

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **Diplomová práce**

**Měření hluku emitovaného trakčními kolejovými vozidly**

**Vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**

**Katedra technologií a měření**

**Autor: Jiří Čepák**

**Plzeň 2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří ČEPÁK**  
Osobní číslo: **E10N0020P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Měření hluku emitovaného trakčními kolejovými vozidly**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Provedte analýzu možných zdrojů hluku trakčních vozidel.
2. Pro zadaný měřicí systém sestavte program pro sběr dat a jejich následnou analýzu.
3. Provedte měření pro konkrétní trakční vozidlo.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

**Anotace**

Diplomová práce, zadaná společností ŠKODA TRANSPORTATION a.s., se zabývá měřením hluku trakčních kolejových vozidel, jeho analýzou a vyhodnocením.

**Abstract**

Measurement of traction rolling stock noise

Master thesis, assigned from a company SKODA TRANSPORTATION a.s., focus on measurement of noise emitted by traction rolling stock, analysis and evaluation.

**Klíčová slova**

hluk, měření hluku, Matlab, frekvenční analýza

**Key words**

noise, measurement of noise, Matlab, frequency analysis

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 10. 5. 2012

Jiří Čepák

.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichu Turečkovi, PhD. za cenné a profesionální rady a připomínky a metodické vedení práce, dále za zapůjčení vybavení na měření a za čas, který mi věnoval. Dále děkuji kolegovi Bc. Ladislavu Zuzjakovi za převoz měřicí techniky a Ing. Martinu Sýkorovi za prvotní konzultace. Také děkuji konzultantovi diplomové práce Ing. Petru Cuchému za organizaci měření, dalším kolegům ve ŠKODĚ TRANSPORTATION a.s. Ing. Filipu Brašnovi za pomoc při měření a Ing. Jiřímu Lehečkovi za poskytnutí firemní dokumentace.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>2</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY A TERMÍNY</b> .....	<b>3</b>
1.1 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU $L_p$ .....	3
1.2 FREKVENČNÍ VÁHOVÉ KŘIVKY, VÁŽENÁ HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU A .....	3
1.3 TŘETINOOKTÁVOVÁ PÁSMA .....	5
<b>2 ANALÝZA MOŽNÝCH ZDROJŮ VNĚJŠÍHO HLUKU TRAKČNÍHO KOLEJOVÉHO VOZIDLA</b> .....	<b>7</b>
2.1 STYK KOLO KOLEJNICE .....	7
2.2 POHON VOZIDLA .....	8
2.3 HLUK OD ELEKTRO-VÝZBROJE .....	8
2.4 AERODYNAMICKÝ HLUK JEDOUCÍHO VOZIDLA .....	8
2.5 HLUK OD STYKU SBĚRAČE PROUDU (PANTOGRAFU) S TRAKČNÍM VEDENÍM.....	8
<b>3 POPIS MĚŘÍCÍHO ŘETĚZCE A MĚŘÍCÍ METODY</b> .....	<b>9</b>
<b>4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ HLUKU TRAKČNÍHO KOLEJOVÉHO VOZIDLA</b> .....	<b>12</b>
4.1 MĚŘENÉ VOZIDLO - TRAMVAJ ŠKODA 15T FORCITY PRAHA .....	12
4.2 MÍSTO MĚŘENÍ A POPIS KOLEJE .....	13
4.3 DATUM MĚŘENÍ A SPECIFIKACE PROSTŘEDÍ .....	14
4.4 PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ .....	14
4.5 ROZMÍSTĚNÍ MIKROFONŮ .....	15
4.5.1 <i>Měření v celé výšce tramvaje</i> .....	15
4.5.2 <i>Měření v oblasti podvozků tramvaje</i> .....	16
4.6 REŽIMY JÍZD .....	18
4.7 HLUKOVÉ POZADÍ.....	18
<b>5 PROGRAM PRO ANALÝZU NAMĚŘENÝCH DAT</b> .....	<b>19</b>
5.1 NAČTENÍ DAT .....	19
5.2 ROZBOR SOUBORU OPTICKÉ ZÁVORY .....	19
5.3 KALIBRACE ZÁZNAMŮ .....	21
5.4 FURIEROVA ANALÝZA .....	22
5.5 PŘEKRÝVÁNÍ BLOKŮ DAT K ANALÝZE (OVERLAP).....	23
5.6 VÁHOVÁ OKNA .....	24
5.7 BĚH PROGRAMU .....	27

<b>6 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>33</b>
6.1 VÁŽENÁ HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU V CELÉM SPEKTRU PRO RYCHLOSTI 5, 10 A 20 KM/H V NORMÁLNÍM REŽIMU .....	33
6.2 ROZBOR HLUKU OD PODVOZKŮ .....	35
6.3 ROZBOR HLUKU NA STŘEŠE .....	36
6.4 ANALÝZA SIMULOVANÝCH PORUCH .....	39
6.4.1 Vypnutý 2. podvozek .....	39
6.4.2 Vypnutá ventilace .....	40
6.5 HODNOCENÍ ZÁZNAMŮ PŘI MĚŘENÍ V OBLASTI PODVOZKŮ .....	42
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY</b> .....	<b>44</b>
<b>ZDROJE OBRÁZKŮ</b> .....	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>45</b>



## Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na hygienické prostředí. A jelikož hluk patří mezi hygienické znečišťovatele ve značné míře také, je důležité, aby jeho emise byly kontrolovány a omezovány. Proto existuje několik evropských i českých norem a předpisů, které limitují míru expozice hluku v pracovním prostředí, ve městech apod. Vzhledem k tomu, že trakční kolejová vozidla ve městech jezdí, tramvaje pak výhradně, jsou výrobci nuceni emitovaný hluk co nejvíce snížit.

Aby emitovaný hluk bylo možné omezit, musí být známo, kde přibližně vzniká a jakou má frekvenci. Na základě těchto znalostí může být např. použit materiál, který hluk utlumí, nebo může být upraveno konstrukční řešení hlučného článku a tím jej ztišit.

V této práci bude proveden pokus o lokalizaci hlučných částí jedoucí tramvaje. Výsledkem by měla být metoda a program pro analýzu dat získaných měřícím řetězcem.

Téma této diplomové práce vypsali plzeňský výrobce kolejových vozidel, ŠKODA TRANSPORTATION a.s., který vyrábí např. lokomotivy pro České dráhy, a. s. a Železničnou společnost Slovensko, a. s. nebo tramvaje pro Dopravní podnik hl.m. Prahy ,akciová společnost, pro lotyšský Rigas Satiskme nebo pro maďarský MVK Rt.

## Seznam symbolů a zkratk

15T	typové označení tramvaje Škoda 15T ForCity
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
RMS	střední kvadratická hodnota, efektivní hodnota
ŠTRN	ŠKODA TRANSPORTATION a.s.
wav	formát zvukového souboru

# 1 Základní pojmy a termíny

V této kapitole jsou zmíněny a vysvětleny některé základní pojmy a termíny používané v akustice.

## 1.1 Hladina akustického tlaku $L_p$

Hladina akustického tlaku je daná vztahem [1]:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{p(t)}{p_0} \right) [dB], \quad (1)$$

kde

$L_p$  – hladina akustického tlaku v dB

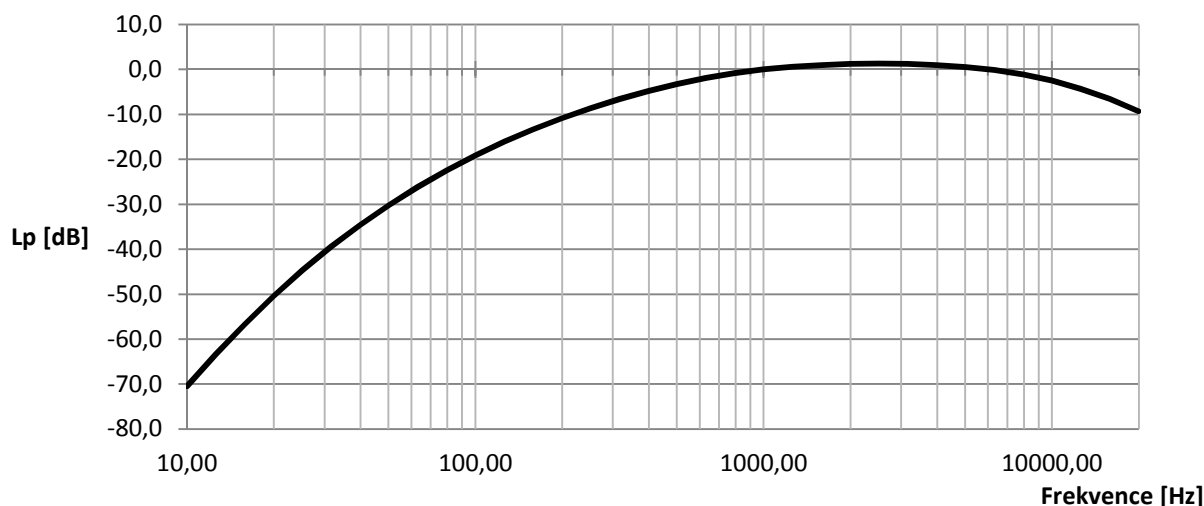
$p(t)$  – střední kvadratická hodnota akustického tlaku v Pa

$p_0$  – referenční akustický tlak;  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

Jedná se o přepočítání akustického tlaku v jednotkách Pascal, vztaženého na referenční akustický tlak, do logaritmické stupnice v decibelech.

## 1.2 Frekvenční váhové křivky, vážená hladina akustického tlaku A

Lidské slyšení je méně citlivé při velmi nízkých a velmi vysokých frekvencích, aby se toto zohlednilo při měření zvuku, používají se váhové filtry. Nejčastěji se používá A-vážení, které přibližně odpovídá reakci lidského ucha. Jednotka akustického tlaku po A-vážení se značí dB(A). Obrázek Obr. 1.1 ukazuje, jak se tlumí hladina akustického tlaku na různých frekvencích.



Obr. 1.1: Váhová křivka A-vážení

Vážená hladina akustického tlaku A ( $L_{pA}$ ) je hladina akustického tlaku získaná při použití kmitočtového vážení A a je daná vztahem (2) [1]:

$$L_{pA} = 10 \log \left( \frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 [dB(A)], \quad (2)$$

kde

$L_{pA}$  – hladina akustického tlaku A v dB(A)

$p(t)$  – střední kvadratická hodnota akustického tlaku A v Pa

$p_0$  – referenční akustický tlak;  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

Váhová křivka A realizovaná digitálně je daná následujícím předpisem [2]:

$$A(f) = 20 \log \left( \frac{R_A(f)}{R_A(1000)} \right) [dB], \text{ kde} \quad (3)$$

$$R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20,6^2)(f^2 + 12200^2) \sqrt{(f^2 + 107,7^2)(f^2 + 737,9^2)}}.$$

V tabulce Tab. 1.1 jsou uvedeny nominální frekvence, které jsou specifikovány normou ČSN EN ISO 266. Vypočtené frekvence jsou určeny jako první čtyři platné číslice podle vztahu  $1000 \cdot 10^{0,1 \cdot n}$ , kde  $n$  jsou celá čísla od -20 do 13. Hodnota váhové křivky je pak spočítaná podle vztahu (3). [2]

Tab. 1.1: Hodnoty korekcí hladiny při A-váhování [2]

nominální frekvence [Hz]	n	vypočtené frekvence [Hz]	váhová křivka A (f) [dB]	nominální frekvence [Hz]	n	vypočtené frekvence [Hz]	váhová křivka A (f) [dB]
10	-20	10,00	-70,4	500	-3	501,2	-3,2
12,5	-19	12,59	-63,4	630	-2	631,0	-1,9
16	-18	15,85	-56,7	800	-1	794,3	-0,8
20	-17	19,95	-50,5	1000	0	1000	0,0
25	-16	25,12	-44,7	1250	1	1259	0,6
31,5	-15	31,62	-39,4	1600	2	1585	1,0
40	-14	39,81	-34,6	2000	3	1995	1,2
50	-13	50,12	-30,2	2500	4	2512	1,3
63	-12	63,10	-26,2	3150	5	3162	1,2
80	-11	79,43	-22,5	4000	6	3981	1,0
100	-10	100,0	-19,1	5000	7	5012	0,5
125	-9	125,9	-16,1	6300	8	6310	-0,1
160	-8	158,5	-13,4	8000	9	7943	-1,1
200	-7	199,5	-10,9	10000	10	10000	-2,5
250	-6	251,2	-8,6	12500	11	12590	-4,3
315	-5	316,2	-6,6	16000	12	15850	-6,6
400	-4	398,1	-4,8	20000	13	19950	-9,3

### 1.3 Třetinooktávová pásma

Třetinooktávové pásmo je charakterizováno jeho střední frekvencí a dolní a horní mezní frekvencí. Celkový akustický výkon v daném pásmu, daném střední frekvencí, je součet akustických výkonů jednotlivých frekvenčních složek vymezených mezními frekvencemi. Střední frekvence třetinooktávových pásem a jejich mezní frekvence je možno vidět v tabulce Tab. 1.2. V akustickém rozsahu 20 Hz – 20 kHz je těchto pásem 30.

