



# ANALÝZA VIBRACÍ A HLUKU STUDENTSKÉ FORMULE

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jan Bělík**  
*Vedoucí práce:* prof. Dr. Ing. Pavel Němeček





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# STUDENT FORMULA VIBRATIONS AND NOISE ANALYSIS

**Bachelor thesis**

*Study programme:* B2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2301R000 – Mechanical Engineering

*Author:* **Jan Bělík**  
*Supervisor:* prof. Dr. Ing. Pavel Němeček



Tento list nahradte  
originálem zadání.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat všem učitelům a lidem, kteří mi pomohli s touto bakalářskou prací dojít ke zdárnému konci. Především bych chtěl poděkovat pracovníkům VÚTS a vedoucímu práce:

prof. Dr. Ing. Němeček Pavel – vedoucí bakalářské práce

Ing. Martin Pustka, Ph.D. – konzultant bakalářské práce

Ing. Petr Půlpán, Ph.D. – pracovník VÚTS

## Abstrakt

Tato práce se zabývá hlukem a vibracemi na voze studentské formule konstruované a vyrobené studenty na Technické univerzitě v Liberci v roce 2017. Po sezóně bylo jasné, že je potřeba začít hledat příčiny hluku a vibrací, protože je hluk omezen pravidly a vibrace jsou obecně na voze nežádoucí. Emise hluku prvního vozu byla blízká stanovenému limitu, proto by bylo dobré odhalit zdroje hluku. To je důležité, aby se mohly buď eliminovat, nebo využít nějakých řešení pro jeho snížení a tím i hladší průběh technické přejímky.

Na začátku se vycházelo z předpokladu, že největším zdrojem hluku bude motor. Ostatní zdroje budou významně nižší. Pro zjištění těchto zdrojů bylo provedeno několik měření ve firmě VÚTS. Jako první bylo provedeno měření za účelem zjištění reálných hodnot podle metodiky pravidel (venku na asfaltové ploše s mikrofonem v definované poloze). Zde bylo bohužel zjištěno, že formule překročila při určitých režimech limit pravidel. Dále bylo změřeno hlukové pole kolem formule, abychom viděli místa, kde má formule největší hodnoty hluku, kvůli dalšímu vyhodnocování. Po té byly pořízeny snímky z mikrofonního pole. Na těch jsou už vidět předpokládaná místa s největším hlukem. Poslední měření pro identifikaci zdrojů bylo provedeno pomocí mikrofonů v místech největší intenzity zvuku akcelerometrů na motoru i v rámu, s měřením otáček motoru pomocí proudové sondy.

Z tohoto měření jsou vyhodnoceny zdroje hluku. Potvrdil se předpoklad, že dominantní je hluk od motoru. Dále je vidět, že výfuk neplní dostatečnou tlumící funkci. Proto jsou navrženy optimalizace pro další generace formule. Například by byla vhodná lepší konstrukce výfuku, nebo je možnost využití zakrytování motoru karoserií s pohltivou pěnou.

Reálné snížení hluku bude možné ověřit po dokončení nové formule a opětovném měření v podobných podmínkách. Na závěr byly změřeny doplňkové psychoakustické veličiny pro porovnání zvuku, který vydává formule.

Klíčová slova: hluk, vibrace, formule SAE, měření a opatření ke snížení hluku

## Summary

This work deals with noise and vibrations on a car formula designed and produced by students at the Technical University in Liberec in 2017. After the season, it was clear that there is a need to start looking for the causes of noise and vibrations because the noise is limited by rules and the vibrations are generally on the car undesirable. The noise emissions of the first car were close to the legal limit, so it would be good to detect the sources of noise. This is important to either eliminate them or to use some solutions to reduce them and thus make the process of technical acceptance smoother.

Initially, it was assumed that the engine would be the biggest source of noise. Other resources will be significantly lower. Several measurements were made in VÚTS for these sources. Measurements were first made to determine the real values according to the rules methodology (outside on the asphalt surface with the microphone). Unfortunately, it was found that the formula exceeded the rule limit for certain modes. We also measured the noise field around the formula to see where the formula has the highest noise value for further evaluation. Pictures were then taken from the microphone field. On these are already seen the predicted places with the greatest noise. The latest measurement for resource identification was performed using microphones at the highest sound intensities and accelerometers on both the engine and the frame, with engine speed measurement using a current probe.

From this measurement noise sources are evaluated. The assumption was made that the motor noise was dominant. Furthermore, it can be seen that the exhaust does not fill up with sufficient damping function. Therefore, optimization is proposed for the next formula generation. For example, a better exhaust design would be appropriate, or the possibility of using a foam-absorbing bodywork engine.

Real noise reduction will be possible after completion of the new formula and re-measurement under similar conditions. Finally, supplementary psychoacoustic quantities were evaluated to compare the sound produced by the formula.

Keywords: noise, vibration, formula SAE, measurements and precaution against noise

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Popis vozu.....	13
	2.1 Předpokládané zdroje hluku.....	14
	2.2 Předpokládané zdroje vibrací.....	14
3	Příprava měření.....	15
	3.1.1 Měření celkových hladin akustického tlaku.....	15
	3.1.2 Mapování hlukového pole .....	15
	3.1.3 Frekvenční analýza.....	15
	3.1.4 Analýza vibrací.....	15
	3.1.5 Měřicí prostředí .....	15
4	Měření.....	17
	4.1 Měření podle pravidel SAE.....	17
	4.2 Referenční měření .....	19
	4.3 Měření pomocí mikrofonního pole .....	21
	4.4 Měření hluku a vibrací .....	23
	4.5 Měření pomocí simulátoru HATS.....	29
5	Vyhodnocení měření.....	31
6	Navrhované opatření.....	32
7	Závěr .....	33



## Seznam obrázků

Obr. 1 Formule na závodech v Mostě .....	11
Obr. 2 CAD model formule bez karoserie .....	13
Obr. 3 Volný prostor .....	16
Obr. 4 Poloodrazová komora .....	16
Obr. 5 Formule při měření podle pravidel SAE.....	17
Obr. 6 Formule při referenčním měření .....	19
Obr. 7 Měření mikrofonním polem.....	21
Obr. 8 Rozložení emise hluku při volnoběhu .....	22
Obr. 9 Rozložení emise hluku při rychloběhu .....	22
Obr. 10 Měření vibrací a hluku.....	23
Obr. 11 Akcelerometr na rámu Obr. 12 Akcelerometr na motoru .....	24
Obr. 13 Souřadný systém formule .....	25
Obr. 14 Měření figurínou .....	29

## Seznam tabulek

Tab. 1 Zdroje hluku.....	14
Tab. 2 Hladina hluku při měření podle pravidel SAE.....	18
Tab. 3 Hladina hluku při referenčním měření.....	20
Tab. 4 Hladina hluku.....	24
Tab. 5 Významné frekvence spektra hluku.....	25
Tab. 6 Vibrace při volnoběhu .....	26
Tab. 7 Vibrace při rychloběhu .....	26
Tab. 8 Vnímání a emise hluku .....	30

## Seznam grafů

Graf 1 Rozložení hlukového pole kolem formule, celkové hladiny akustického tlaku $L_{pA}$ (modře) a $L_{pC}$ (červeně).....	20
Graf 2 Vibrace na motoru při volnoběhu .....	27
Graf 3 Vibrace na rámu při volnoběhu .....	27
Graf 4 Vibrace na motoru při rychloběhu .....	28
Graf 5 Vibrace na rámu při rychloběhu .....	28

## Seznam zkratk

SAE – (Society of Automotive Engineers) společnost automobilových inženýrů

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá zdroji hluku a vibrací studentské formule. Jedná se o vůz postavený studenty v roce 2017 na Technické univerzitě v Liberci, viz obr. 1. Hlavní myšlenkou práce je najít zdroje a navrhnout změny, které by pomohly ke snížení hluku a vibrací v dalších generacích vozů.

Na závodech je stanoven hlukový limit, který musí vůz splňovat, aby mohl závodit. Ten je zde zaveden nejspíše proto, aby se předcházelo nepříznivému vlivu na studenty a lidi v okolí formule. Tento projekt učí také studenty řešit neustále mnoho praktických úkolů, ke kterým se studenti dostanou v praxi. Proto jsou nuceni řešit problémy, které nesouvisí s problematikou závodních vozů. Je zde spousta takovýchto pravidel. Například spotřeba paliva a omezení hluku. Jsou určeny k tomu, aby studenti pracovali na problémech, se kterými se setkávají konstruktéři běžných osobních automobilů. Běžné osobní nebo nákladní automobily, musejí splňovat hlukové normy a snažíme se, aby měly co nejnižší spotřebu na rozdíl od závodních speciálů.



Obr. 1 Formule na závodech v Mostě

Analyzován bude vůz, se kterým tým závodil na 3 závodech v sezóně 2017. Byly to první závody nově vzniklého týmu. Jednalo se o první zkonstruovanou a vyrobenou formuli na Technické univerzitě v Liberci. Na všech závodech se podařilo projít hlukovým testem stejně jako zbytkem technických přejímk. Díky tomu vůz závodil na všech třech závodech.

