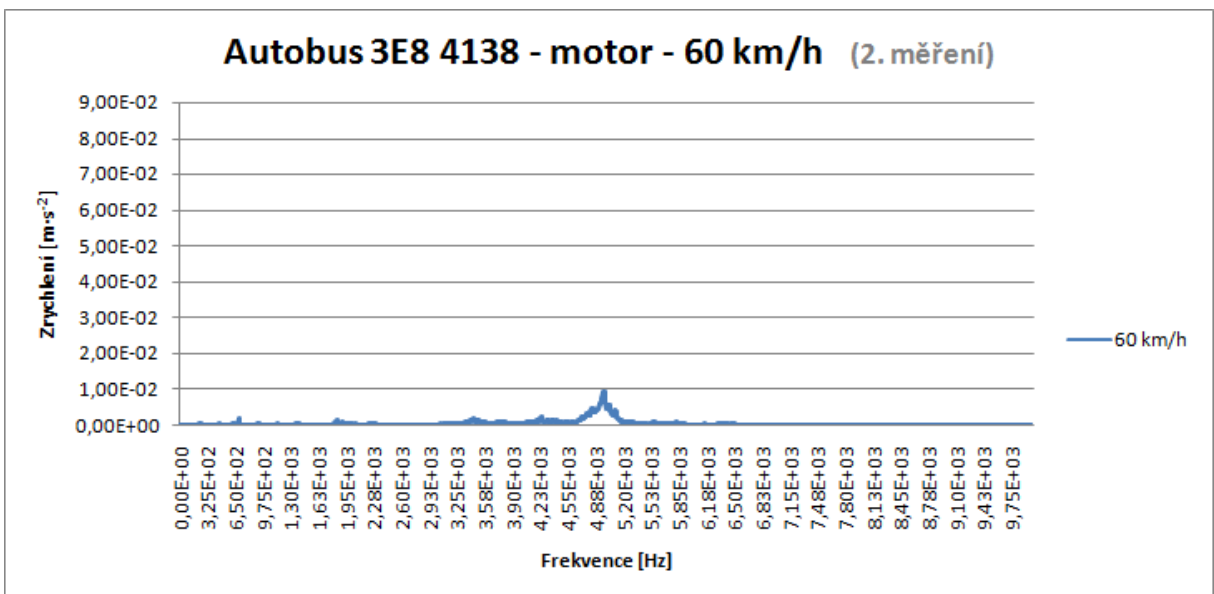
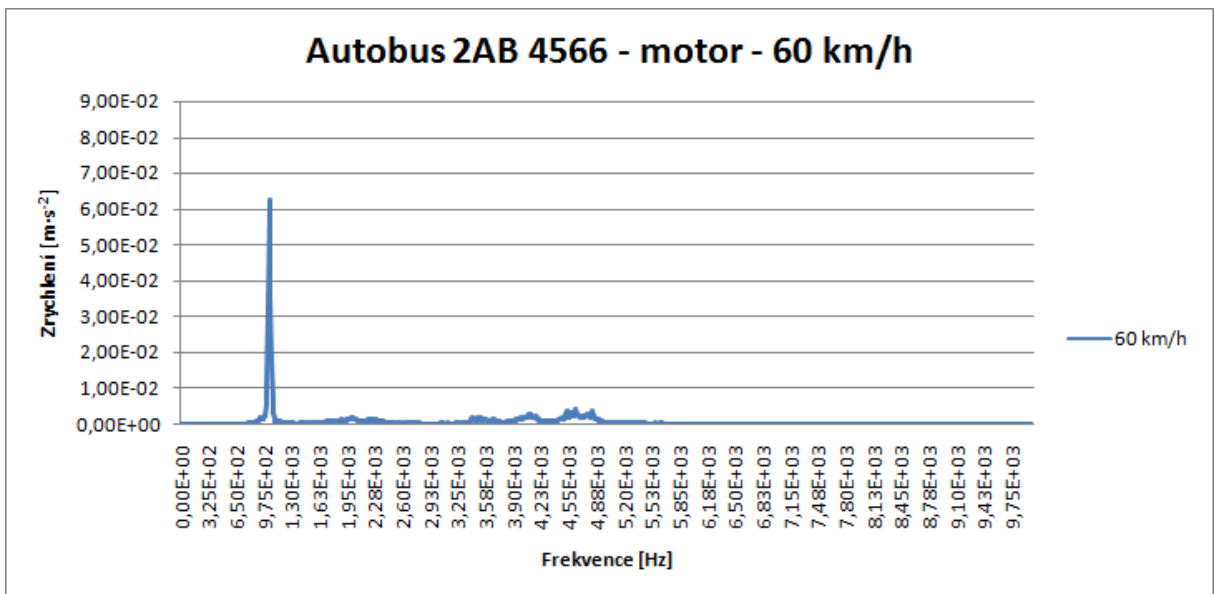
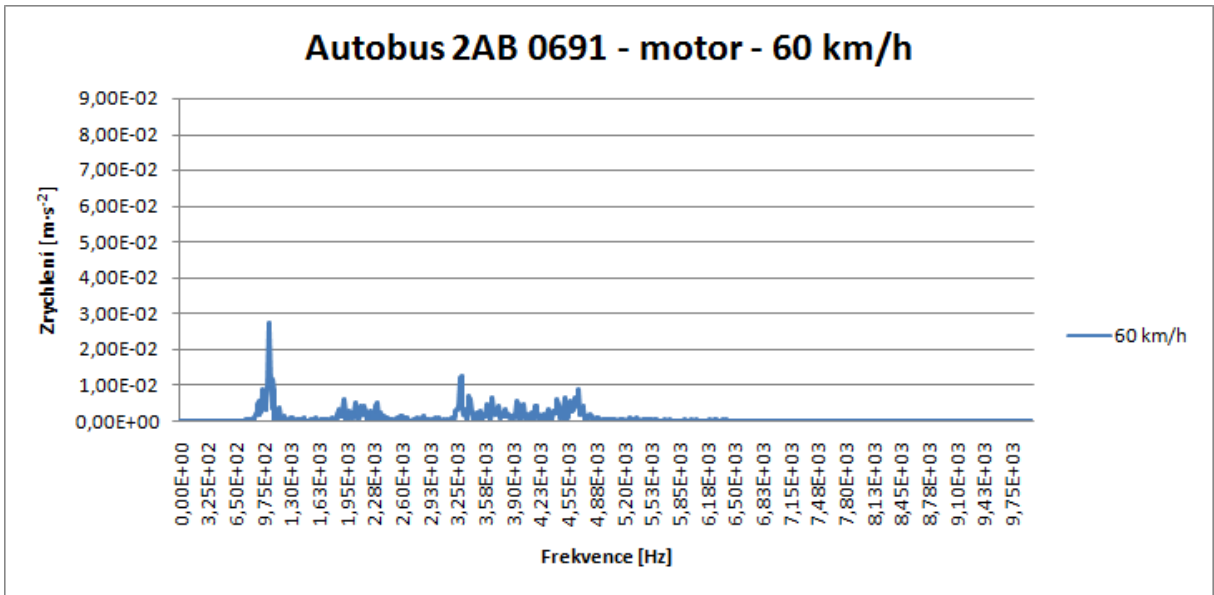
### 1. Rychlost - 40 km/h



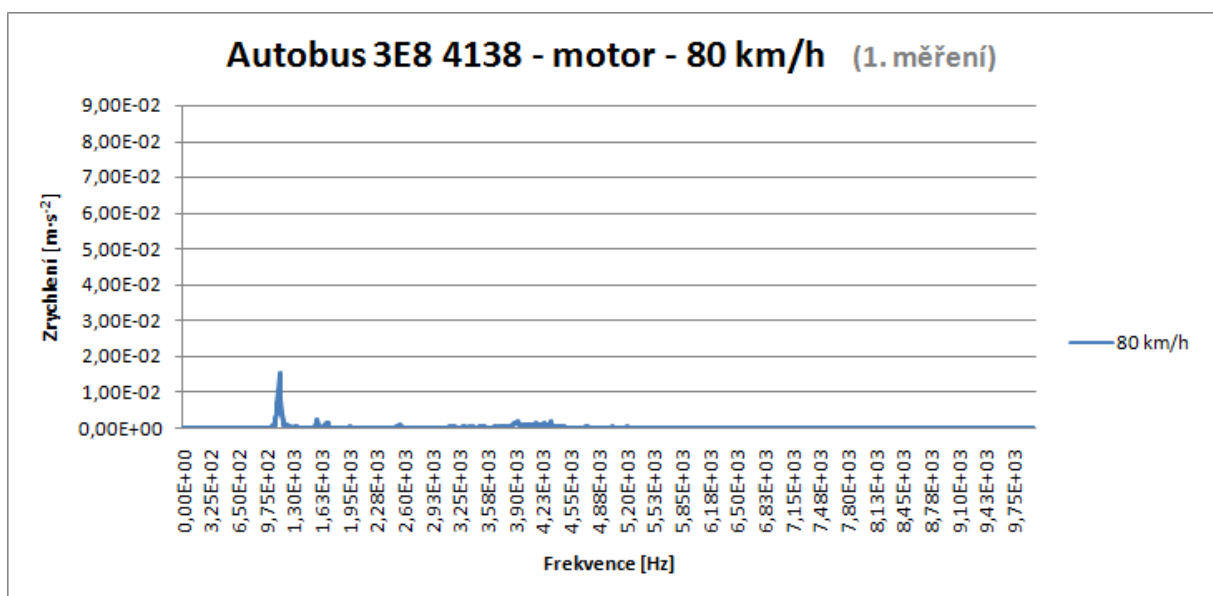