Tab. 1.2: Třetinooktávová pásma (hodnoty jsou v Hz) [2]

Střední frekvence třetinooktávového pásma	Mezní frekvence		Střední frekvence třetinooktávového pásma	Mezní frekvence	
	dolní	horní		dolní	horní
25	22	28	800	707	880
31,5	28	35	1000	880	1130
40	35	44	1250	1130	1414
50	44	57	1600	1414	1760
63	57	71	2000	1760	2250
80	71	88	2500	2250	2825
100	88	113	3150	2825	3530
125	113	141	4000	3530	4400
160	141	176	5000	4400	5650
200	176	225	6300	5650	7070
250	225	283	8000	7070	8800
315	283	353	10000	8800	11300
400	353	440	12500	11300	14140
500	440	565	16000	14140	17600
630	565	707	20000	17600	22500

## 2 Analýza možných zdrojů vnějšího hluku trakčního kolejového vozidla

V této kapitole jsou popsány možné zdroje vnějšího hluku jedoucího trakčního kolejového vozidla. [3]

### 2.1 Styk kolo kolejnice

Hluk, způsobený stykem kola kolejového vozidla s kolejnicí, je značně závislý na rychlosti jízdy, nerovnostech kolejnice, nerovnostech a opotřebeních kol vozidla a obsazenosti vozidla. S rostoucí rychlostí a hmotností vozidla danou obsazeností vozidla tento hluk roste, protože se nerovnosti více projeví. Měření nerovnosti kolejnic je nad rámec této práce, a proto zde není řešeno. Podrobně se jím například ve své příloze A zabývá norma ČSN EN ISO 3095:2006 pro Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly.

Hluk způsobený stykem kola s kolejnicí je jednak přímo vyzařován do okolí, jednak se přenáší do celého vozidla, a tím se celé vozidlo stává velmi účinným zdrojem hluku.

Pro snížení vlivu tohoto hluku jsou zapotřebí aktivní protihluková opatření jako například technické úpravy na železniční dopravní cestě. Takovým opatřením může být pružné upevnění kolejnic, svařené kolejnice, kolejnicové absorbéry hluku nebo podpražcové podložky. Dále průběžné údržby spojené s broušením kolejnic a odstraňováním vzniklých vad. [3]

Dalším aktivním protihlukovým opatřením jsou tramvajová kola, jejichž obruč je od náboje oddělena tlumící pryžovou vložkou.

Za pasivní protihlukové opatření lze považovat různé kryty s pohltivým materiálem (např. QUASH).

## 2.2 Pohon vozidla

Hluk od elektrického pohonu vozidla je způsobován především valením ložisek trakčních motorů, „elektrickým“ hlukem motorů, hlukem ventilátoru chlazení vzduchem chlazených trakčních motorů a hlukem převodovky (ložiska, záběr zubů).

U tramvaje typu 15T jsou motory chlazeny kapalinou a kolo je s motorem spojeno přes zubovou spojku, tedy bez převodovky. Tím je tento hluk významně omezen. Motory jsou řízeny trakčním měničem a frekvence spínání měniče může v motoru generovat hluk tónového charakteru, např. pískání.

## 2.3 Hluk od elektro-výzbroje

Elektro-výzbrojí se rozumí trakční měniče, chlazení trakční výzbroje, klimatizace nebo ventilace interiéru, pomocné pohony, transformátory atd. Elektro-výzbroj může způsobovat jednak „elektrický“ hluk většinou tónového charakteru, jednak hluk od jejich chlazení.

Elektro-výzbroj kolejového vozidla může být umístěna kdekoli uvnitř i vně vozidla, ale vzhledem k tomu, že tramvaj typu 15T je 100% nízkopodlažní, je většina elektro-výzbroje umístěna na střeše.

## 2.4 Aerodynamický hluk jedoucího vozidla

Tento zdroj hluku je také závislý na rychlosti jízdy kolejového vozidla a je způsoben prouděním vzduchu kolem jedoucího vozidla. Podle některých zdrojů se tento hluk začne významně projevovat až při rychlostech 200 km/h (např. vysokorychlostní vlaky). U tramvajových vozidel se ale vzhledem k nízkým rychlostem projevuje velmi málo.

## 2.5 Hluk od styku sběrače proudu (pantografu) s trakčním vedením

Hluk vzniká třením pantografu o trakční vedení a je opět závislý na rychlosti jízdy kolejového vozidla. U tramvajových vozidel se téměř neprojevuje.

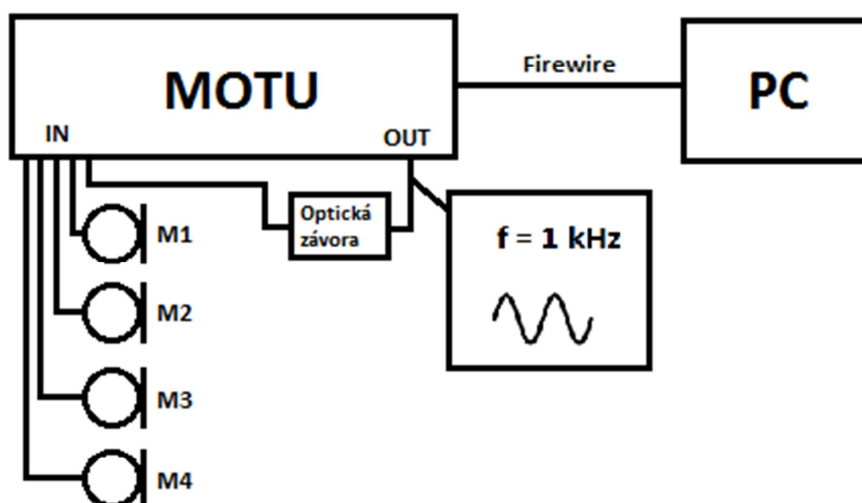


### 3 Popis měřicího řetězce a měřicí metody

Metody měření hluku, popsané normami (např. ČSN EN ISO 3095:2006) a předpisy (např. TSI), jsou určeny pro typové zkoušky, které jsou určeny k prokázání plnění legislativních požadavků. Předpisy se ale neustále zpřísňují, a proto je nutné používat metody měření pro nalezení největších zdrojů hluku, případně ověření vlivu konstrukčních úprav nebo variantních řešení protihlukových úprav.

Měřicí metoda, navržená a realizovaná v této práci, je určena pro analýzu zdrojů hluku na jedoucím trakčním vozidle. Metoda slouží k výzkumným a vývojovým účelům.

Celý měřicí řetězec je znázorněn na blokovém schématu na obrázku Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení měřicího řetězce

Základem je zvuková karta MOTU 896HD (v blokovém schématu jako MOTU). Karta disponuje osmi 24-bitovými výstupy, osmi 24-bitovými vstupy a mnoha dalšími kanály, jak je vidět na obrázku Obr. 3.2. Zvuková karta je připojena pomocí Firewire k počítači PC.



Obr. 3.2: Přední a zadní panel zvukové karty MOTU 896HD [13]

Do vstupů zvukové karty jsou připojeny 4 mikrofony M1 až M4 pomocí konektorů XLR viz Obr. 3.3.



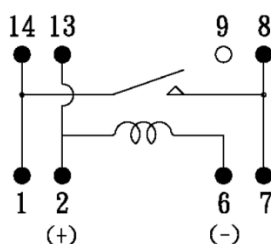
Obr. 3.3: XLR konektory [14]

Mikrofony se umísťují rovnoměrně do svislé řady do výšek, kde má být hluk analyzován, a pomocí zvukové karty jsou nahrány do PC čtyři zvukové záznamy wav. Každému mikrofonu odpovídá jeden záznam. Začátek a konec vozidla při průjezdu je indikován optickou závorou umístěnou na úrovni mikrofonů. Na PC je puštěn zvukový záznam (např. 1 kHz sinus = pískání) do výstupu zvukové karty, který je připojen ke vstupu přes spínací člen. Vstupující signál je nahráván jako pátý zvukový záznam a úroveň nahraného signálu indikuje přítomnost tramvaje na úrovni mikrofonů.

Jako spínací člen posloužila optická závara od firmy Pepperl+Fuchs (Retroreflective sensor RL28-55-LAS/47/82b/105). Jedná se o laserový paprsek, který je odrazovou ploškou vracen zpět do zařízení, kde je snímán. Pokud není paprsek přerušen, na výstupních svorkách je napětí, kterým je závara napájena. Zde záleží, v jaké konfiguraci optická závara pracuje. Může být zapojena tak, že je napětí na svorkách při přerušeném paprsku. Toto je popsáno v datovém listu. Napájecí napětí závor

může být podle datového listu 10 až 30 V stejnosměrných. V tomto měřicím řetězci byla použita autobaterie s napětím 12 V.

Aby bylo možné spínat signál optickou závorou, bylo využito spínací relé se stejnosměrnou cívkou od firmy COSMO Electronics Corporation s označením D1A121000, které při přítomnosti napětí na svorkách 2 (+) a 6 (-) svorky 1 a 7 propojí. Ke svorkám 2 a 6 tedy byl připojen výstup optické závory a ke svorkám 1 a 7 kabel propojující vstup s výstupem na zvukové kartě.



Obr. 3.4: Vnitřní zapojení spínacího relé D1A121000 (převzato z [4])

Pokud tedy vozidlo nebylo na úrovni mikrofonů a optické závory, relé bylo napájeno a signál byl přenášen z výstupu na vstup. Pokud tramvaj projížděla kolem mikrofonů, paprsek byl přerušen, relé nebylo napájeno a signál byl přerušen. V pátém nahraném wav souboru představujícím optickou závoru pak nulová úroveň nahraného signálu znamená průjezd tramvaje.

Kalibrace měřicího řetězce je provedena nahráním záznamů z každého mikrofonu, do kterého je pouštěn zvuk z kalibrátoru. Byl použit kalibrátor Robotron 05000 s kalibrační hladinou 94,1 dB.

K nahrávání zvukových souborů wav byl použit software Logic, který spouští nahrávání všech pěti kanálů synchronně.

## 4 Praktické měření hluku trakčního kolejového vozidla

### 4.1 Měřené vozidlo - tramvaj Škoda 15T ForCity Praha

Trakční kolejové vozidlo, které bylo prakticky měřeno, je tramvaj typu 15T ForCity Praha (dále jen tramvaj) s evidenčním číslem 9243. Jedná se o tříčlánkovou plně nízkopodlažní jednosměrnou tramvaj vyvinutou ve společnosti ŠKODA TRANSPORTATION, a.s. (dále jen ŠTRN) a provozovanou Dopravním podnikem hlavního města Prahy. Tato tramvaj je navíc, na rozdíl od ostatních vyráběných, vybavena klimatizací prostoru pro cestující, v sériových tramvajích je prostor pro cestující pouze ventilován.

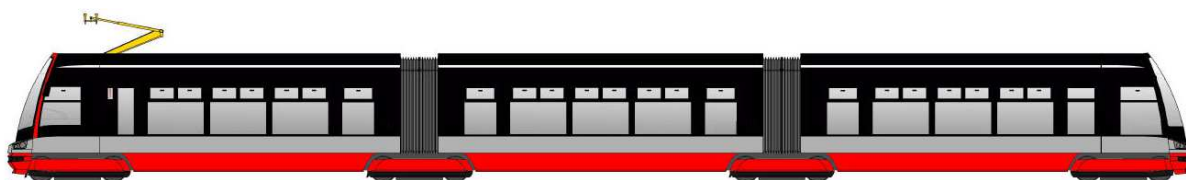
Rozměry vozidla:

výška: 3,6 m bez pantografu

šířka: 2,46 m

délka: 31,4 m bez spřáhel

Maximální rychlost vozidla: 60 km/h



Obr. 4.1: Model tramvaje 15T ForCity Praha – levý bok [5]

Tramvaj má čtyři podvozky, jak je vidět na obrázku Obr. 4.1. Na každém podvozku jsou čtyři nezávislá kola, přičemž každé kolo je samostatně přímo bez převodovky poháněno synchronním trakčním motorem s permanentními magnety. Motory jsou řízené měniči s IGBT tranzistory, které jsou umístěné v kontejnerech na střeše. [6] [7]

## 4.2 Místo měření a popis koleje

Měření bylo prováděno na zkušební koleji ve společnosti ŠTRN, která je vybudována podél zdi podél Borské ulice v Plzni. Trať je dlouhá přibližně 700 m. Je tvořena šterkovým podkladem s dřevěnými pražci a kolejnice jsou stykované (nesvařené). Je nutno uvést, že tato kolej není pro měření hluku příliš vhodná, protože dochází k rázům právě od těchto nesvařených kolejnic.