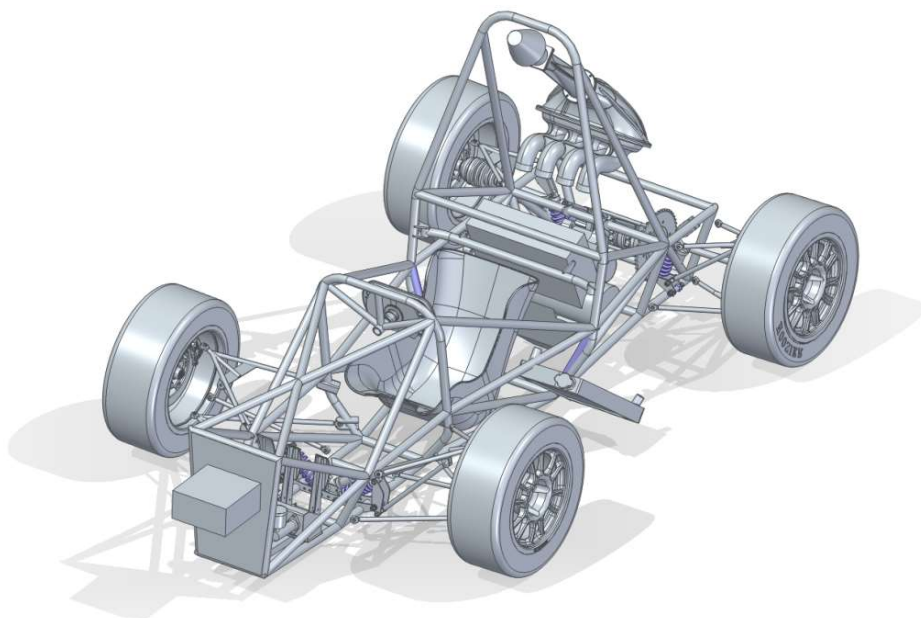
Nejdříve musíme podrobně analyzovat vůz a najít předpokládané zdroje. Také bude potřeba najít, jestli má vůz nějaké nedostatky v tomto směru. Provedeme přípravu měření. Zapotřebí je rozmyslet si metody, které se použijí na zjištění zdrojů vibrací a hluku. Připravit vybavení, které bude potřeba a vytvořit harmonogram měření.

Tato práce spočívá v provedení měření. To se bude skládat z několika částí. Jako první musíme zopakovat měření, která byla provedena na závodech. Za druhé zaznamenat hlukové pole kolem formule. Za třetí změření pomocí figuríny s vestavěnými mikrofony pro dopad na člověka. Dále bude provedeno měření pomocí mikrofonním polem. A posledním měřením zjistit vibrace. Z těchto měření ověříme zdroje, které mají velký a které malý vliv na konečnou hodnotu hluku a vibrací.

Z těchto dosažených výsledků navrhne opatření a postupy, které pomohou dalším generacím ke snížení hluku a vibrací.

## 2 Popis vozu

Vůz je konstruovaný dle pravidel pro formule SAE [1] viz obr. 2. Jedná se o formule konstruované a vyráběné studenty vysoké školy. V našem případě se jedná o trubkový rám vlastní konstrukce, který odpovídá rozměrovým a konstrukčním požadavkům pravidel. Pohonnou jednotkou je motor ze silničního motocyklu Suzuki GSX-R 600. Motor je přimontován pomocí šroubů přímo k rámu bez využití tlumících prvků. Motor má omezený průřez sání pro všechny 4 válce s maximálním průměrem 20 mm. Převodovka se spojkou je ve společné olejové náplni s motorem, tak jak tomu je u sériového motocyklu. Chlazení motoru je zajištěno vodním okruhem s chladičem a ventilátorem. Řazení je pomocí elektrického servomotoru ovládaného spínači pod volantem. Karoserie je vyrobena z laminátu, konkrétně z uhlíkové tkaniny vyplněné epoxidovou pryskyřicí. Výfuk je svařen z ocelových nerezových trubek a má dva tlumiče.



Obr. 2 CAD model formule bez karoserie

V pravidlech SAE [1] na straně 98 je předepsán maximální hlukový limit, který se měří na závodech. „Pro volnoběžné otáčky je hranice 103 dB(C) a pro zvýšené otáčky (pro náš motor 10 500 ot./min) 110 dB(C). Měří se při konstantních otáčkách, kdy vůz stojí a má zařazený neutrál. Mikrofon je umístěn ve vzdálenosti 0,5 m v rovině pod úhlem 45° od koncovky výfuku.“

Z těchto režimů budeme vycházet při následujících měřeních. Proto budou měření probíhat při volnoběhu a tzv. rychloběhu, tedy při 10 500 ot./min.

## 2.1 Předpokládané zdroje hluku

Hlavním předpokládaným zdrojem hluku je motor, který pohání formuli. Jde o čtyřválcový, čtyřtaktí motor o obsahu 600 ccm. Dá se předpokládat, že bude nejhluchnější.

Druhým předpokládaným zdrojem bude výfuk. Jedná se o první formuli, kterou studenti stavěli. Proto jeho tvar, délka a použití tlumičů není efektivní. Zejména při prvním spuštění se zjistil nevyhovující hluk, proto se na poslední chvíli přidával druhý tlumič.

Dalším zdrojem by mohlo být sání. Po naladění mapy motoru je problém ve volnoběhu držet konstantní otáčky. Kolísají, a to by mohlo mít také vliv na hluk formule. Řazení s převodovkou nebude hrát roli při technické přejímce, protože formule stojí na místě a je zařazený volnoběh.

Ventilátor na chladiči vodního okruhu. Ten také nebude mít vliv na technickou přejímku. Měření hluku na závodech netrvá příliš dlouho a formule není příliš zahřátá. Proto nedochází ke spuštění. Pokud by tento případ nastal, dalo by se vypnout ventilátor v řídicí jednotce, jelikož test netrvá příliš dlouho. Hluk od převodovky s řazením a ventilátoru na chladiči nejsou samy o sobě hlasité, takže je možné, že při nastartovaném motoru budou zanedbatelné.

Seznam zdrojů je uveden v tabulce 1.

Pořadí	Zdroj
1	Motor
2	Výfuk
3	Sání
4	Řazení
5	Ventilátor na chladiči
6	Převodovka

Tab. 1 Zdroje hluku

## 2.2 Předpokládané zdroje vibrací

Za hlavní zdroj vibrací se předpokládá motor. Ten bude vnášet do rámu a dále do celé formule značné vibrace. Další zdroje jako jsou například vibrace od servomotoru řazení nebo od nohou pilota budou mnohonásobně menší. Samozřejmě se vibrace projeví na výfuku a sání, ale nemusí jít přímo o zdroj. Bude tedy zapotřebí změřit vibrace motoru a jejich přenos do rámu.

## **3 Příprava měření**

Byly zvoleny metody pro určení zdroje hluku a vibrací. Dále bylo zvoleno prostředí, ve kterém bude měření probíhat.

### **3.1.1 Měření celkových hladin akustického tlaku**

Jedná se o měření akustického tlaku v hladinovém vyjádření. Za pomoci váhových filtrů se stanovují hodnoty  $L_{pA}$  a  $L_{pC}$  [dB]. Využíváme váhový filtr A, který koriguje naměřený hluk na vnímání lidského ucha. Také bylo využito váhového filtru C, který je korekcí na vnímání hluku lidským uchem při vyšších hlasitostech. Použití filtru C předepisují pravidla SAE.

### **3.1.2 Mapování hlukového pole**

Plošné rozložení hluku v rovině rovnoběžné s obrysem formule bylo měřeno mikrofonním polem pomocí metody beamforming. Jedná se o měření pomocí 60 mikrofonů a kamery. To nám udělá obrázek hlukového pole. Jde o obrázek, který nám ukazuje hladinu hluku ve všech místech.

### **3.1.3 Frekvenční analýza**

Jde o frekvenční analýzu akustického tlaku. Zde byly využity frekvenční filtry, pro zjištění spektra frekvencí.

### **3.1.4 Analýza vibrací**

Pro měření vibrací bylo použito akcelerometrů, které zaznamenávají efektivní hodnotu zrychlení v g. V analyzátoru byl proveden přepočítání na  $m/s^2$ .