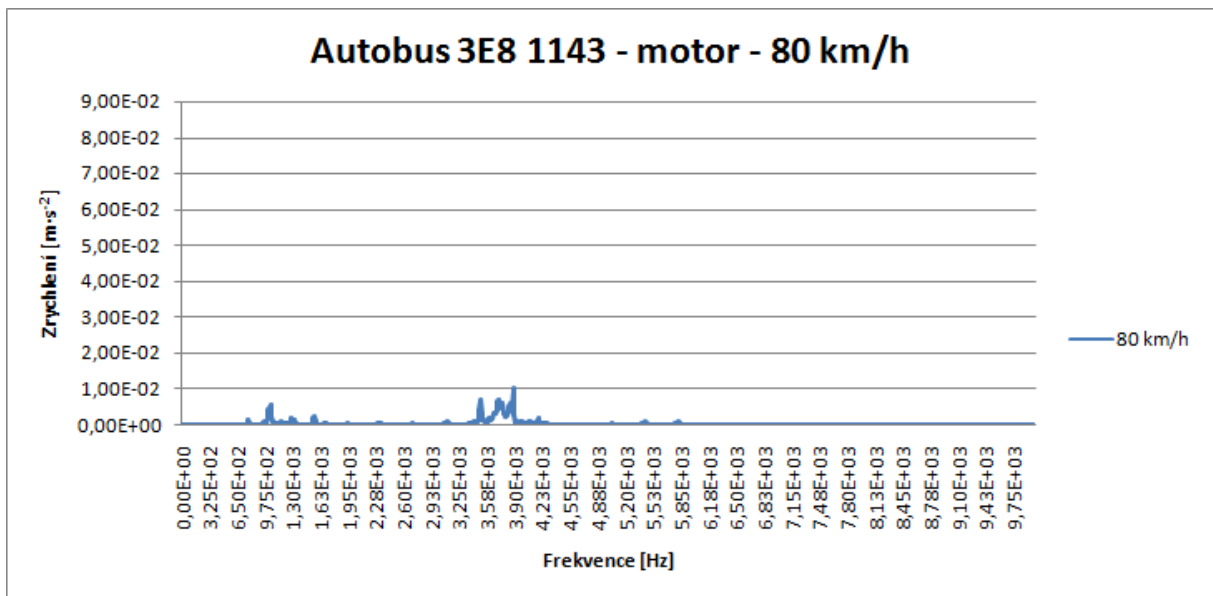


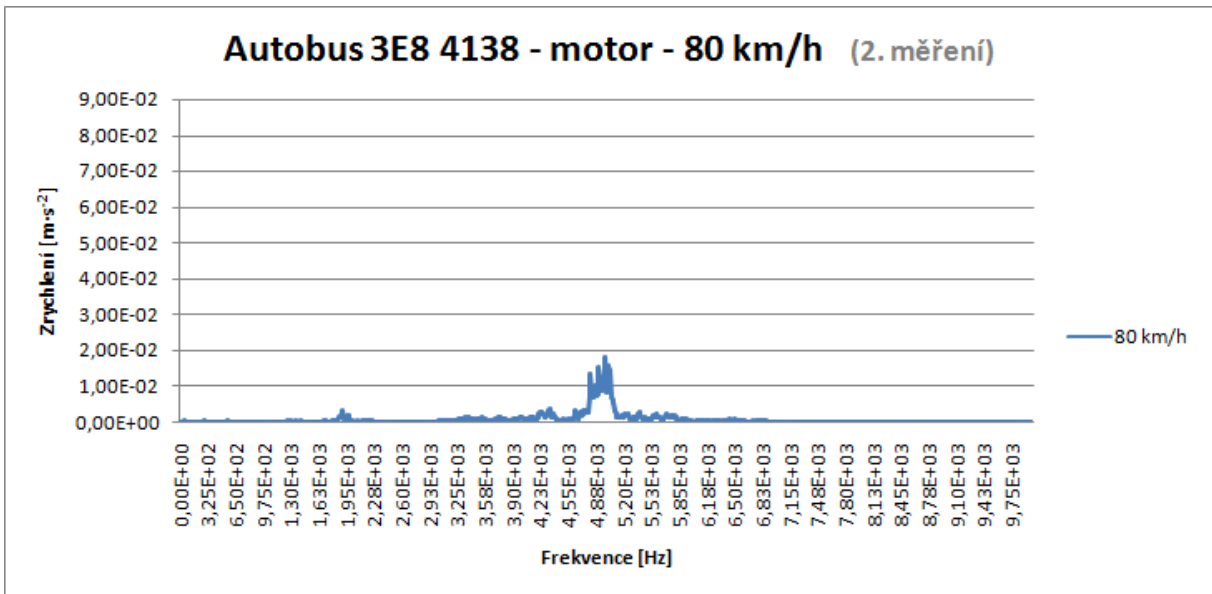
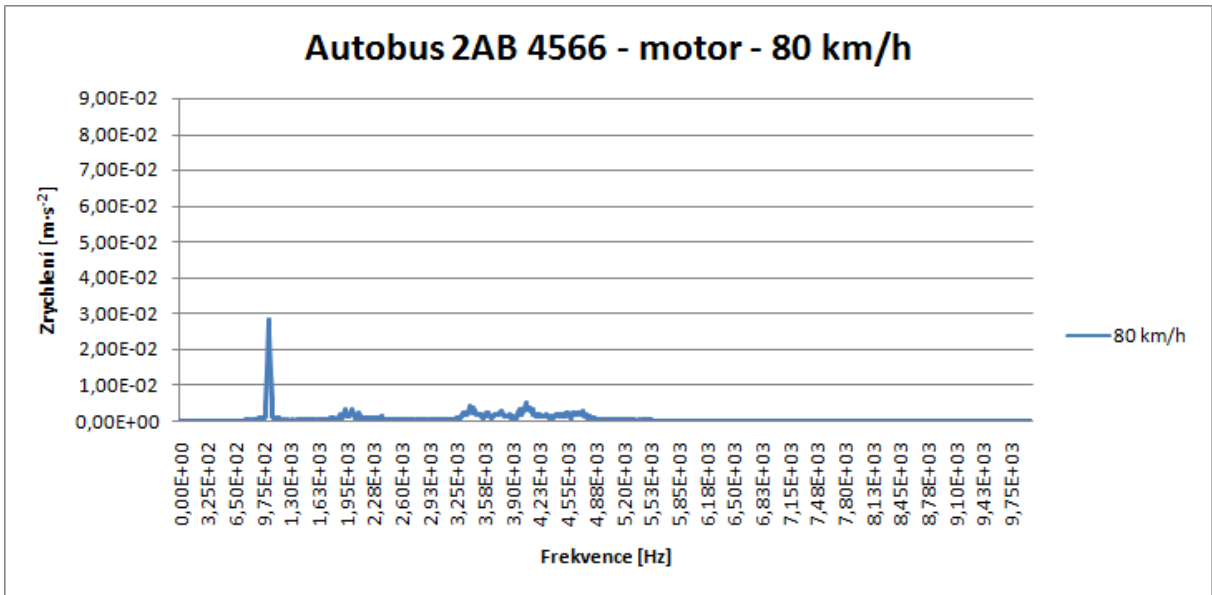
## 2. Rychlost - 60 km/h





### 3. Rychlost - 80 km/h

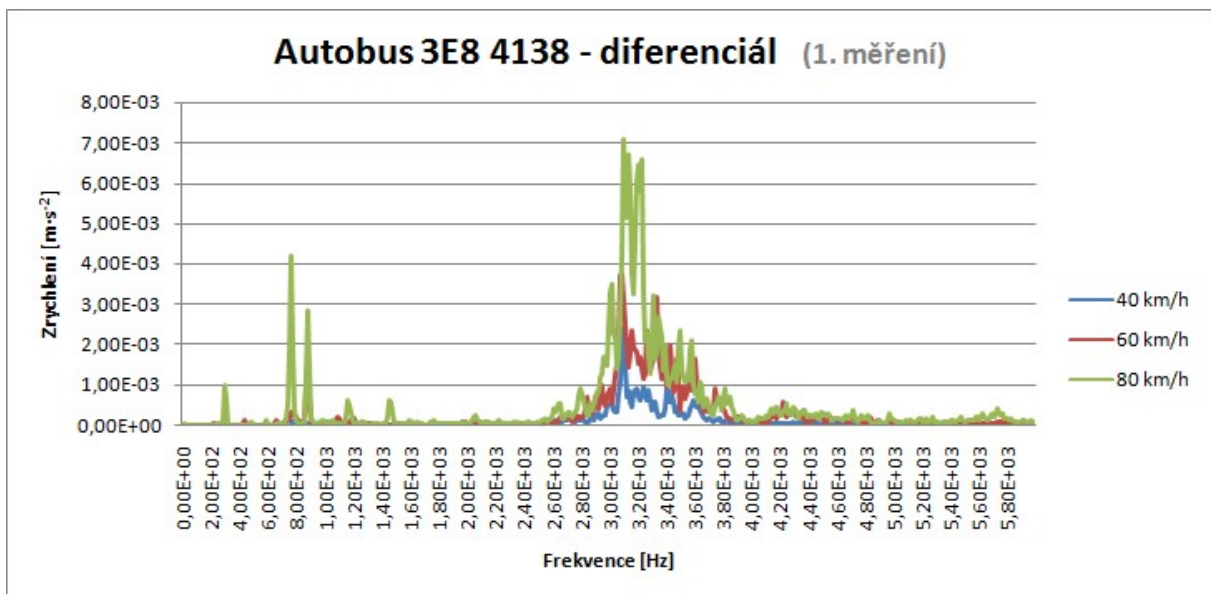