Červená čára na mapě značí trať, modrá šipka přibližné místo měření.



Obr. 4.2: Zkušební kolej ve společnosti ŠTRN [8]

Tramvaj byla orientována předním čelem k bodu B na obrázku Obr. 4.2. Vzhledem k této orientaci a umístění zkušební koleje podél zdi, byla tramvaj měřena ze strany jejího levého boku, to je strana bez dveří (viz Obr. 4.1).

### 4.3 Datum měření a specifikace prostředí

Datum a čas měření: 1. 3. 2012 od 20:15 do 22:15

Tlak vzduchu: 982,4 hPa

Teplota: 5,2 °C

Relativní vlhkost: 90,6 %

Rychlost větru: 0,15 m/s

### 4.4 Přístroje a zařízení použité při měření

V následujících tabulkách jsou uvedeny jednotlivé přístroje rozdělené do skupin, podle použití.

Tab. 4.1: Použité přístroje a zařízení pro měření prostředí

Název přístroje	Typ	Výrobce	Evidenční číslo	Datum posledního ověření
Digitální teploměr, tlakoměr a vlhkoměr	Commeter D4141	COMET SYSTEM	VL16-24/1	9. 3. 2010
Anemometr (pro měření rychlosti větru)	435 vc	Testo	VL16-18/1	27. 1. 2012

Tab. 4.2: Použité přístroje a zařízení pro měření hluku

Název přístroje	Typ	Výrobce
Zvuková karta	896HD	MOTU
2x měřící mikrofon	M4260	NTI Audio
2x měřící mikrofon	M2210	NTI Audio
4x ochrana proti větru	do rychlosti větru 5 m/s	Brüel & Kjær
Kalibrátor (94,1 dB)	05000	Robotron

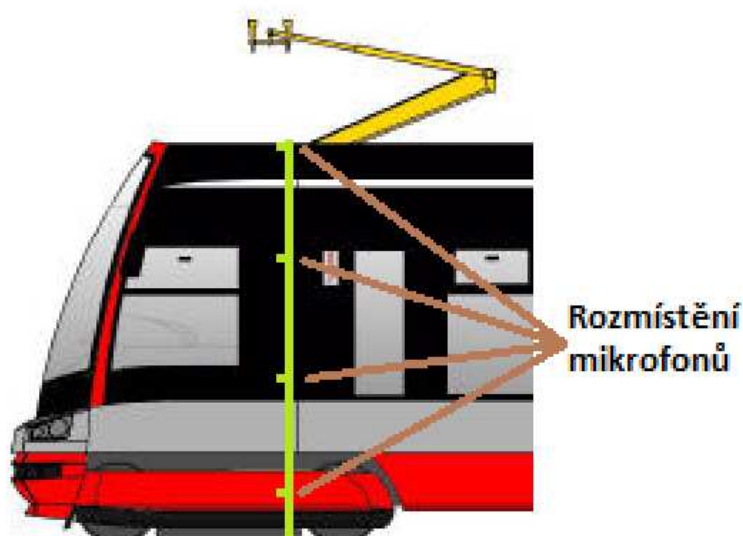
Tab. 4.3: Ostatní použité přístroje a zařízení

Název přístroje	Typ	Výrobce
Notebook s FireWire kartou	-	Asus
Svinovací metr	5 m	-
Stojan na mikrofony	-	-
5x kabel s XLR konektory	pro symetrické napájení	-
Optická závora	RL28-55-LAS/47/82b/105	PEPPERL+FUCHS

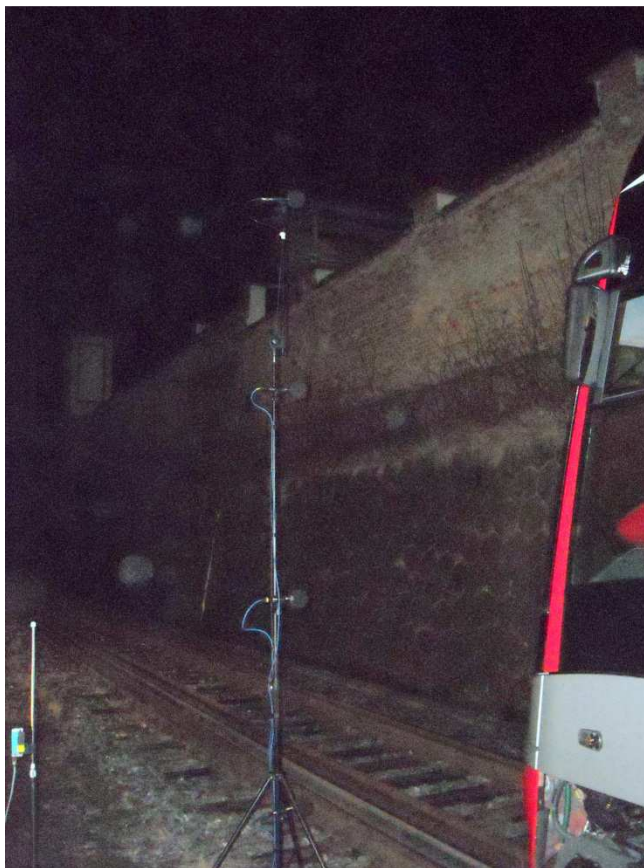
## 4.5 Rozmístění mikrofonů

### 4.5.1 Měření v celé výšce tramvaje

Mikrofony byly rozmístěny podle obrázku Obr. 4.3 a,b. Spodní mikrofon byl ve výšce 0,4 m nad temenem kolejnice a mezi jednotlivými mikrofony byla vzdálenost 1 m. V nahraných záznamech odpovídá horní mikrofon ve výšce 3,4 m záznamu č. 1 (např. p6-01.wav), mikrofon ve výšce 2,4 m záznamu č. 2 (např. p6-02.wav), mikrofon ve výšce 1,4 m záznamu č. 3 (např. p6-03.wav) a spodní mikrofon záznamu č. 4 (např. p6-04.wav), přičemž p6 je označení průjezdu. Mikrofony na stojanu byly ve vzdálenosti 0,5 m od boku tramvaje.



Obr. 4.3a: Rozmístění mikrofonů při měření v celé výšce tramvaje - model

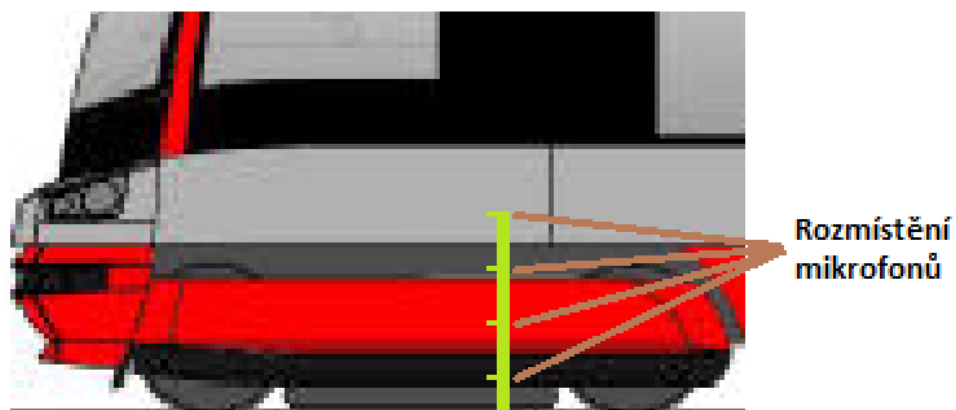


Obr. 4.3b: Rozmístění mikrofonů při měření v celé výšce tramvaje – foto

#### 4.5.2 Měření v oblasti podvozků tramvaje

Další variantou bylo měření hluku v prostoru podvozků, jak ukazuje obrázek Obr. 4.4 a,b. Spodní mikrofon byl ve výšce 15 cm nad temenem kolejnice a v nahraných záznamech odpovídá záznamu 2 (např. u3-02.wav). Mezi dalšími mikrofony byly vzdálenosti 25 cm, tedy další mikrofon byl ve výšce 40 cm a odpovídá záznamu 4 (např. u3-04.wav). Mikrofon ve výšce 65 cm odpovídá záznamu 3 (např. u3-03.wav) a horní mikrofon ve výšce 90 cm odpovídá záznamu 1 (např. u3-01.wav). Přičemž u3 značí číslo průjezdu. Mikrofony zůstaly ve stejné vzdálenosti, tedy 0,5 m od boku tramvaje.





Obr. 4.4a: Rozmístění mikrofonů při měření v oblasti podvozků – model



Obr. 4.4b: Rozmístění mikrofonů při měření v oblasti podvozků – foto

## 4.6 Režimy jízdy

Měření bylo prováděno při čtyřech různých rychlostech (5 km/h, 10 km/h, 20 km/h a 30 km/h). Pro každou rychlost bylo provedeno více měření. Tramvaj nebyla vybavena zákryty podvozků s tlumícím materiálem a dolním čelním krytem. Obsazena byla jen obsluhou, tedy na každém stanovišti jeden řidič.

Při měření v celé výšce tramvaje bylo měřeno při všech čtyřech zmíněných rychlostech a ve třech režimech:

- a) se zapnutou ventilací prostoru pro cestující na 100%
- b) s vypnutou ventilací prostoru pro cestující
- c) s vypnutým druhým podvozkem

Při měření v oblasti podvozků bylo měřeno pouze v režimu se zapnutou ventilací prostoru pro cestující a také při všech čtyřech zmíněných rychlostech.

Kompletní přehled označení průjezdů a jejich režimů je uveden v příloze A.

## 4.7 Hlukové pozadí

Hlukové pozadí bylo zaznamenáno pomocí všech čtyř mikrofónů po dobu několika desítek vteřin. Tyto záznamy jsou potom v aplikaci vyhodnoceny podobně jako záznamy jednotlivých průjezdů a hluk pozadí je pro konkrétní výsledky uveden na obrazovce.

## 5 Program pro analýzu naměřených dat

Naměřená data jsou uložena ve formátu wav s názvy, jak je uvedeno v odstavci 4.5 a v příloze A. Jejich analýza je provedena v programovém nástroji Matlab, který umožňuje přímé načtení dat z nahraných wav souborů, jejich vyhodnocení a následné grafické zobrazení výsledků.

### 5.1 Načtení dat

Soubory wav se do prostředí Matlab importují pomocí příkazu `[data,fs,nbit]=wavread('cesta/název_souboru')`. Do *data* jsou pak uložena data obsažená ve wav souboru, do *fs* vzorkovací frekvence (sampling frequency) a *nbit* určuje počet bitů na vzorek. V tomto případě bylo nahráváno vzorkovací frekvencí  $fs=44,1$  kHz a počtu bitů na vzorek  $nbit=16$ .

### 5.2 Rozbor souboru optické závory

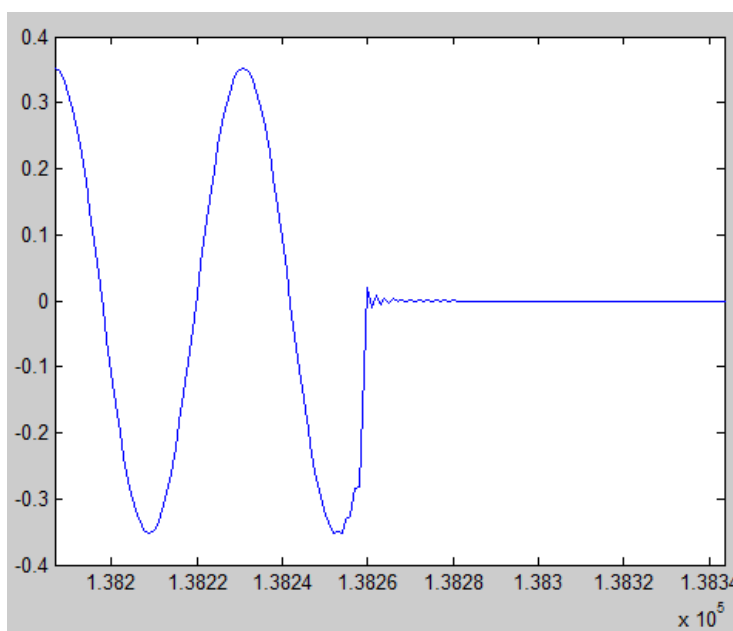
Jak bylo uvedeno v kapitole 3, zvukový soubor, indikující průjezd tramvaje, obsahuje nulovou úroveň signálu v době průjezdu tramvaje a nenulovou úroveň signálu o frekvenci 1 kHz v době, kdy jsou záznamy nahrávány, ale tramvaj není na úrovni mikrofonů. Amplituda signálu je libovolná, protože záleží na nastavení hlasitosti přehrávání.