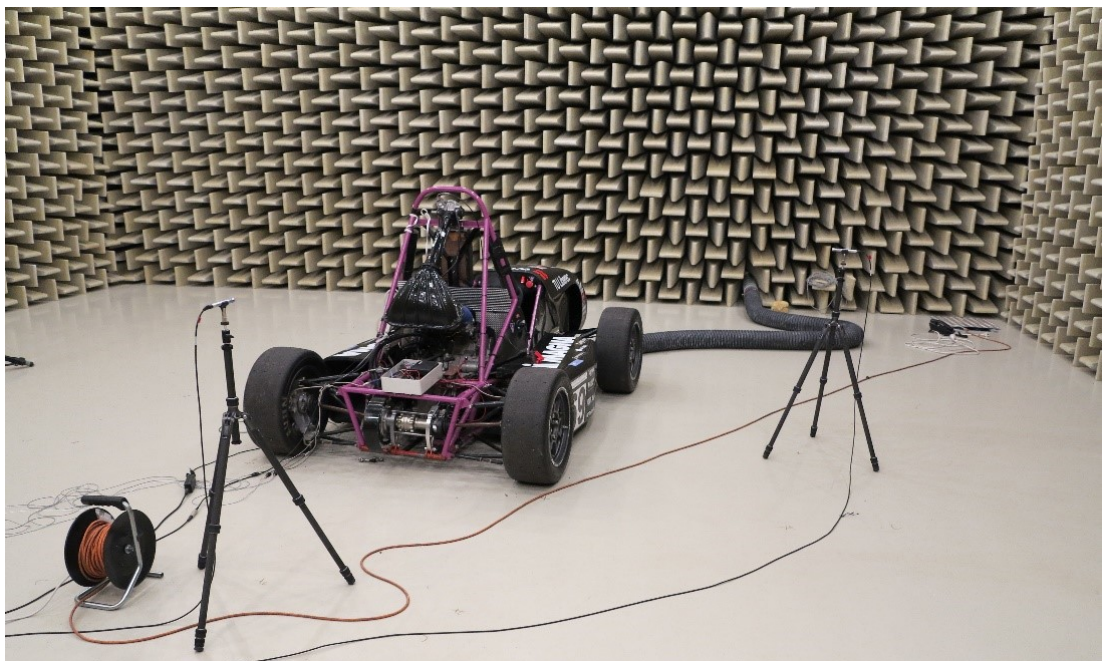
### **3.1.5 Měřící prostředí**

Měření podle metodiky SAE byla provedena ve volném prostoru na asfaltové ploše před budovu VÚTS v Liberci, viz obr. 3. Akustické prostředí odpovídá podmínkám při technických přejímkách na závodech.



Obr. 3 Volný prostor

Další měření zaměřená na identifikaci zdrojů hluku byla provedena v poloodrazové komoře viz obr. 4. Jedná se o uzavřenou místnost s odrazivou podlahou, pohltivými stěnami a stropem (absorpční klíny). Místnost má rozměry 11,9 m × 8,65 m × 5,42 m. Objem místnosti je 558 m<sup>3</sup>.



Obr. 4 Poloodrazová komora



## 4 Měření

Měření probíhala ve vývojových laboratořích VÚTS v Liberci a venku před budovou. Kvůli bezpečnosti byl vymontován řetěz, který pohání diferenciál. Vzhledem k tomu, že všechna měření probíhala staticky (auto se nepohybuje, ale bude stát na místě s vyřazenou rychlostí), nemá vymontování řetězu vliv na výsledky. Namontovaly se všechny komponenty, které se využívají na závodech, karoserie, všechny kryty a další díly, které byly od závodů sundané kvůli převozu nebo ukázkám.

### Přehled měření

- **Měření podle pravidel SAE** – pomocí jednoho mikrofону dle pravidel
- **Referenční měření** – měření hlukového pole ve vnějším prostředí
- **Měření pomocí mikrofonního pole** – mapování rozložení hlukového pole v okolí formule
- **Měření hluku a vibrací** – měření pro potvrzení zdrojů hluku a velikosti vibrací
- **Měření pomocí simulátoru HATS** – měření za podmínek odpovídajících vnímání hluku řidičem

### 4.1 Měření podle pravidel SAE

Venku před budovou proběhlo měření podle pravidel formule SAE [1], viz obr. 5. Mikrofon byl umístěn do dvou možných míst požadovaných pravidly. Bylo využito přenosného analyzátoru s baterií a notebookem. Druhý notebook byl připojen k řídicí jednotce motoru pro zobrazení otáček.



Obr. 5 Formule při měření podle pravidel SAE

Při měření volnoběhu docházelo k značnému kolísání otáček v rozsahu od 3 500 ot./min do 5 500 ot./min. Provedlo se měření ve dvou pozicích. Dále byly nastaveny otáčky rychloběhu, které kolísaly od 10 500 ot./min do 10 700 ot./min a změřil se hluk.

### Použité přístroje

- Multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0
- Kondenzátorový mikrofon Brüel&Kjaer 4190, č. 3077507

### Podmínky

- Místo: venkovní prostor před halou VÚTS Liberec
- Teplota: 2,8 °C
- Relativní vlhkost: 75,5%
- Tlak: 968 mbar

### Výsledky měření

Naměřené hodnoty hluku byly zapsány v tabulce 2.

	$L_{pA}$	$L_{pC}$
<b>Volnoběh pozice 1</b>	99,2dB(A)	109,0dB(C)
<b>Volnoběh pozice 2 (za kolem)</b>	97,7dB(A)	106,0dB(C)
<b>Rychloběh pozice 1</b>	110,0dB(A)	115,0dB(C)
<b>Rychloběh pozice 2 (za kolem)</b>	103,0dB(A)	107,0 dB(C)

Tab. 2 Hladina hluku při měření podle pravidel SAE

Z výsledků je zřejmé, že limit hluku při volnoběhu 103 dB(C) byl překročen v obou případech. Limit hluku na rychloběh 110 dB(C) byl překročen v prvním měřicím místě. Překročení hodnot při volnoběhu mohlo být způsobeno kolísáním otáček, které mělo velký vliv. Důvod překročení v rychloběhu bude nutné zjistit při dalších měření. Zřejmě se jedná o závadu nebo změnu výfukové soustavy oproti měření při závodech.

## 4.2 Referenční měření

Pro referenční měření viz obr. 6, byly stanoveny pozice mikrofonů kolem formule. Mikrofon byl umístěn na přenosném stativu ve výšce 1 m. Dále byl připojen přenosný analyzátor s baterií a notebookem. Druhý notebook byl připojen k řídicí jednotce motoru pro zobrazení otáček.

Po přípravě byla formule nastartována a nastaven volnoběh. Ten kolísal od 3 800ot./ min do 6 500 ot./min. V každé poloze mikrofonu bylo provedeno lineární průměrování hladiny akustického tlaku o délce 20 s.



Obr. 6 Formule při referenčním měření

### Použité přístroje

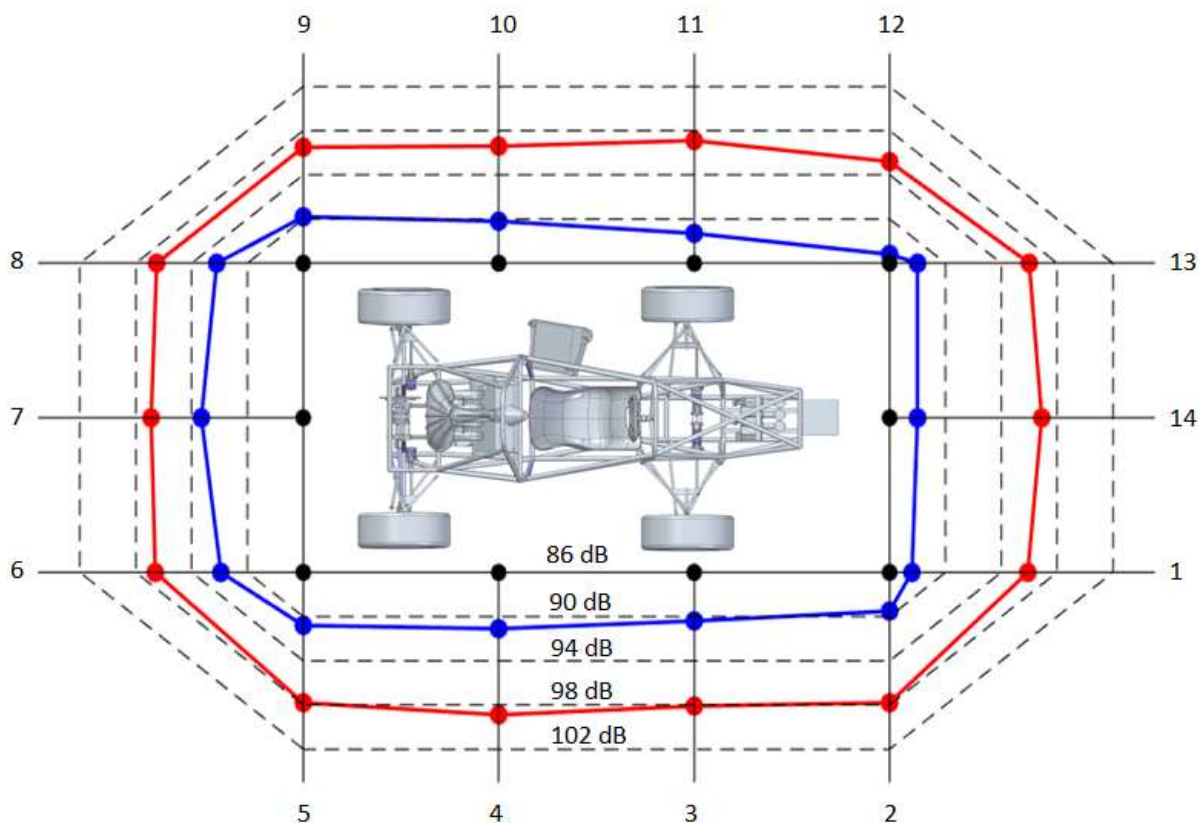
- Multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0
- Kondenzátorový mikrofon Brüel&Kjaer 4190, č. 3077507

### Podmínky

- Místo: venkovní prostor před halou VÚTS Liberec
- Teplota: 2,5 °C
- Relativní vlhkost: 79%
- Tlak: 964 mbar

### Výsledky

Byl vytvořen graf znázorňující hlukové pole kolem formule, viz graf 1.