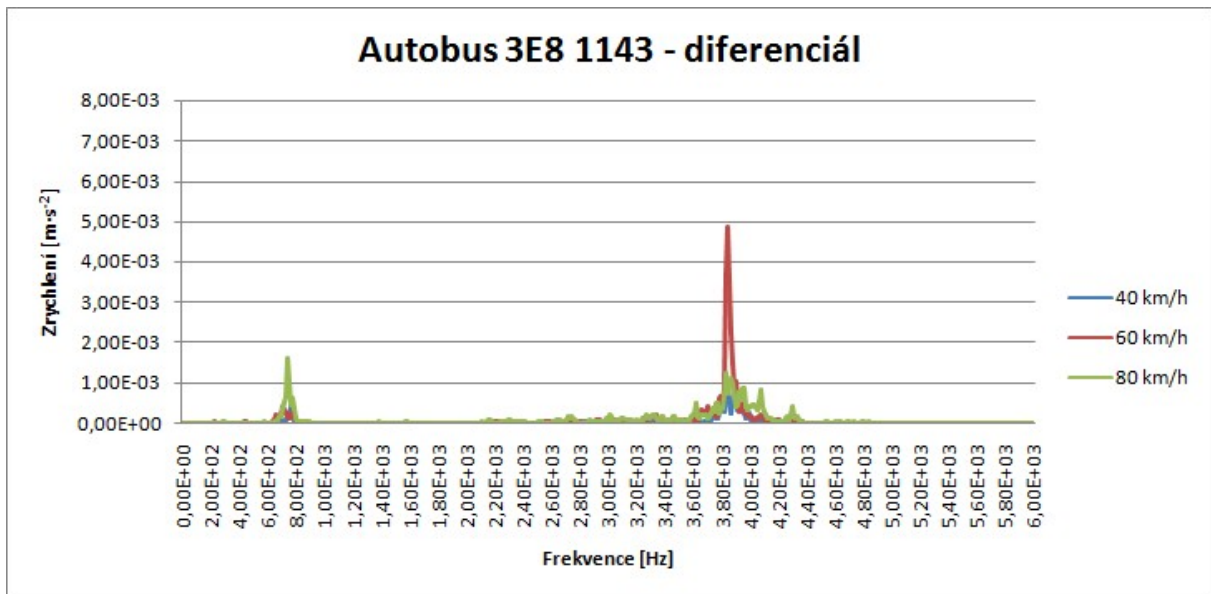


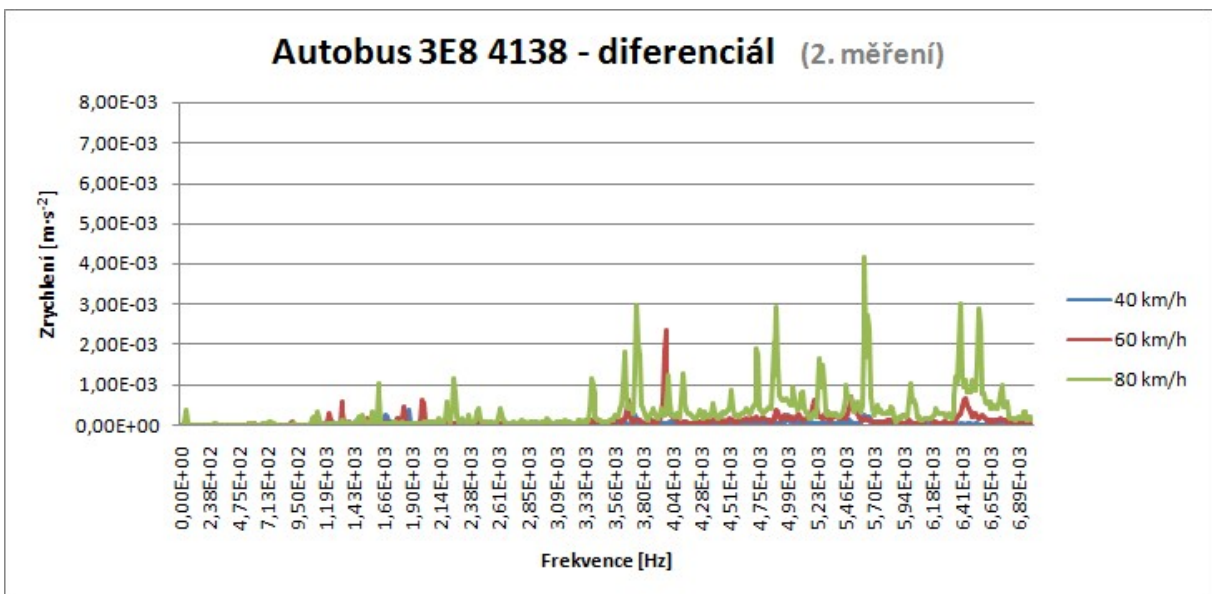
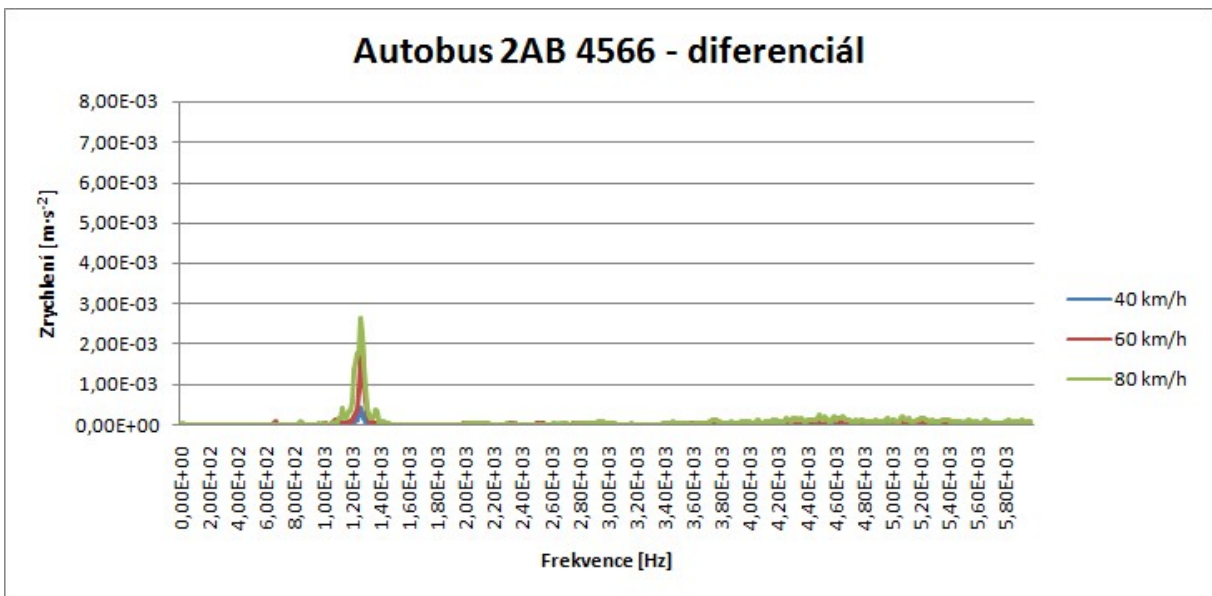
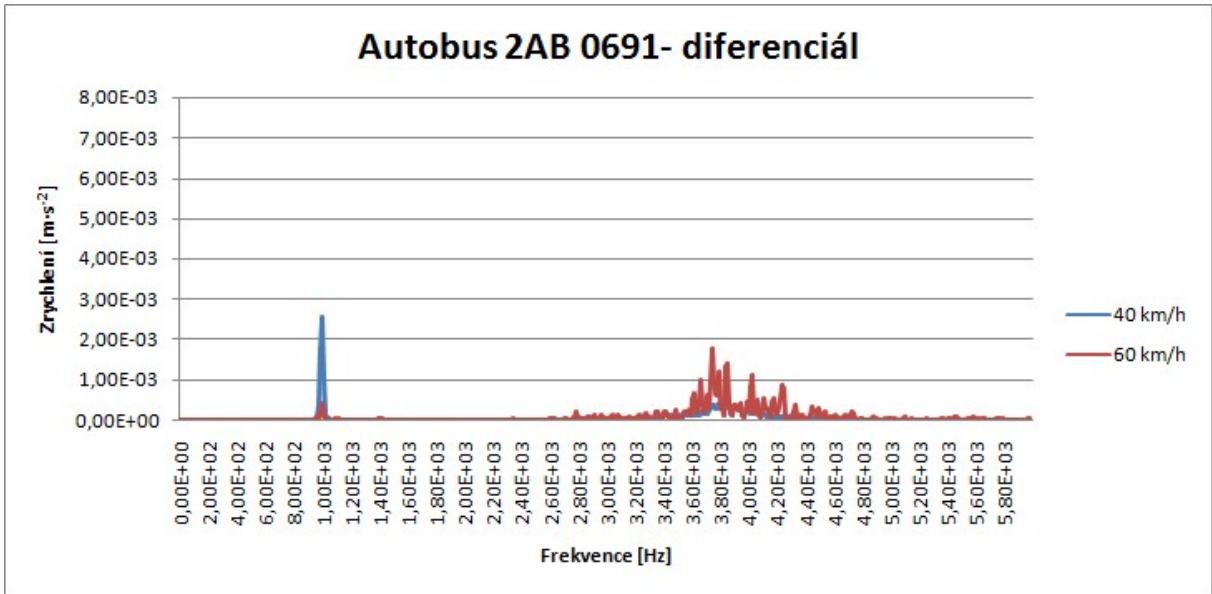