Na obrázku Obr. 5.1 je vidět sinusový průběh 1 kHz, kde na ose x je číslo vzorku, a od čísla vzorku zhruba  $1,3826 \times 10^5$  má signál úroveň nula. Toto místo je nutno v záznamu najít a zaznamenat pozici začátku tramvaje. Vzhledem k tomu, že po přerušení přenosu signálu z výstupu na vstup dochází ještě chvíli k zákmitům, je k nalezení začátku tramvaje přistoupeno následovně:

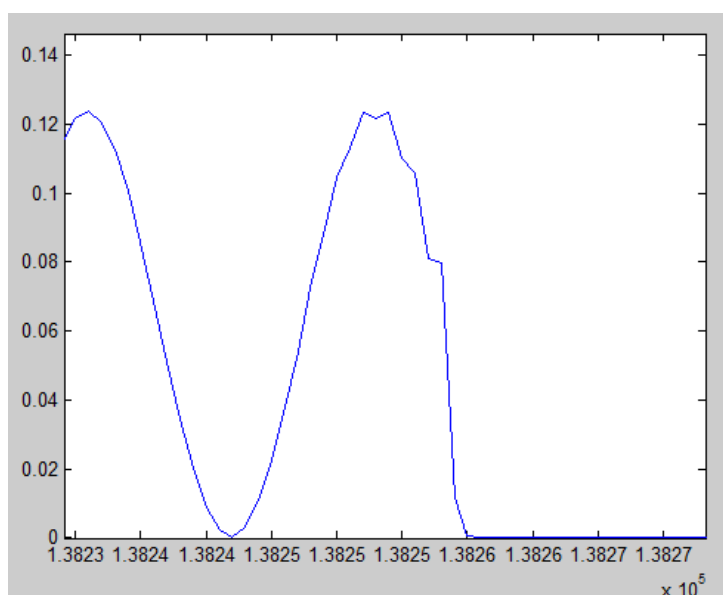
Průběh signálu závory je umocněn na druhou a průběh pak vypadá, jak je vidět na obrázku Obr. 5.2. Hodnoty se pohybují v intervalu  $\langle 0 ; 0,12 \rangle$ . Poté jsou procházeny hodnoty jedna po druhé a jsou kontrolovány vždy další dvě následující, zda aritmetický průměr těchto třech po sobě jdoucích vzorků je menší než 0,0001. Tato hodnota byla zjištěna experimentálně. Pokud je podmínka splněna, zaznamená se číslo vzorku do proměnné *start* a od tohoto místa ve zvukových souborech začíná

průjezd tramvaje.

Obdobným způsobem je hledán konec tramvaje. Jen bylo nutné posunout se v souboru o bezpečnou vzdálenost (100 vzorků), aby se kmity ustálily. Poté je konec nalezen podmínkou, kdy aritmetický průměr třech posledních proších vzorků je větší než 0,0001. Číslo vzorku se zaznamená do proměnné konec a označuje místo ve zvukových záznamech, kde skončil průjezd tramvaje.



Obr. 5.1: Průběh hodnot v souboru optické závory, začátek tramvaje



Obr. 5.2: Průběh druhých mocnin hodnot v souboru optické závory, začátek tramvaje

Z pořadových čísel vzorků, představujících začátek a konec tramvaje, lze rozdílem zjistit počet vzorků představujících průjezd kolem mikrofonů. Ze známé vzorkovací frekvence lze spočítat dobu průjezdu a ze známé výkresové délky tramvaje pak rychlost jízdy.

Příklad vyhodnocení:

start = 138 260

konec = 305 075

počet vzorků = konec – start = 305 075 – 138 260 = 166 815

doba průjezdu = počet vzorků / vzorkovací frekvence = 166 815 / 44 100 =  
3,782 65 s

rychlost jízdy = délka tramvaje / doba průjezdu = 31,4 / 3,782 65 =  
8,301 m/s = 29,9 km/h.

### 5.3 Kalibrace záznamů

Úroveň hlasitosti každého vstupu je na zvukové kartě možno nastavit libovolně, proto musí být postaráno o kalibraci. Jak bylo uvedeno v kapitole 3, byl každým mikrofonem nahrán záznam odpovídající hladině akustického tlaku 94,1 dB, což podle vztahu (1) odpovídá přibližně 1 Pa v efektivní hodnotě.

Výpočtem je potom spočítána kalibrační konstanta pro každý mikrofon, kterou je pak každá hodnota nahraného záznamu vynásobena.

Ukázka zdrojového kódu:

```
[k1] = wavread('mereni/k2-01.wav');  
konst1=1/sqrt(mean(k1.^2));  
yk(1,:) = y1.*konst1;
```

V prvním řádku zdrojového kódu je načten kalibrační soubor pro první mikrofon. V druhém řádku jsou hodnoty kalibračního souboru umocněny na druhou, spočten aritmetický průměr (mean) a ten poté odmocněn (sqrt). Po vydělení jedničky, představující 1 Pa, touto střední kvadratickou hodnotou, je do konst1 uložena kalibrační konstanta pro první mikrofon. Ve třetím řádku jsou hodnoty záznamu z prvního mikrofonu y1 vynásobeny touto konstantou a uloženy do prvního řádku

matice  $y_k$ . Do dalších řádků matice  $y_k$  jsou pak uloženy kalibrované záznamy z dalších mikrofonů.

## 5.4 Furierova analýza

Takto kalibrované záznamy je možné již analyzovat. K frekvenční analýze byla v Matlabu použita funkce `fft` v bloku příkazů, jak je uvedeno v nápovědě Matlabu a v následujícím textu:

```
NFFT = 2^nextpow2(L); %Next power of 2 from length of y
Y = fft(y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
```

Do proměnné `NFFT` se ukládá hodnota, určující počet frekvenčních čar vypočtených algoritmem pro Rychlou Furierovu transformaci (Fast Furier Transform, FFT). Tato hodnota je rovna libovolné mocnině dvou, protože princip algoritmu pro výpočet FFT spočívá v dělení transformace v každém kroku na dvě stejně velké části. Libovolná mocnina dvou pak zajistí dělitelnost dvěma beze zbytku.

Počet frekvenčních čar pak určuje rozlišitelnost Furierovy analýzy. Je-li vzorkovací frekvence rovna 44 100 Hz a `NFFT` rovno 8 192, jako v tomto případě, pak:

$$\text{Rozlišitelnost FFT} = \frac{f_s}{NFFT} = \frac{44100}{8192} = 5,38 \text{ Hz} \quad (4)$$

Hodnota rozlišitelnosti FFT 5,38 Hz je tedy šířka mezi jednotlivými frekvenčními čarami ve spektrální oblasti a vektor `f` v bloku příkazů výše obsahuje hodnoty od 0 Hz do `Fs/2` tedy 22 050 Hz.

V proměnné `y` je vektor hodnot o velikosti shodné s `NFFT` určené k Furierově analýze. Tím je zajištěno, že Matlab nedoplní chybějící počet hodnot nulami.

Pomocí `2*abs(Y(1:NFFT/2+1))` dostaneme z komplexních hodnot, které jsou výsledky funkce `fft`, absolutní hodnoty, které jsou ještě násobeny dvěma, aby byla dosažena skutečná maximální hodnota harmonické složky dané frekvence. Násobení dvěma plyne z toho, že hodnoty v druhé polovině frekvencí, od 22 050 Hz do 44 100 Hz, jsou hodnoty zrcadlové a mají stejnou hodnotu jako odpovídající hodnota v první polovině frekvencí. Proto jsou v první polovině, kterou uvažujeme, vynásobeny hodnoty dvěma a zrcadlové neuvažujeme.

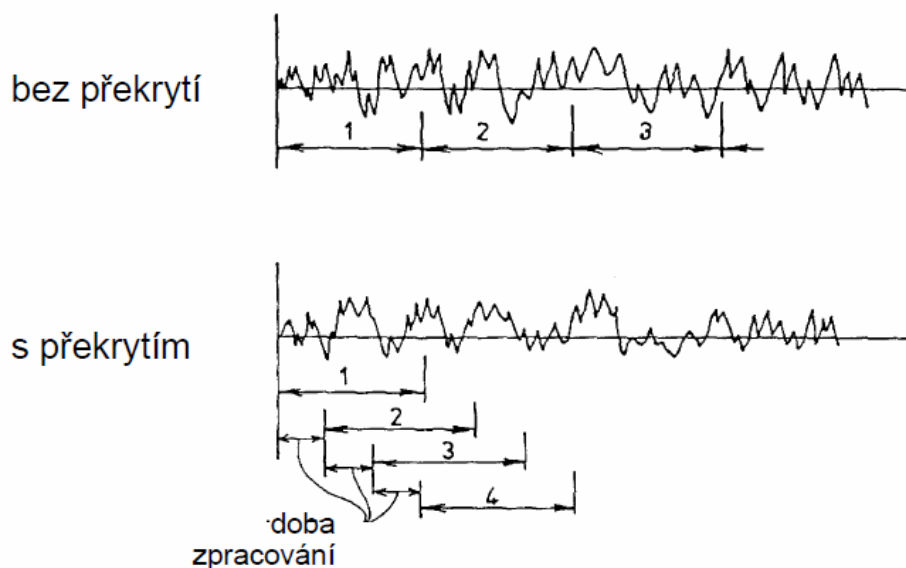
Hodnota  $L$  je délka, neboli počet hodnot, analyzovaného bloku dat. Jelikož je zde simulován zvukoměr, který má možnost volit časovou konstantu pro zobrazovací jednotku mezi Fast, Slow nebo Impuls, je zde volena časová konstanta Fast. Hodnota časové konstanty Fast je 200 ms [9]. Ze vztahu (5) vyplývá, že by počet hodnot pro analýzu měl být 8 820.

$$L = f_s \left[ \frac{\text{vzorků}}{s} \right] \cdot \text{konstanta Fast}[s] = 44\,100 \cdot 0,2 = 8\,820 \text{ vzorků} \quad (5)$$

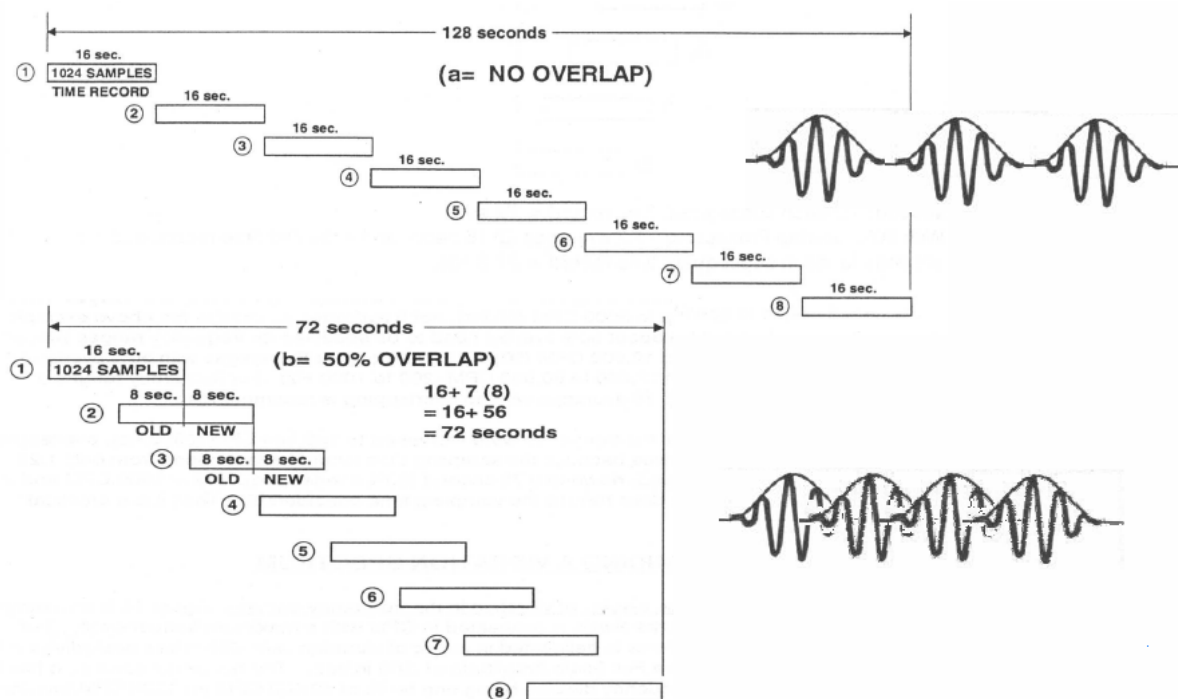
Ale jak už bylo zmíněno výše, je potřeba vzít blok dat o délce mocniny dvou, aby nedošlo ke zkreslení doplněním nul do potřebného počtu. Nejbližší hodnotou je tedy  $2^{13} = 8\,192$  vzorků.