Graf 1 Rozložení hlukového pole kolem formule, celkové hladiny akustického tlaku  $L_{pA}$ (modře) a  $L_{pC}$ (červeně)

Zde je vidět, že nejvyšší hladina hluku je v zadní části vozu a na pravé straně (pozice 3 – 8). To je nejspíše způsobeno motorem a výfukem. Hodnoty hluku v jednotlivých pozicích jsou vypsány v tabulce 3.

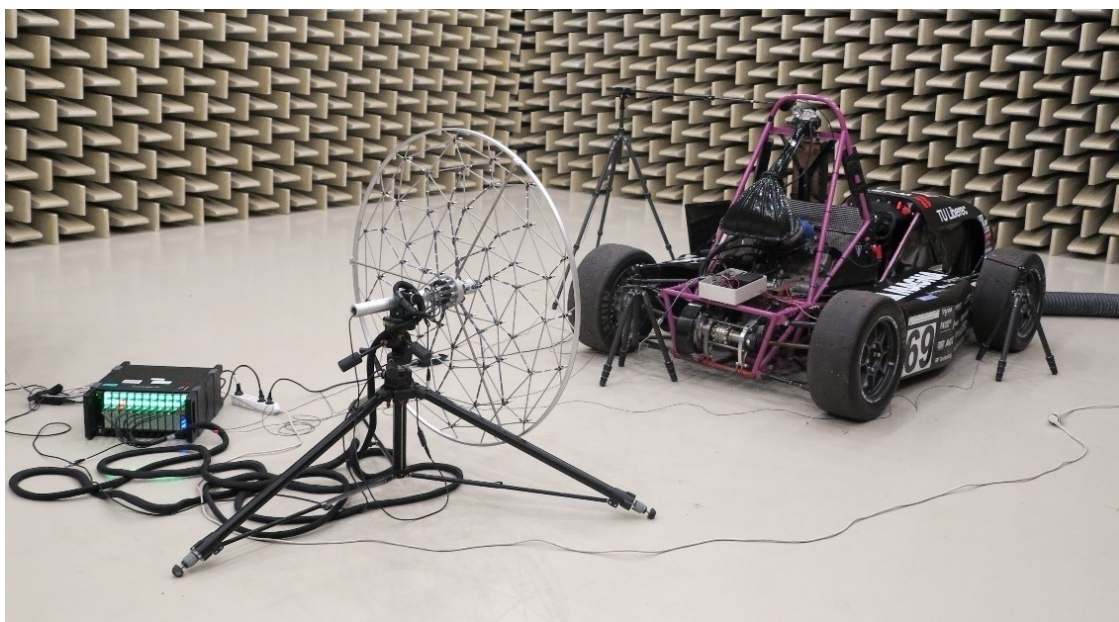
Pozice	$L_{pA}$	$L_{pC}$
1	87,6 dB(A)	95,9 dB(C)
2	89,5 dB(A)	97,8 dB(C)
3	90,4 dB(A)	98,1 dB(C)
4	91,1 dB(A)	98,9 dB(C)
5	90,8 dB(A)	97,8 dB(C)
6	91,9 dB(A)	96,6 dB(C)
7	93,3 dB(A)	96,9 dB(C)
8	92,2 dB(A)	96,5 dB(C)
9	90,2 dB(A)	96,5 dB(C)
10	89,8 dB(A)	96,6 dB(C)
11	88,7 dB(A)	97,1 dB(C)
12	86,8 dB(A)	95,2 dB(C)
13	88,0 dB(A)	96,0 dB(C)
14	88,0 dB(A)	96,9 dB(C)

Tab. 3 Hladina hluku při referenčním měření

### 4.3 Měření pomocí mikrofonního pole

Měření bylo provedeno ve třech polohách mikrofonního pole (na zadní, levé a pravé straně formule). Měřicí místa vycházejí z předchozího měření hlukového pole okolo formule, v přední části je hlukové pole méně významné.

Byly použity 3 mikrofony jako reference. Byly umístěny v místech největšího hluku. První u sání motoru, druhý u motoru a třetí byl umístěn u výfuku, viz obr. 7. Měření probíhalo ve dvou režimech stejně jako u předchozích měření, a to při volnoběhu od 4 500 ot./min do 5 500 ot./min a rychloběhu, který kolísal od 10 500 ot./min do 10 600 ot./min.



Obr. 7 Měření mikrofonním polem

#### Použité přístroje

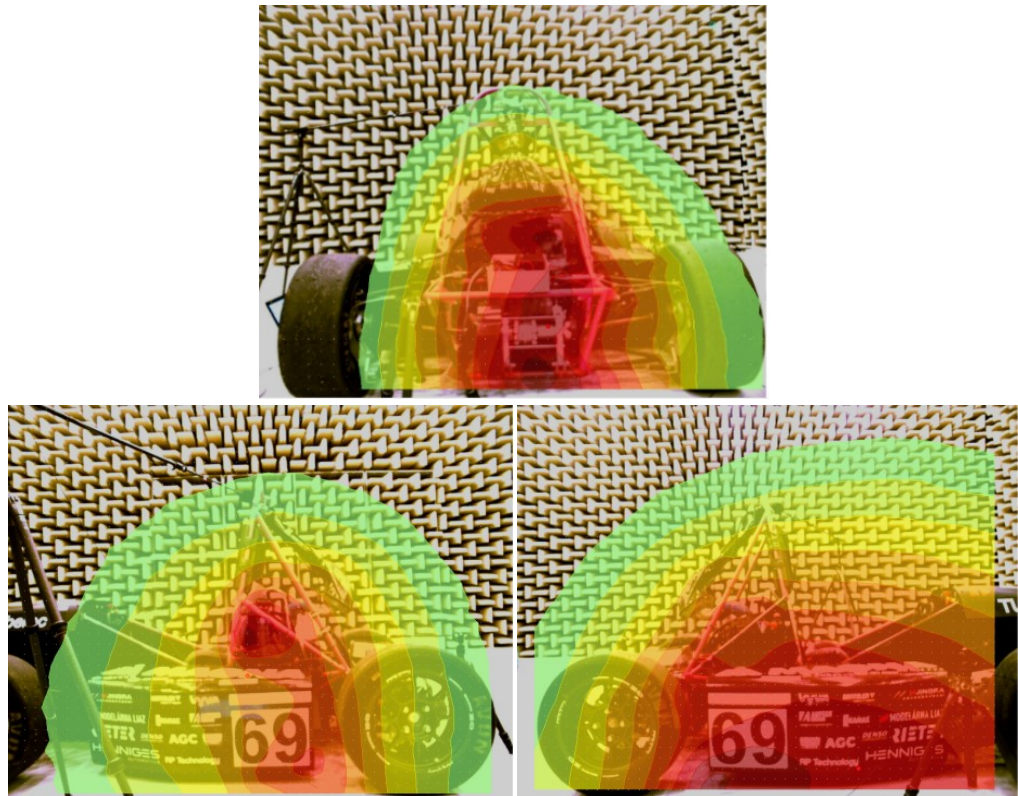
- Multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE
- Kruhové mikrofonní pole Brüel&Kjaer WA-1558-W-006, 60 mikrofonů typu 4958,  $\varnothing$  1m
- 3x kondenzátorový mikrofon Brüel&Kjaer 4190

#### Podmínky

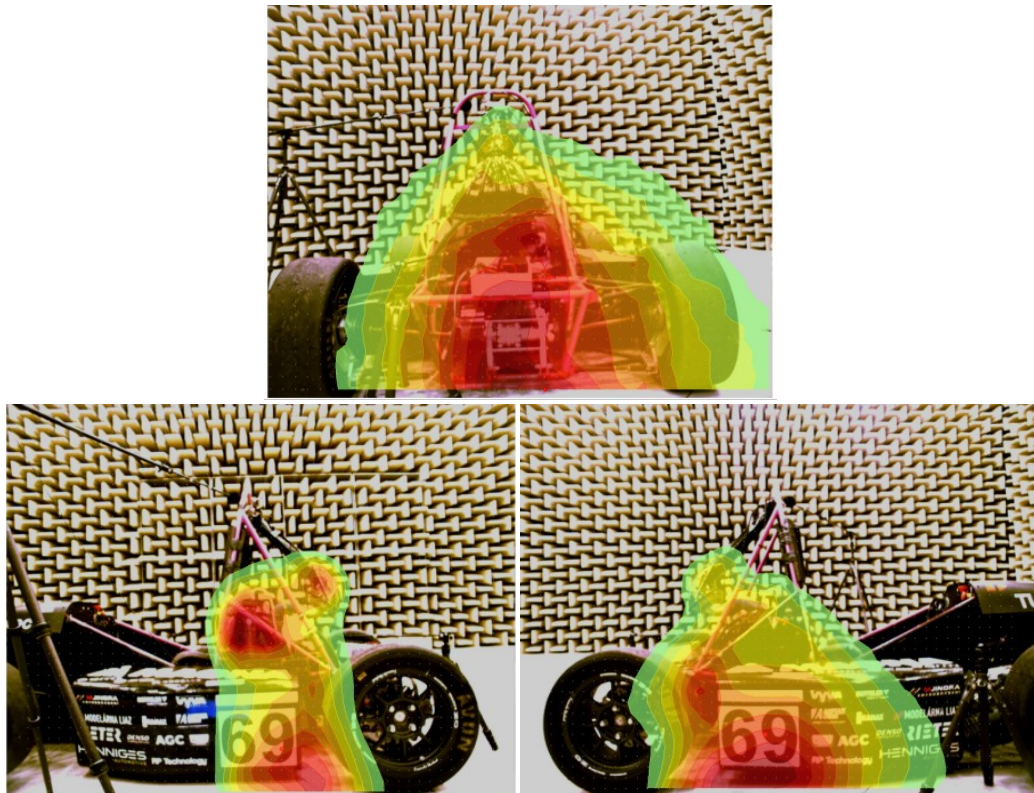
- Místo: polobezodrazová komora VÚTS Liberec
- Teplota: 23,1 °C
- Relativní vlhkost: 31,3%
- Tlak: 984 mbar

## Výsledky

Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 8 a 9.