## Příloha č. 4 - Vibrace - vyhodnocení dat

U autobusu 3E8 4138 - 2. měření - diferenciál - frekvence do 7 000 Hz, protože se ještě při frekvenci 6 500 Hz vyskytovaly vyšší amplitudy.

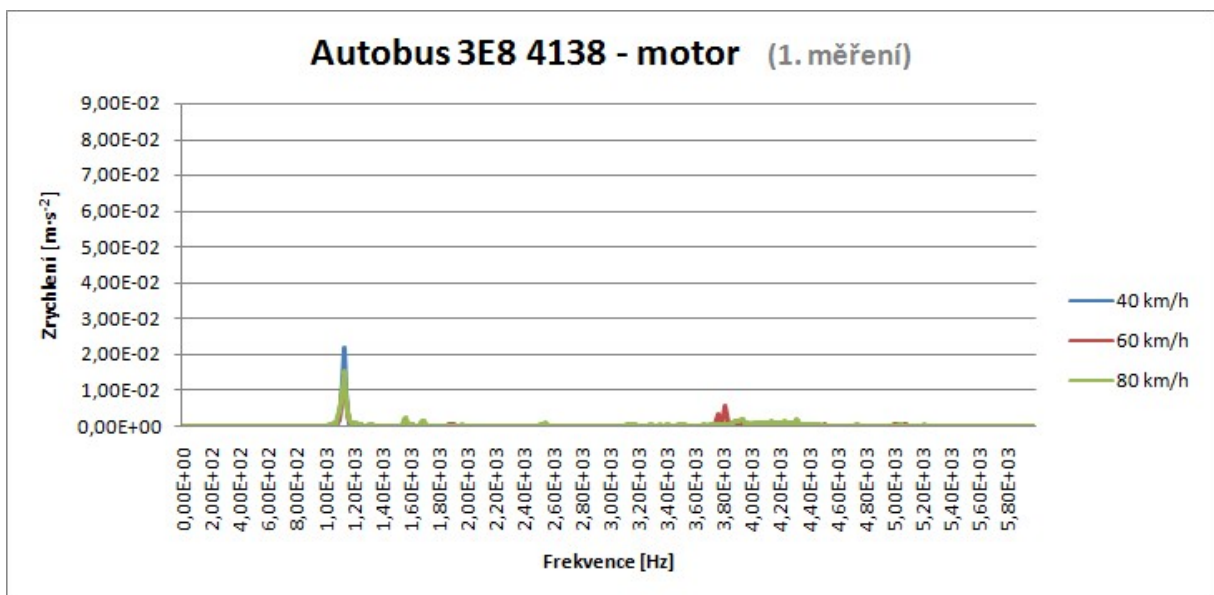
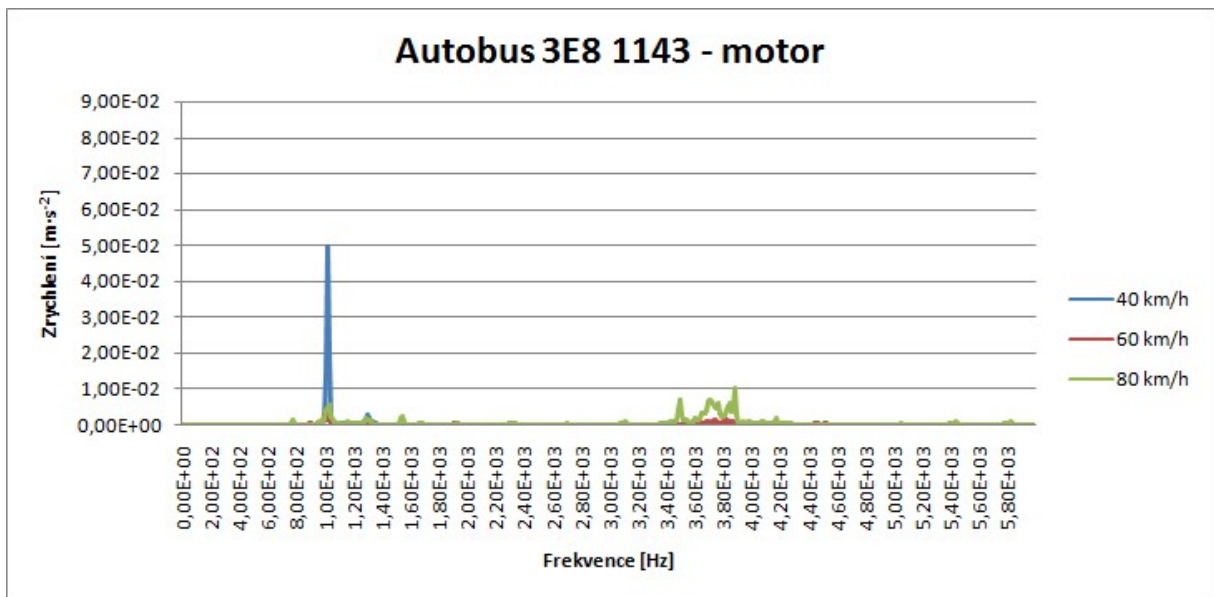
**Vibrace na diferenciálu:**

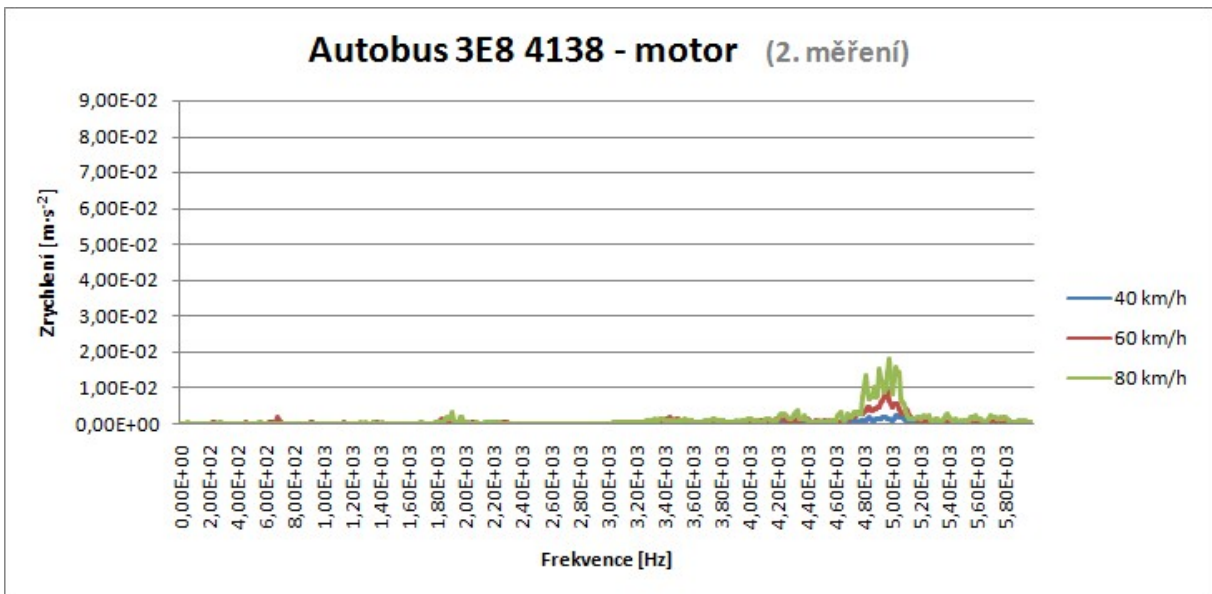
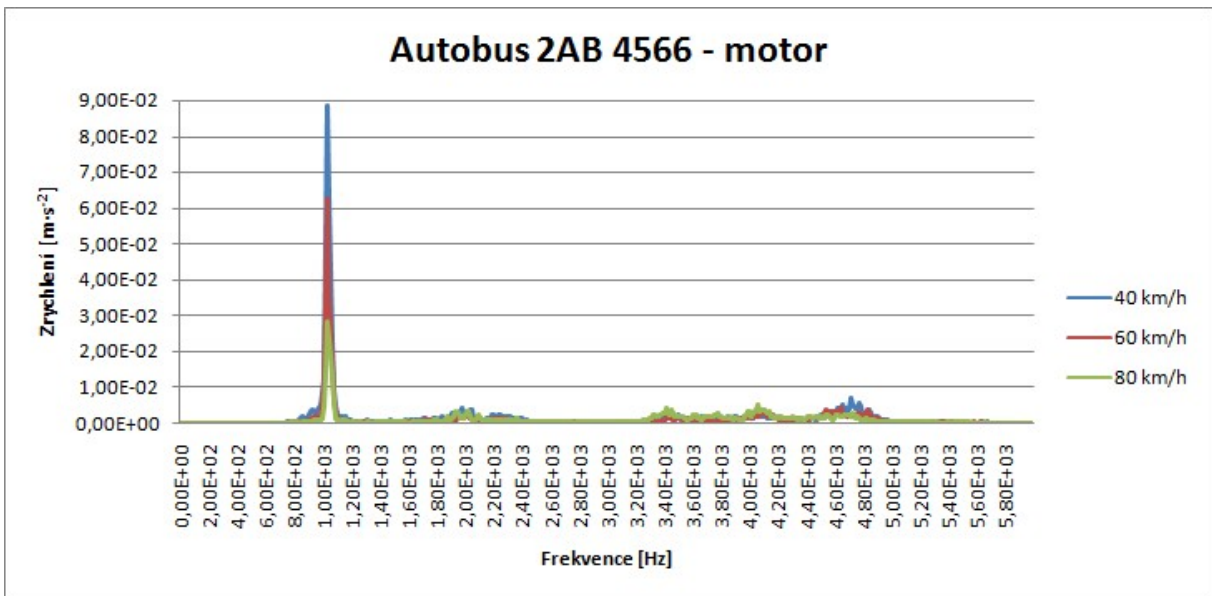