### 5.5 Překrývání bloků dat k analýze (overlap)

Vzorkovací frekvencí je určen počet vzorků zaznamenaných za 1 vteřinu. Vzhledem k tomu, že se zvyšující se rychlostí průjezdu klesá doba průjezdu a tím počet vzorků, klesá i počet bloků k analýze a výstupní grafy pak mají menší rozlišení. Pro zvýšení počtu bloků k analýze lze uvažovat bloky s překrytím, jak je vidět na obrázku Obr. 5.3 a Obr. 5.4.



Obr. 5.3: Překrývání bloků dat k analýze (převzato z [10])



Obr. 5.4: Překrývání bloků dat k analýze (převzato z [10])

Na obrázku Obr. 5.4 je ukázáno na příkladu překrývání o 50 % délky bloku.

Ve vytvořeném programu pro analýzu je hodnota overlap počítána z rychlosti průjezdu a délky bloků dat k analýze podle vztahu (6).

$$\begin{aligned} \text{overlap} &= \frac{\text{rychlost} \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{50} \cdot \text{počet vzorků} = \frac{\text{rychlost} \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{50} \cdot 8192 & (6) \\ &= \text{rychlost} \cdot 163,84 \text{ vzorků (zaokrouleno na nejbližší celé číslo)} \end{aligned}$$

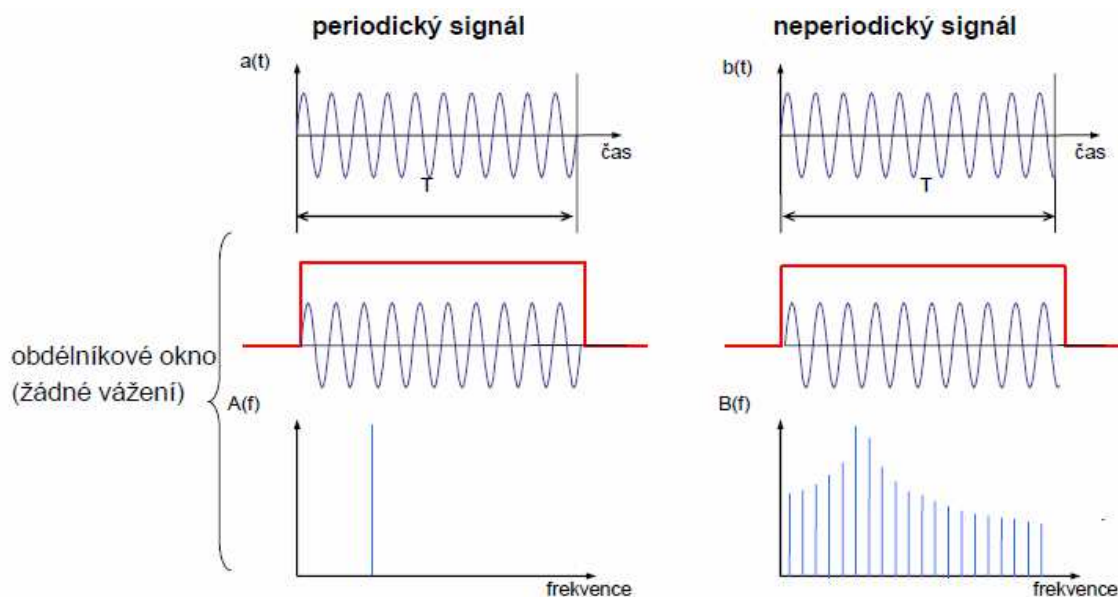
Ve zdrojovém kódu vypadá tento vztah následovně:

```
overlap = round((rychlost/50)*L);
```

## 5.6 Váhová okna

Vzhledem k tomu, že analyzovaný signál je náhodný, dochází k chybě únikem. To znamená, že analyzovaný blok dat není periodický a dochází k „úniku“ energie do mnoha spektrálních čar blízkých skutečné frekvenci.[10]





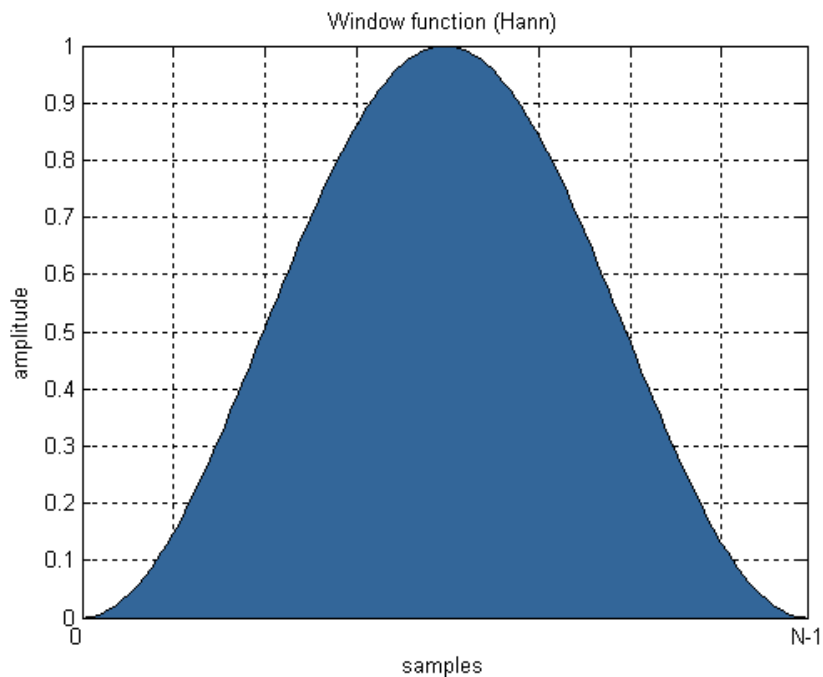
Obr. 5.5: Chyba únikem (převzato z [10])

Aby se chyba únikem minimalizovala, používá se některé z váhových oken. Vhodným váhovým oknem pro náhodný signál je Hanningovo okno. Průběh tohoto okna je dán předpisem (7). [11]

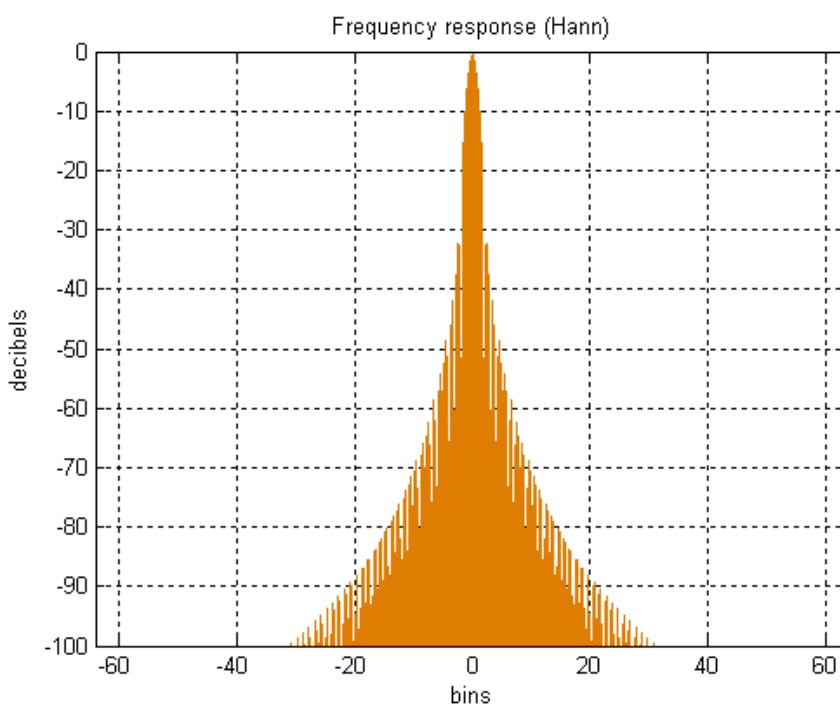
$$f(n) = 0,5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right), \quad (7)$$

kde  $N$  – šířka okna (počet vzorků) a  $n = 0 \div N$ .

Tvar Hanningova okna ukazuje obrázek Obr. 5.6 a frekvenční odezvu Obr. 5.7.



Obr. 5.6: Tvar Hanningova okna (převzato z [11])



Obr. 5.7: Frekvenční odezva Hanningova okna (převzato z [11])

V Matlabu jsou koeficienty Hanningova okna spočítány pomocí funkce `hann(L)` a těmito koeficienty je poté násoben analyzovaný blok dat (`nafft`).

```
okno = hann(L);  
naftokno = nafft'.*okno;
```

Po použití váhového okna je nutno provést korekci amplitudy frekvenční čáry tak, že se spočítá střední hodnota okna pomocí funkce `mean` a touto střední hodnotou se pak vydělí jednotlivé frekvenční čáry.

```
korekAmpl = mean(okno);
```

## 5.7 Běh programu

Program se spouští z prostředí Matlabu pomocí souboru `DP.m`. Zobrazí se hlavička aplikace v okně „Command Window“ v Matlabu a veškerá komunikace s uživatelem probíhá přes toto okno.

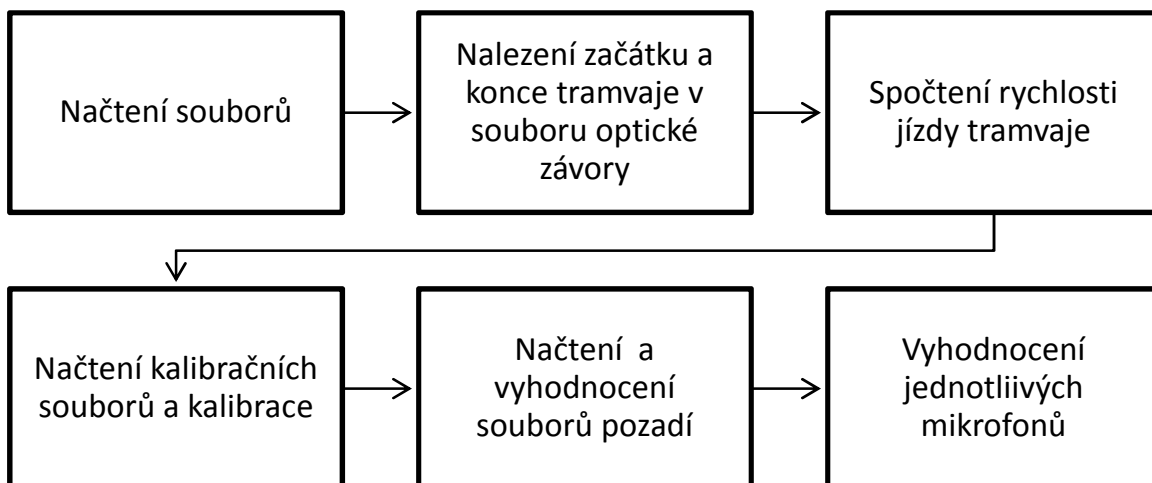
Nejprve se aplikace zeptá, jaký průjezd má být vyhodnocen:

```
.....:~::~ Diplomová práce - Jiří Čepák 2012 ~::~.....
```

```
*****
```

Zadej označení průjezdu:

Po jeho správném zadání začne sled činností vyhodnocení, jak je vidět na vývojovém diagramu Obr. 5.8.