Obr. 8 Rozložení emise hluku při volnoběhu

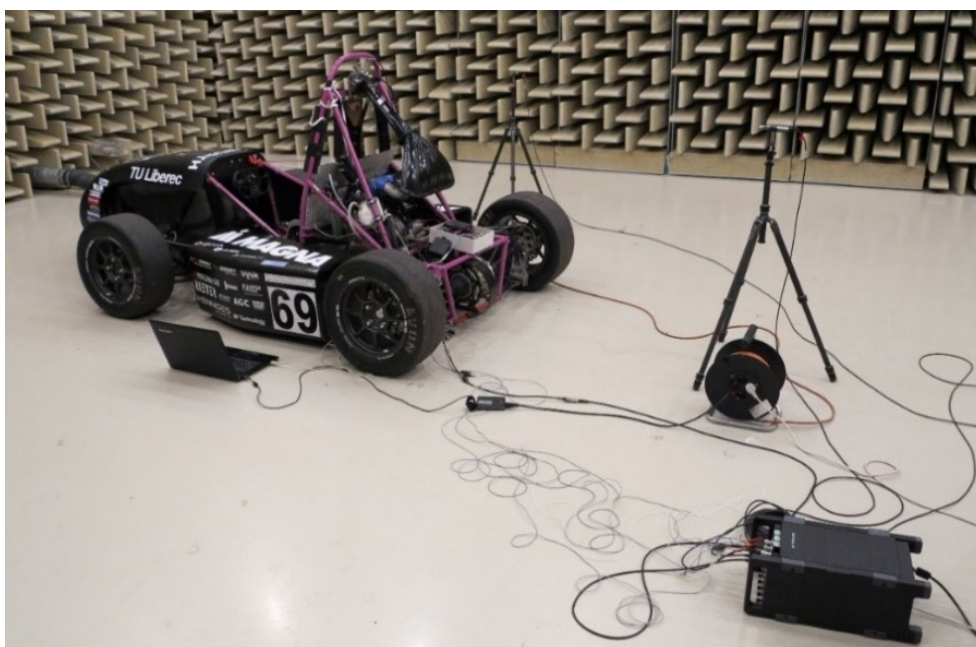


Obr. 9 Rozložení emise hluku při rychloběhu

Z těchto obrázků se nám potvrdilo, že největší hluk je v zadní a pravé části vozu. Hluk od motoru a výfuku, jak je vidět z obrázku volnoběhu, vyzařuje největší emise hluku. Při rychloběhu se nám ještě ukazuje hluk od sání.

#### 4.4 Měření hluku a vibrací

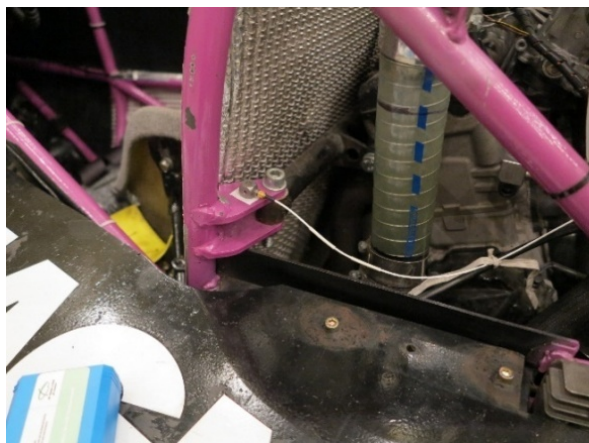
Byly ustaveny dva mikrofony do pozic (4 a 7), viz obr. 10. Podle hlukové mapy (graf 1) z předchozích měření se jedná o místa s největším hlukem. Dále byly namontovány dva akcelerometry. Pro jeden akcelerometr bylo použito nábojových zesilovačů a druhý byl připojen napřímo k analyzátoru. Na kabel vedoucí k svíčke prvního válce byla připojena proudová sonda kvůli přesnému určení otáček. Byl použit modul s napájením a notebookem. Druhý notebook byl připojen k řídicí jednotce motoru pro zobrazení otáček při nastavování režimů.



Obr. 10 Měření vibrací a hluku

Po přípravě byla formule nastartována. Nastavil se volnoběh, který kolísal od 4 000 ot./min do 4 100ot./min. Při měření byl proveden časový záznam veličin o délce 10 s.

Umístění akcelerometrů na rámu a bloku motoru je vidět na obr. 11 a 12. Umístění bylo zvoleno s ohledem na největší zdroj vibrací a rám, do kterého se vibrace přenáší.



Obr. 11 Akcelerometr na rámu



Obr. 12 Akcelerometr na motoru

### Použité přístroje

- Multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE
- 2x kondenzátorový mikrofón Brüel&Kjaer 4190
- Třiosý akcelerometr Kistler 8290A25M5/4913217 (pro teploty -70 až +250°C)
- Třiosý akcelerometr 8763B1K0AB/2114674
- Proudová sonda ChauvinArnoux E3N
- 3x nábojový zesilovač Brüel&Kjaer 2647A

### Podmínky

- Místo: polobezodrazová komora VÚTS Liberec
- Teplota: 22,4 °C
- Relativní vlhkost: 31,2%
- Tlak: 982,5 mbar

### Výsledky měření hluku

Podobně jako v předchozím měření byly zpracovány výsledky hladiny hluku, viz tabulka 4. V následující tabulce 5 jsou zpracované frekvence špiček emise hluku a navíc vypsány impulzy svíčky.

Režim	Volnoběh		Rychloběh	
Bod	Hluk A	Hluk C	Hluk A	Hluk C
4	84,5 dB(A)	93,8 dB(C)	98,3 dB(A)	102,0 dB(C)
7	84,6 dB(A)	91,3 dB(C)	102,0 dB(A)	103,0 dB(C)

Tab. 4 Hladina hluku



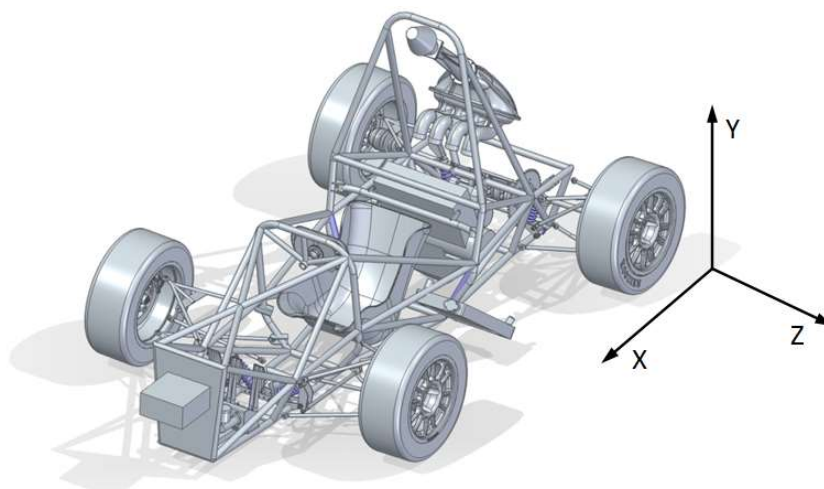
Režim	Volnoběh		pulz na svíčke	Rychloběh		pulz na svíčke
	4	7		4	7	
Frekvence	18 Hz	18 Hz		91 Hz	91 Hz	91 Hz
Násobky	0,5	0,5		1	1	1
Frekvence	34 Hz	34 Hz	34 Hz	137 Hz	137 Hz	
Násobky	1	1	1	1,5	1,5	
Frekvence	51 Hz	51 Hz		183 Hz	183 Hz	183 Hz
Násobky	1,5	1,5		2	2	2
Frekvence	67 Hz	67 Hz	67 Hz	275 Hz	275 Hz	275 Hz
Násobky	2	2	2	3	3	3
Frekvence	85 Hz	85 Hz		304 Hz	304 Hz	
Násobky	2,5	2,5		3,3	3,3	
Frekvence	101 Hz	101 Hz	101 Hz	364 Hz	369 Hz	366 Hz
Násobky	3	3	3	4	4	4
Frekvence	118 Hz	118 Hz		458 Hz	458 Hz	458 Hz
Násobky	3,5	3,5		5	5	5
Frekvence	137 Hz	137 Hz	134 Hz			
Násobky	4	4	4			

Tab. 5 Významné frekvence spektra hluku

Z výsledků měření hluku je zřejmé, že dominantní hluk je z motoru. Jedná se o frekvence shodné s rázy, které způsobují výbuchy v komoře válců 1 a 4 a jejich poloviční hodnoty frekvence, tedy válce 2 a 3. Z těchto frekvenčních spekter je vidět, že ostatní zdroje jsou mnohem menší a tak nejsou vidět.