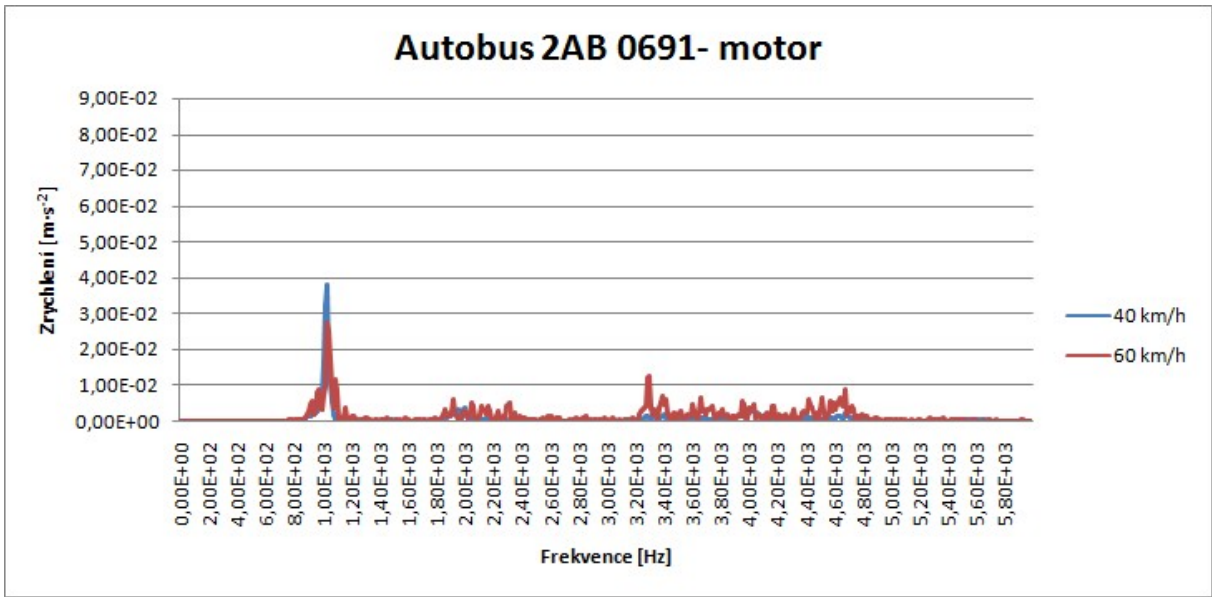






## Vibrace na motoru:





## Příloha č. 5 - Hluk - naměřená data

V tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty maximální hladiny akustického tlaku. U autobusu 3E8 4138, diagnostikovaného v červnu 2010, nebyla měřena hladina akustického tlaku.

<i>SPZ</i>	<i>Rychlost [km/h]</i>	<i>Maximální hladina akustického tlaku [dB]</i>
<b>3E8 1143</b>	40	92,8
	60	94,7
	80	95,8
<b>3E8 4138 (1)</b>	40	95,1
	60	97,6
	80	96,4
<b>2AB 0691</b>	40	89,7
	60	92,7
	80	95,8
<b>2AB 4566</b>	40	90,7
	60	89,8
	80	92,0
<b>3E8 4138 (2)</b>	40	-
	60	-
	80	-