Obr. 5.8: Sled činností při vyhodnocování

O prováděné činnosti je uživatel informován na monitoru, jak je vidět níže:

```
>> Probíhá načítání souborů...
>> Soubory byly úspěšně načteny.
>> Probíhá hledání začátku a konce tramvaje ze souboru optické závory...
>> Začátek tramvaje nalezen.
>> Konec tramvaje nalezen.
>> Rychlost jízdy = 9.93 km/h.
>> Probíhá načítání kalibračních souborů...
>> Kalibrační soubory byly úspěšně načteny.
>> Probíhá kalibrace nahraných souborů...
>> Kalibrace nahraných souborů proběhla úspěšně.
>> Probíhá načítání souborů pozadí...
>> Soubory pozadí načteny.
>> Probíhá vyhodnocování hluku pozadí...
>> Hluk pozadí vyhodnocen.
>> Záznam mikrofону č.1 byl úspěšně vyhodnocen.
>> Záznam mikrofону č.2 byl úspěšně vyhodnocen.
>> Záznam mikrofону č.3 byl úspěšně vyhodnocen.
>> Záznam mikrofону č.4 byl úspěšně vyhodnocen.
```

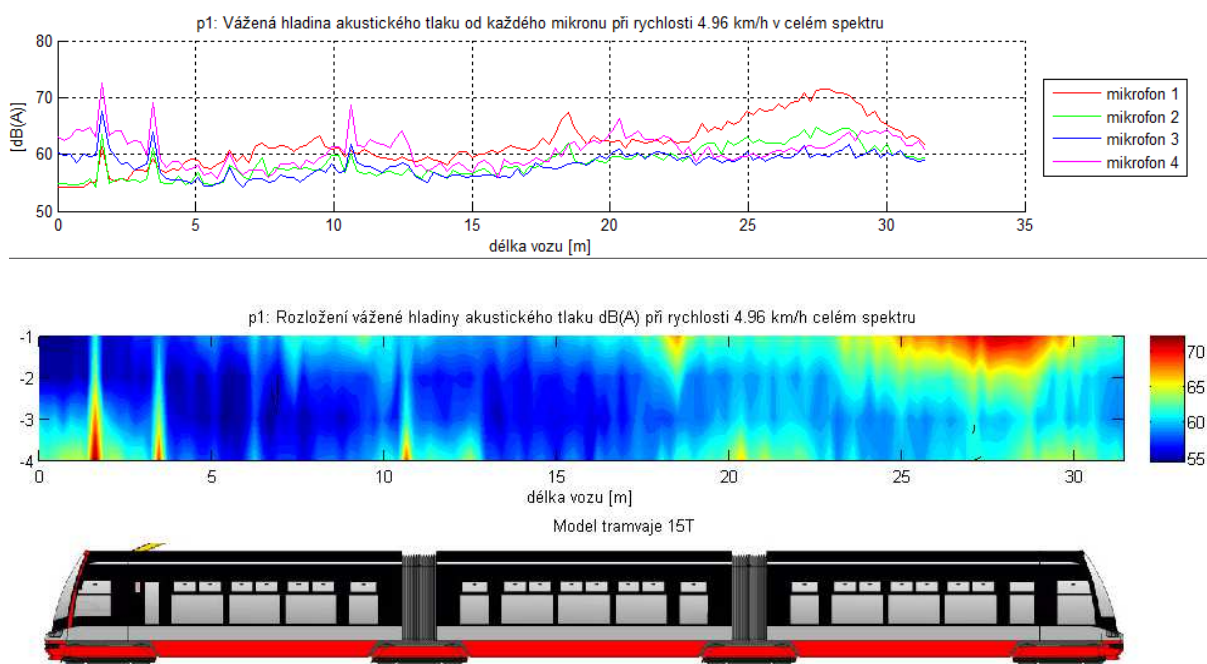
Vyhodnocení spočívá v použití třetinooktávového filtru a v použití váhového filtru A.

Po tomto vyhodnocení je zobrazeno jednoduché menu, které dává uživateli na výběr, jak chce výsledky vizualizovat:

```
*****ZVOL JEDNU Z NÁSLEDUJÍCÍCH MOŽNOSTÍ*****
* 1) Zobraz rozložení vážené hladiny akustického tlaku v celém spektru *
* 2) Zobraz rozložení vážené hladiny akustického tlaku ve zvoleném *
*   třetinooktávovém pásmu *
* 3) Zobraz spektrum ve zvoleném místě tramvaje *
* 4) Zobraz "surová" data *
* 5) KONEC *
*****
```

Ukázky vizualizací pro jednotlivé volby menu:

- 1) Při volbě 1) jsou zobrazeny průběhy vážené hladiny akustického tlaku od každého mikrofonu v celém akustickém spektru a rozložení vážené hladiny akustického tlaku v celém akustickém spektru, jak je vidět na obrázku Obr. 5.9.



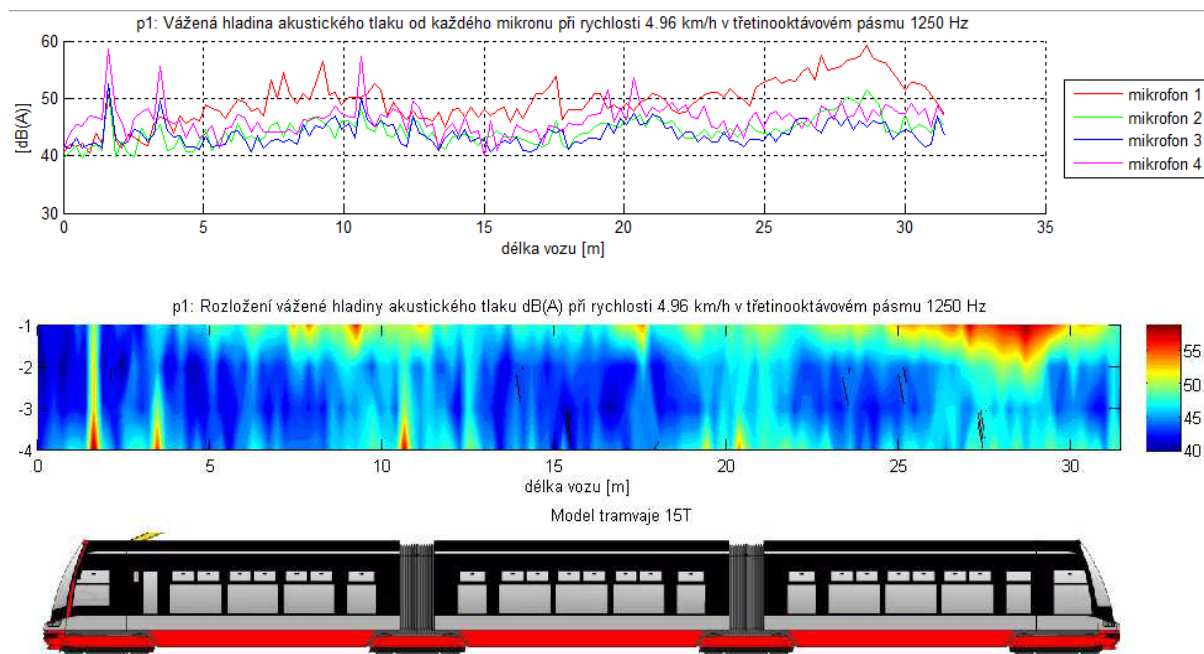
Obr. 5.9: Vizualizace při volbě 1)

Současně je na obrazovce zobrazena průměrná vážená hladina hluku pozadí v celém akustickém spektru např. >> Hluk pozadí pro celé spektrum je 29.6 dB(A)

Horní graf je vhodný pro porovnávání hodnot, protože z něj lze snadno vyčíst hodnotu. Pro přesnou hodnotu lze využít tlačítko „Data Cursor“ na „Figure Toolbar“ a klepnutím na libovolné místo v grafu se zobrazí jeho přesné souřadnice. Grafy lze také libovolně přibližovat pomocí tlačítka „Zoom In“.

Dolní graf poskytuje rychlé zorientování ve výsledcích. Rozměry modelu odpovídají rozměrům grafu a díky tomu je možné rychle identifikovat, v kterém místě je tramvaj nejhluchnější.

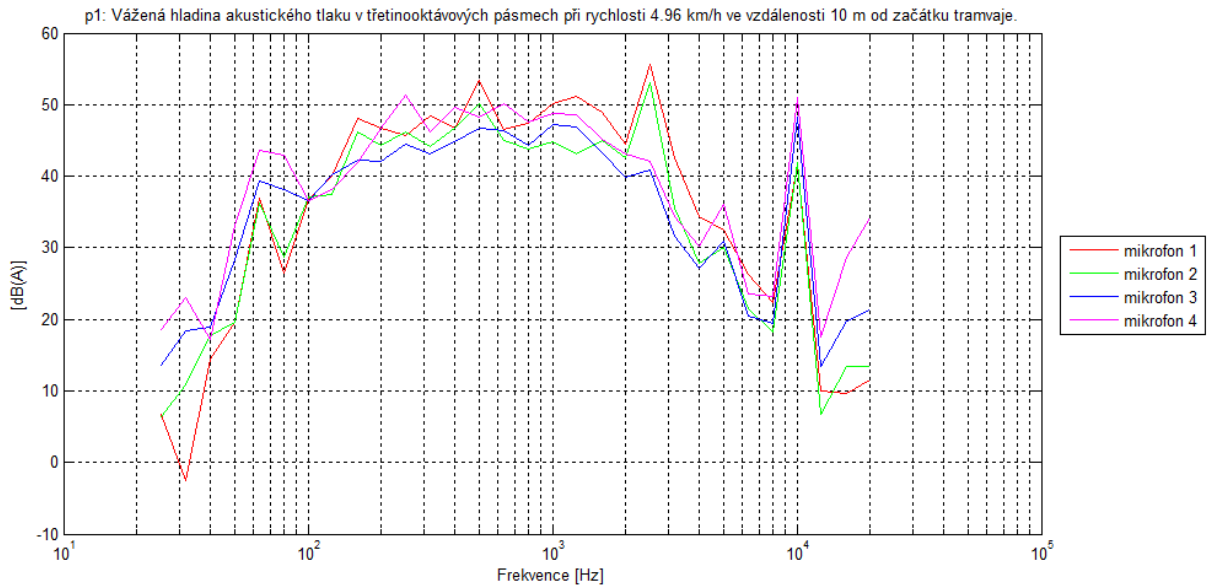
- 2) Při volbě 2) je uživatel požádán o zadání třetinooktávového pásma, ve kterém mají být výsledky zobrazeny. Je možné zadat libovolnou frekvenci od 25 Hz do 20 000 Hz a zobrazí se výsledky z toho pásma, do kterého zadaná frekvence patří (viz Obr. 5.10).



Obr. 5.10: Vizualizace výsledků při volbě 2) a zadané frekvenci 1 400 Hz

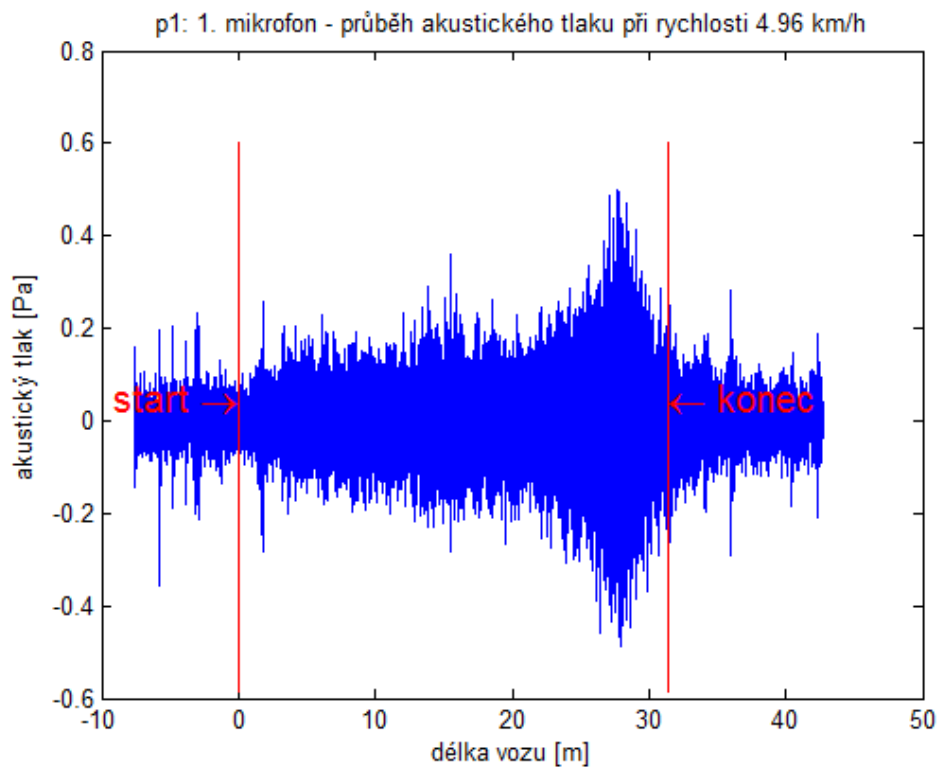
Zadaná frekvence byla 1 400 Hz a jak je vidět na Obr. 5.10, byly zobrazeny výsledky v třetinooktávovém pásmu 1 250 Hz, do kterého patří frekvence od 1 130 Hz do 1 414 Hz, tedy i zadaná frekvence 1 400 Hz. Současně je na obrazovce zobrazena hladina hluku pozadí v pásmu 1 250 Hz např. >> Hluk pozadí pro třetinooktávové pásmo 1250 Hz je 33.6 dB(A).