### Výsledky měření vibrací

Dále byly vyhodnoceny výsledky měření vibrací. Na obrázku 13 je vidět souřadnicový systém. Vibrace prvních rázů jsou uvedeny v tabulce 6 a 7.



Obr. 13 Souřadný systém formule

Volnoběh					
Frekvence svíčky	34 Hz	67 Hz	101 Hz	134 Hz	
Pulz svíčky	1	2	3	4	
Akcelerometr motor	x	0,130 m/s <sup>2</sup>	0,168 m/s <sup>2</sup>	0,275 m/s <sup>2</sup>	1,080 m/s <sup>2</sup>
	y	0,109 m/s <sup>2</sup>	0,120 m/s <sup>2</sup>	1,140 m/s <sup>2</sup>	4,580 m/s <sup>2</sup>
	z	0,038 m/s <sup>2</sup>	0,024 m/s <sup>2</sup>	0,968 m/s <sup>2</sup>	1,550 m/s <sup>2</sup>
Akcelerometr rám	x	0,050 m/s <sup>2</sup>	0,114 m/s <sup>2</sup>	0,059 m/s <sup>2</sup>	0,992 m/s <sup>2</sup>
	y	0,052 m/s <sup>2</sup>	0,094 m/s <sup>2</sup>	0,375 m/s <sup>2</sup>	1,190 m/s <sup>2</sup>
	z	0,045 m/s <sup>2</sup>	0,078 m/s <sup>2</sup>	0,402 m/s <sup>2</sup>	0,870 m/s <sup>2</sup>

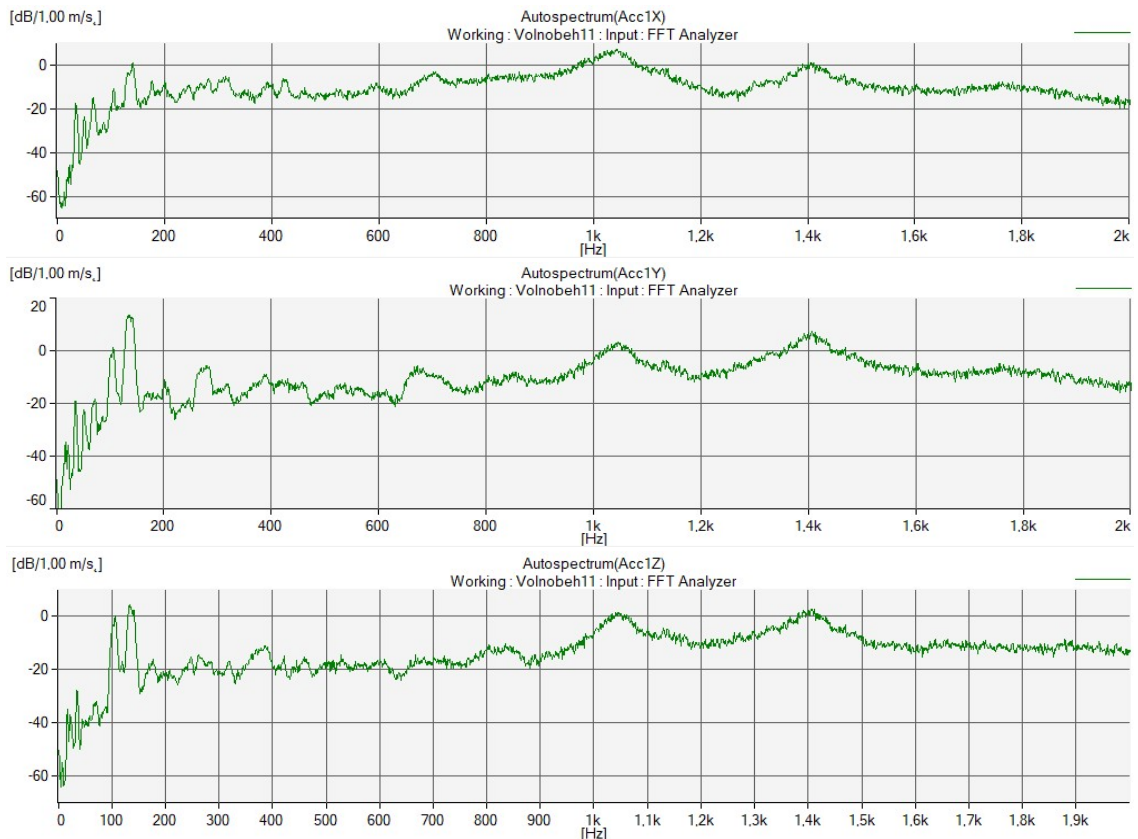
Tab. 6 Vibrace při volnoběhu

Rychloběh								
Frekvence svíčky	91 Hz	183 Hz	275 Hz	366 Hz	458 Hz	550 Hz	641 Hz	
Pulz svíčky	1	2	3	4	5	6	7	
Akcelerometr motor	x	2,66 m/s <sup>2</sup>	4,98 m/s <sup>2</sup>	5,10 m/s <sup>2</sup>	33,00 m/s <sup>2</sup>	5,94 m/s <sup>2</sup>	8,47 m/s <sup>2</sup>	7,34 m/s <sup>2</sup>
	y	4,02 m/s <sup>2</sup>	2,58 m/s <sup>2</sup>	9,36 m/s <sup>2</sup>	48,50 m/s <sup>2</sup>	1,67 m/s <sup>2</sup>	0,80 m/s <sup>2</sup>	4,77 m/s <sup>2</sup>
	z	2,56 m/s <sup>2</sup>	3,06 m/s <sup>2</sup>	7,59 m/s <sup>2</sup>	3,23 m/s <sup>2</sup>	1,47 m/s <sup>2</sup>	1,12 m/s <sup>2</sup>	4,86 m/s <sup>2</sup>
Akcelerometr rám	x	1,21 m/s <sup>2</sup>	1,66 m/s <sup>2</sup>	2,19 m/s <sup>2</sup>	11,40 m/s <sup>2</sup>	1,93 m/s <sup>2</sup>	4,10 m/s <sup>2</sup>	3,24 m/s <sup>2</sup>
	y	1,64 m/s <sup>2</sup>	0,80 m/s <sup>2</sup>	2,74 m/s <sup>2</sup>	5,14 m/s <sup>2</sup>	0,80 m/s <sup>2</sup>	3,24 m/s <sup>2</sup>	3,87 m/s <sup>2</sup>
	z	1,27 m/s <sup>2</sup>	4,70 m/s <sup>2</sup>	4,53 m/s <sup>2</sup>	1,31 m/s <sup>2</sup>	1,47 m/s <sup>2</sup>	2,87 m/s <sup>2</sup>	6,88 m/s <sup>2</sup>

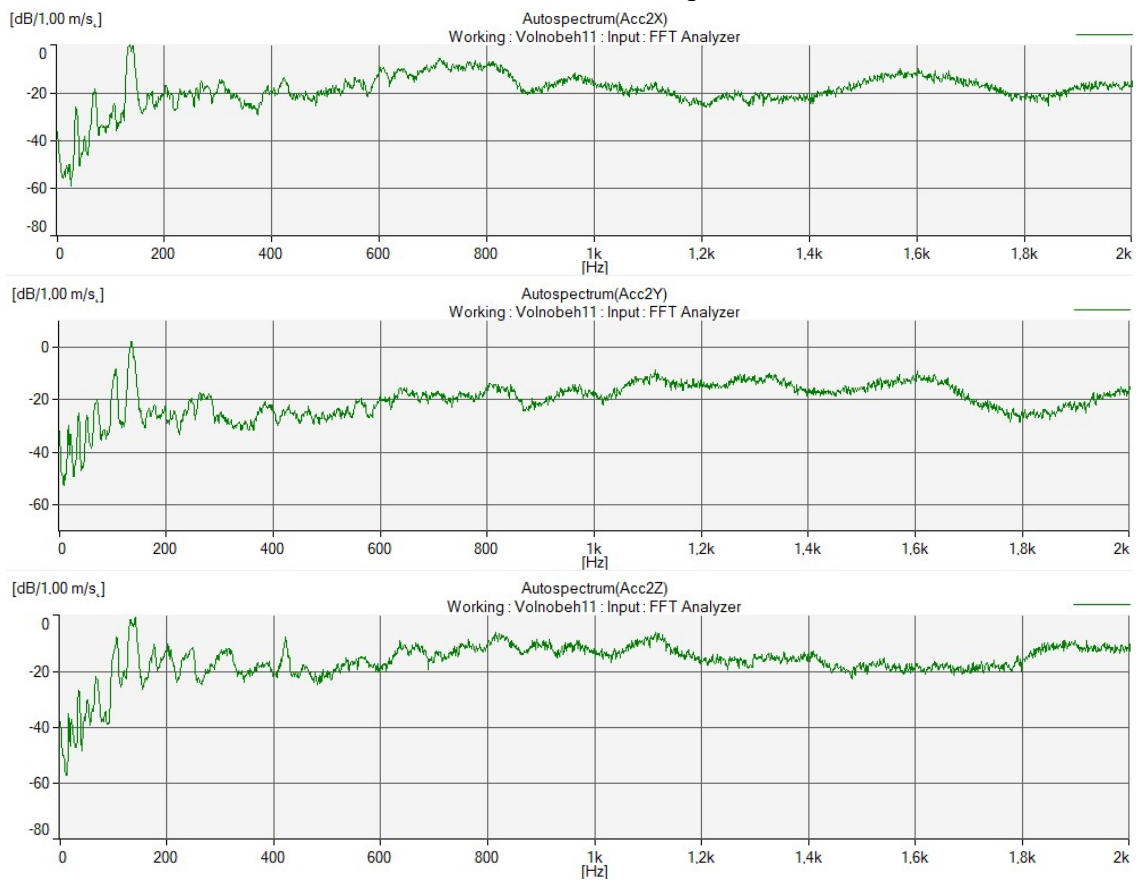
Tab. 7 Vibrace při rychloběhu

Z výsledků měření vibrací je zřejmé, že se do rámu přenáší jen část těchto kmitů. Dále je vidět že při určitých frekvencích jsou vibrace významně větší než u jiných. Dochází zde k nějaké rezonanci motoru (při rychloběhu v 366 Hz).