- 3) Při volbě 3) je uživatel požádán o zadání místa v tramvaji, ve kterém má být vykresleno frekvenční spektrum. Místo se určuje od začátku tramvaje v metrech. Poté je zobrazeno frekvenční spektrum každého mikrofону pro dané místo, jak ukazuje obrázek Obr. 5.11.



Obr. 5.11: Vizualizace výsledků při volbě 3) a zadaném místě 10 m od začátku tramvaje

- 4) Při volbě 4) jsou graficky zobrazeny průběhy s označením začátku a konce tramvaje. Na obrázku Obr. 5.12 je ukázka „surových“ dat pro jeden mikrofon.



Obr. 5.12: Vizualizace výsledků při volbě 4) pro 1. mikrofon

- 5) Volbou 5) se aplikace ukončuje, zavřou se všechny grafy a může se spustit vyhodnocení jiného záznamu opětovným spuštěním aplikace.



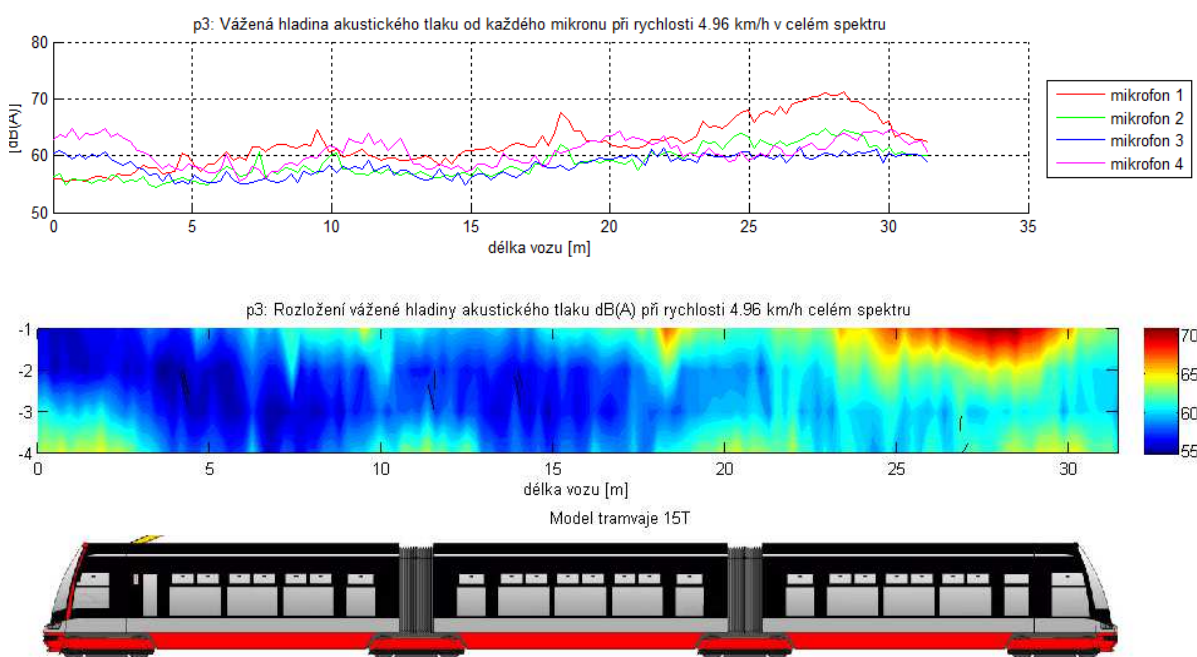
## 6 Hodnocení výsledků

V tomto odstavci jsou ukázány a okomentovány některé vybrané výsledky vyhodnocení průjezdů.

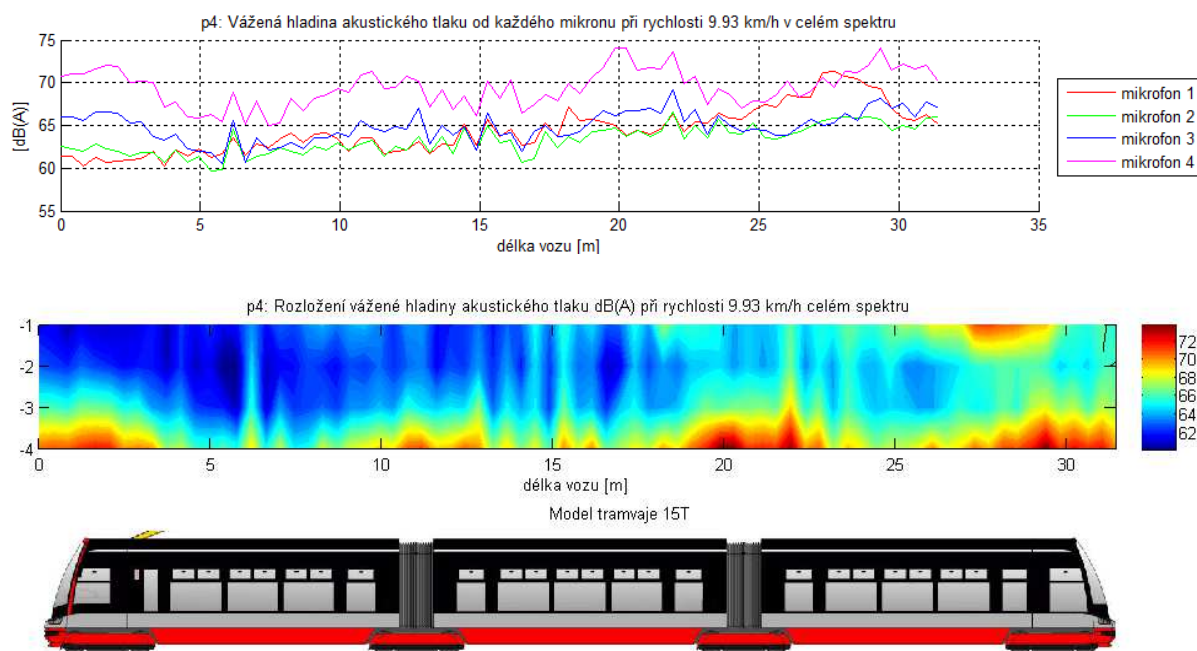
### 6.1 Vážená hladina akustického tlaku v celém spektru pro rychlosti 5, 10 a 20 km/h v normálním režimu

Na následujících grafech jsou ukázány vážené hladiny akustického tlaku v celém akustickém spektru pro rychlosti 5, 10, 20 km/h. Průjezd rychlostí 30 km/h zde nebude hodnocen, protože mikrofony nebyly správně nastaveny pro vyšší hlukovou expozici a při emitovaném hluku docházelo k tzv. clippingu. Ke clippingu dochází, když je zesilovač přebuzen a snaží se dodávat výstupní napětí nebo proud vyšší, než je v jeho možnostech. Signál je pak zkreslen.[12]

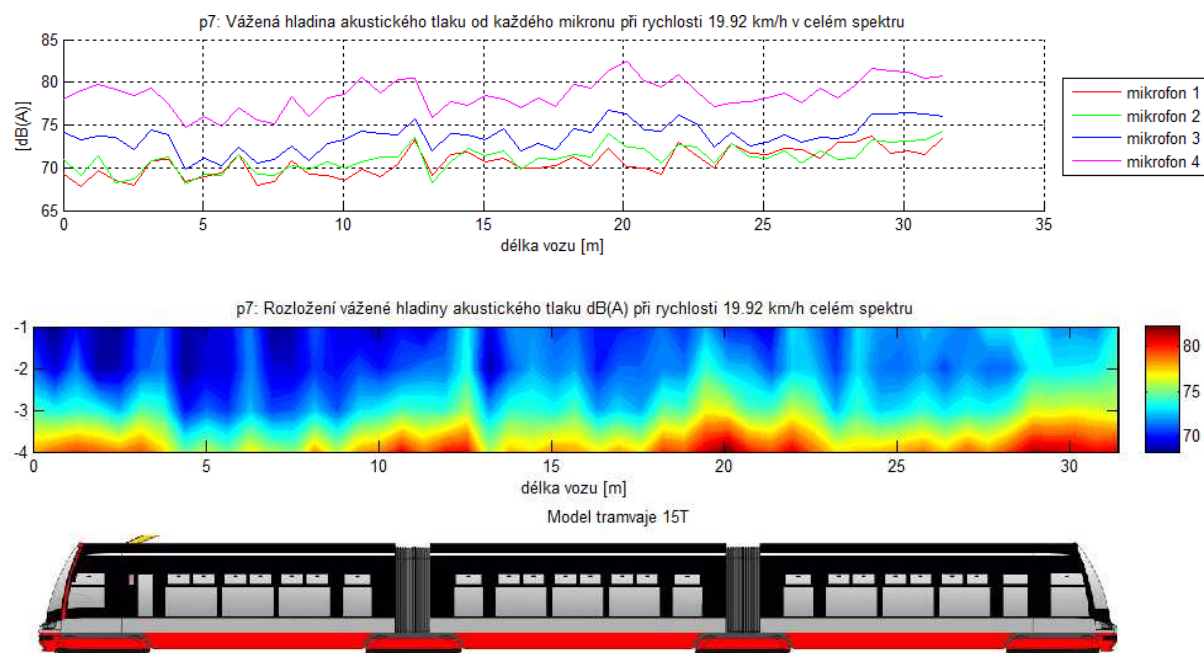
Z časových důvodů nemohlo být měření opakováno.



Obr. 6.1: Vážené hladiny akustického tlaku v celém spektru při rychlosti cca. 5 km/h



Obr. 6.2: Vážené hladiny akustického tlaku v celém spektru při rychlosti cca. 10 km/h



Obr. 6.3: Vážené hladiny akustického tlaku v celém spektru při rychlosti cca. 20 km/h

Průměrný hluk pozadí v celém spektru je 29,6 dB(A).

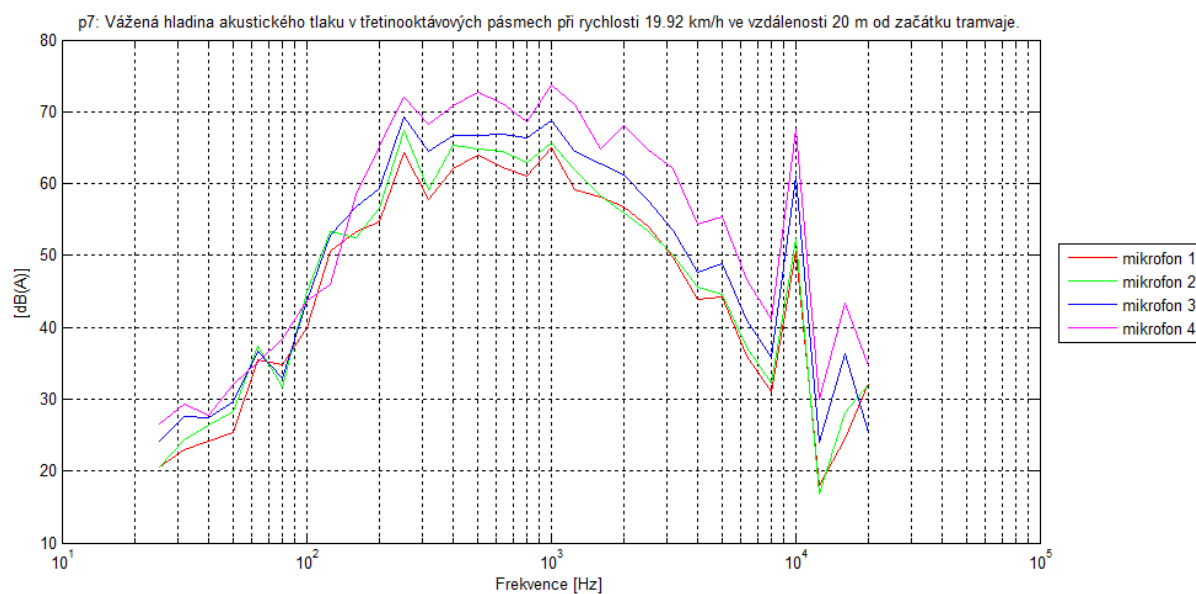
Na první pohled lze z výše ukázaných grafů vidět, jak se zvyšuje maximální vážená hladina akustického tlaku s rychlostí. Zatímco při rychlosti 5 km/h byla hladina asi 70 dB(A), při rychlosti 10 km/h už to bylo téměř 75 dB(A) a při rychlosti 20 km/h již

vystoupala na hodnotu kolem 83 dB(A).