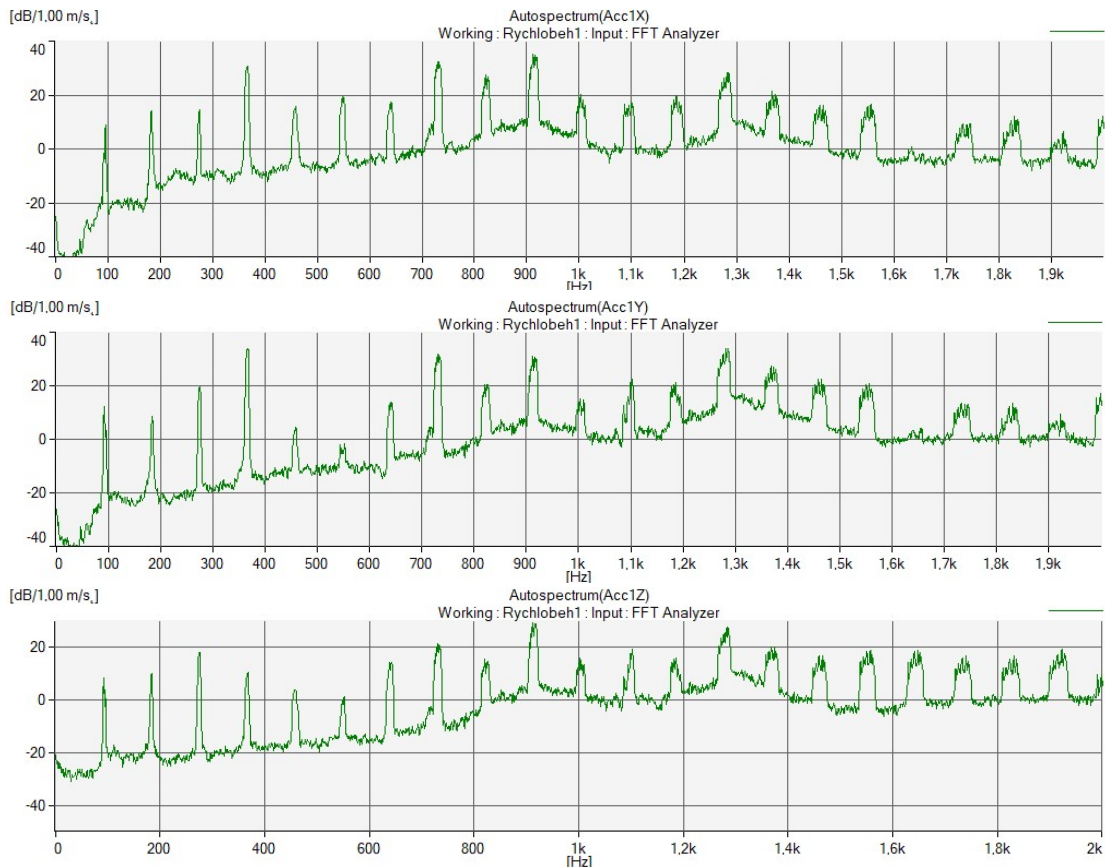
Celé spektrum vibrací je zaznamenáno v grafech. Vibrace na motoru při volnoběhu je vidět v grafu 2 a na rámu v grafu 3. Spektrum vibrací na motoru při rychloběžných otáčkách je vidět v grafu 4. Průběh vibrací na rámu při rychloběžných otáčkách je vidět v grafu 5.



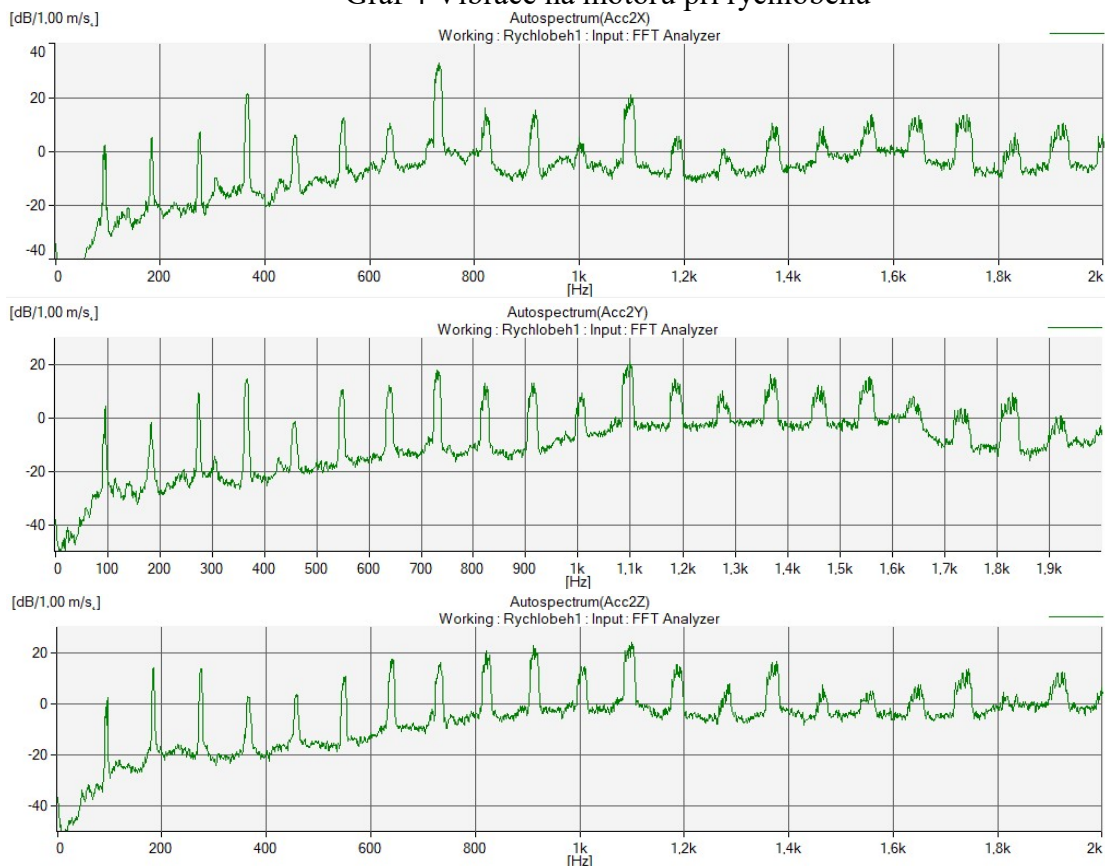
Graf 2 Vibrace na motoru při volnoběhu



Graf 3 Vibrace na rámu při volnoběhu



Graf 4 Vibrace na motoru při rychloběhu



Graf 5 Vibrace na rámu při rychloběhu

Z těchto spekter je vidět, že při volnoběhu vidíme základní harmonické funkce. Při rychloběhu jsou vidět i vyšší harmonické funkce.

#### 4.5 Měření pomocí simulátoru HATS

Měření akustického tlaku v místě pilota bylo provedeno pomocí zařízení HATS (head and torso simulator) B&K se dvěma mikrofony viz obr. 14. Zařízení je složené z modelu hlavy a části trupu. Simuluje vnímání emise hluku na člověka. Měření bylo provedeno v obou režimech motoru.



Obr. 14 Měření figurínou

##### Použité přístroje

- Multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0
- 2x kondenzátorový mikrofón Brüel&Kjaer 4190
- Simulátor hlavy a těla Brüel&Kjaer 4100

##### Podmínky

- Místo: polobezodrazová komora VÚTS Liberec
- Teplota: 23,3 °C
- Relativní vlhkost: 30,6 %
- Tlak: 986 mbar

## Výsledky

Vyhodnoceny byly základní hodnoty, které vnímá člověk v tabulce 8.

		hlasitost	síla kolísání	drsnost	ostrost	čas
		[sone]	[vacil]	[asper]	[acum]	[s]
Volnoběh	Mic L	123,394	0,361	1,140	1,399	19,750
	Mic R		0,387	1,229	1,480	
Rychloběh	Mic L	248,020	0,461	2,405	1,892	19,750
	Mic R		0,406	2,803	1,953	

Tab. 8 Vnímání a emise hluku

Síla kolísání udává stupeň vnímání zvuku, který ještě dokážeme uchem slyšet. Drsnost nám udává hodnotu, kterou už sluch nedokáže sledovat, protože jde o relativně rychlé časové změny zvukového signálu. Ostrost zvuku nám kvantitativně srovnává slovní charakteristiku barvy zvuku. Podrobně jsou tyto veličiny popsány v knize *Základy experimentální psychoakustiky* [3].

Nenašel jsem, že by někdo zjišťoval tyto veličiny u formule nebo u podobných zařízení. Proto bych se rád věnoval do budoucna této problematice.

## 5 Vyhodnocení měření

Výsledkem práce je identifikace zdrojů hluku, vibrací a návrh opatření pro snížení hluku a vibrací. Proto dále budou rozebrány jednotlivé předpokládané zdroje a jejich zhodnocení.

### **MOTOR**

Zdroj hluku, který se podle očekávání projevil jako nejdominantnější. Potvrzují to všechna měření. Zároveň jde i o zdroj vibrací.

### **VÝFUK**

Souvisí s hlukem, který vytváří motor. Je jasné, že neplní správně svou funkci a reprodukuje hluk motoru.

### **SÁNÍ**

Dosavadní konstrukce sání a naladění řídicí jednotky motoru nám způsobuje kolísání otáček ve volnoběhu, které se projevují pulzací sání. To má vliv na celkovou hladinu hluku formule. Dále se hluk od sání částečně objevuje při rychloběhu.

### **OSTATNÍ**

Dalšími zdroji hluku jsou zejména: převodovka, řetězový převod, diferenciál, pneumatiky. Jsou to zdroje, které se nijak neprojevují při statickém měření, ale jistě by se projevili při jízdě formule.

Ventilátor v chladícím okruhu je při hluku motoru zanedbatelný. Neukázal se při žádném měření.

## 6 Navrhované opatření

V této kapitole jsou shrnuta možná opatření na snížení hluku a vibrací. Některé budou snadno aplikovatelné na další generaci formule. Ostatní jsou na zvážení, jestli se využijí, nebo nebudou potřeba.

### Souhrn instrukcí pro snížení hluku:

- **LADĚNÍ MOTORU**  
Hlavní příčina zvýšeného hluku bylo kolísání otáček. Bylo by proto vhodné se tomuto efektu při ladění dalších formulí vyhnout.
- **VÝFUK**  
Konstrukce výfuku by měla na dalších vozech být efektivnější. Měl by se použít jediný efektivnější tlumič i změna vedení výfukového potrubí.
- **KAROSERIE**  
Na první formuli nebyl motor nijak krytovaný. Proto se nabízí možnost zakrytování motoru s použitím pohltivé pěny nebo jiného absorpčního materiálu. Je to doporučení, na které by došlo jako poslední možnost. Není nejvhodnější kvůli nabývání váhy formule.
- **SÁNÍ**  
Bylo by vhodné vyzkoušet více variant sání. Při rychloběhu se ukázalo, že sání vyzařuje hluk. Sice není nijak výrazný, ale při problémech za rychloběhu by mohlo pomoci odstranění tohoto hluku.

### Souhrn instrukcí pro snížení vibrací:

- **SILENTBLOK**  
Pro snížení vibrací by bylo vhodné využít pryžových silentbloků mezi motorem a rámem.
- **MOTOR**  
Druhou možností by bylo zabývat se konstrukcí motoru a odhalení, proč při určitých frekvencích dochází k výraznému zvýšení vibrací.



## 7 Závěr

Práce se zabývala zdroji vibrací a hluku. Hlavním cílem bylo odhalit zdroje a navrhnout opatření na snížení hluku a vibrací. Tato opatření jsou vypsána v předchozí kapitole. Některá budou snadno aplikovatelné na další generaci formule. Přesné zlepšení bude vidět při opětovném měření na další generaci.

Dále bylo odhaleno, že stávající motor při určitém režimu s takto nastavenou palivovou mapou v určitých frekvencích významně rezonuje. Bylo by vhodné se tomuto problému věnovat i u dalších generací. Ideálně se tomu vyhnout nebo se pokusit formuli provozovat co nejméně v tomto stavu, kvůli životnosti komponentů citlivých na vibrace.

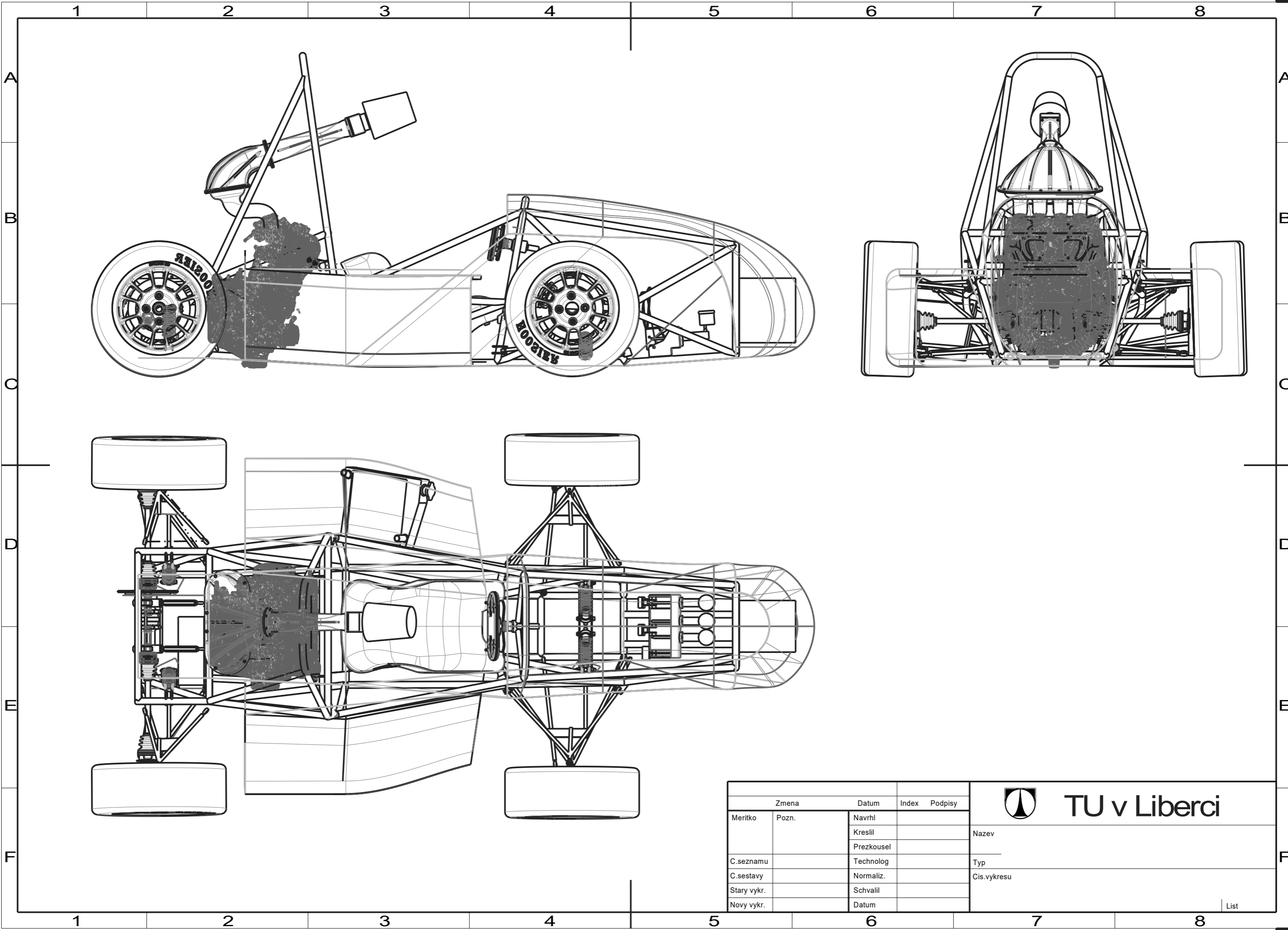
Na závěr byly změřeny psychoakustické hodnoty, které jsou zajímavé a dále porovnat jaký má hluk dopad na pilota při jízdě, zejména po delší době pobytu ve formuli.

## **Použitá literatura**

- [1] 2017-18 Formula SAE Rules [online]. Copyright © [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18-FSAE-Rules-091317.pdf>
- [2] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha 2000. ISBN 80-01-02246-3.
- [3] MELKA, Alois. Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 80-7331-043-0.

## Seznam příloh

Příloha 1	-	Pohledy formule	I
-----------	---	-----------------	---



Zmena		Datum	Index	Podpisy
Meritko	Pozn.	Navrhl		
		Kresil		
		Prezkousel		
C.seznamu		Technolog		
C.sestavy		Normaliz.		
Stary vykr.		Schvalil		
Novy vykr.		Datum		



**TU v Liberci**

Nazev \_\_\_\_\_  
 Typ \_\_\_\_\_  
 Cis.vykresu \_\_\_\_\_