Z grafů je také patrné, že ve vyšších rychlostech vychází nejvyšší hluk dle předpokladu z oblasti podvozku. Při pomalých rychlostech vychází nejvyšší hluk z oblasti střechy, kde jsou uloženy kontejnery s elektro-výzbrojí.

## 6.2 Rozbor hluku od podvozků

Hluk od podvozků se významně projevuje při rychlosti 20 km/h. Ke zjištění frekvence, která nejvíce přispívá k celkovému hluku v celém spektru v daném místě tramvaje, se zvolí pro daný průjezd volba 3) z menu a zadá se místo v metrech od začátku tramvaje, kde je nejčervenější místo na grafu. Z grafu na Obr. 6.3 je toto místo nejvýraznější např. v místě 20 m od začátku tramvaje. Dle výkresu se v tomto místě nachází 3. podvozek. Spektrum v tomto místě je pak vidět na grafu Obr. 6.4.

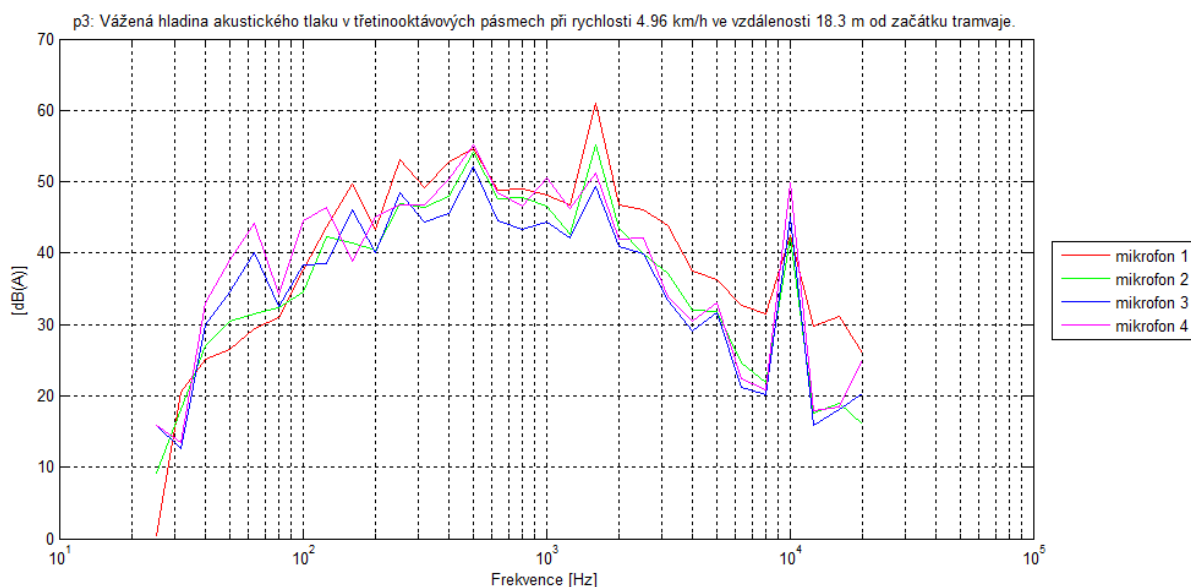


Obr. 6.4: Spektrum v třetinooktávových pásmech pro rychlost cca. 20 km/h ve vzdálenosti 20 m od začátku tramvaje.

Ze spektra na grafu Obr. 6.4 je zřejmá tónová složka v pásmu 10 kHz. Spektrum s tónovými složkami je takové spektrum, kde libovolná frekvenční čára je nejméně o 5 dB(A) vyšší než obě sousední.

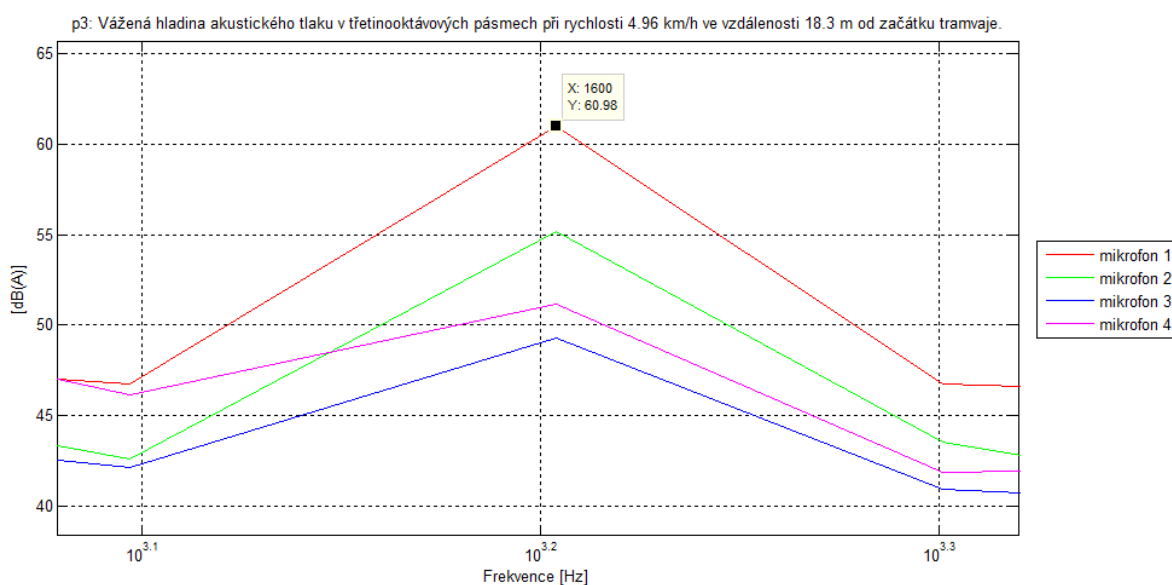
### 6.3 Rozbor hluku na střeše

Na grafu Obr. 6.1 je patrné hlučné místo na střeše, zhruba v polovině délky tramvaje. Kurzorem bylo zjištěno, že je to přesně ve vzdálenosti 18,3 m od začátku tramvaje. Volbou 3) z menu se vykreslí spektrum pro toto místo (viz Obr. 6.5)



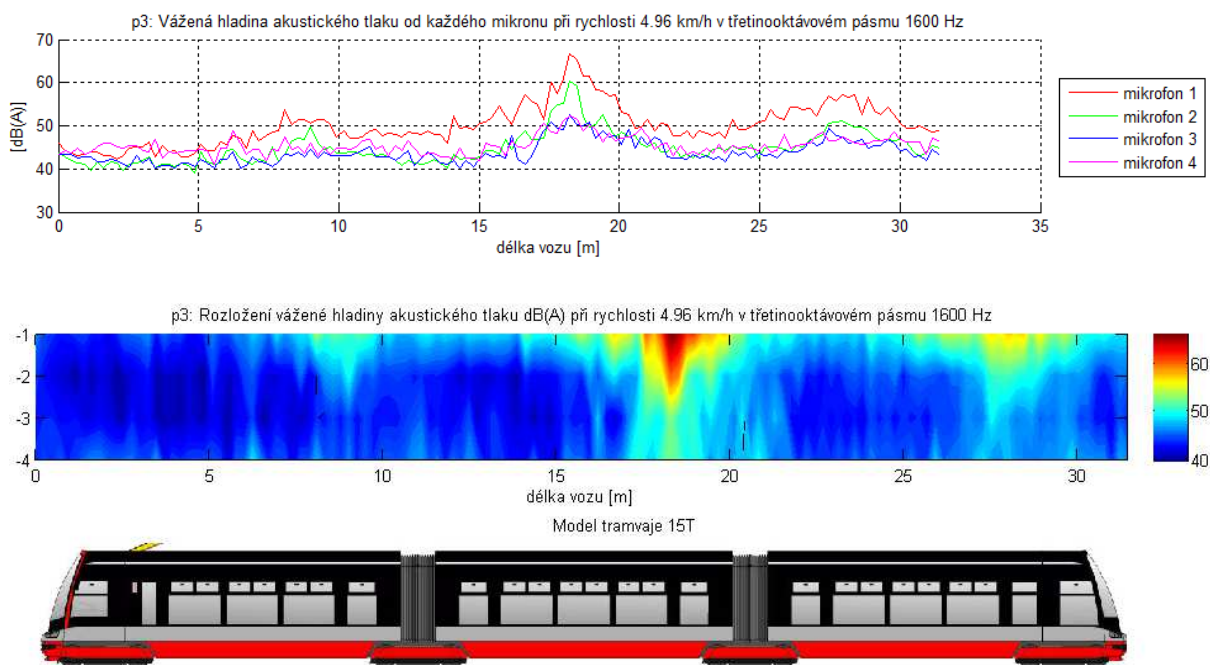
Obr. 6.5: Spektrum v třetinooktávových pásmech pro rychlost cca. 5 km/h ve vzdálenosti 18,3 m od začátku tramvaje

Tónových složek je v tomto spektru vidět více, nejvýraznější je složka 10 kHz, která do horního mikrofonu proniká patrně od podvozku. Když tuto složku pomíneme, další výrazná je zhruba ve středu grafu. Na grafu Obr. 6.6 je toto místo přiblíženo.



Obr. 6.6: Detail grafu Obr. 6.5

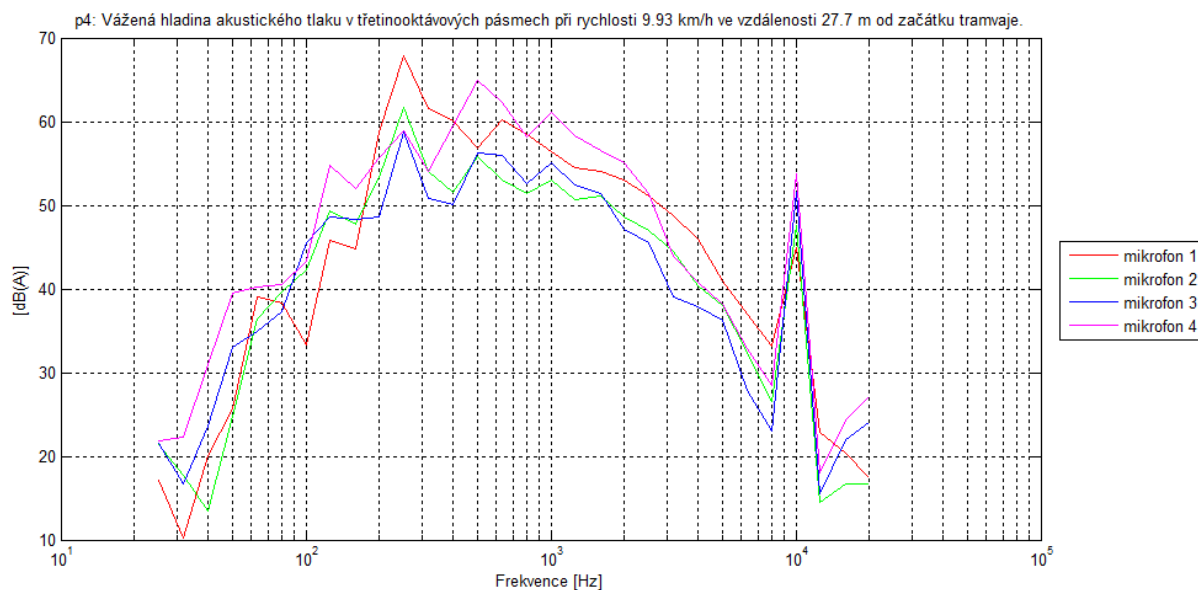
Z grafu Obr. 6.6 je patrná tónová složka v třetinooktávovém pásmu 1600 Hz. Když se volbou 2) nechá vykreslit pouze třetinooktávové pásmo 1600 Hz, vypadá vážená hladina akustického tlaku, jak je vidět na Obr. 6.7.



Obr. 6.7: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 1600 Hz

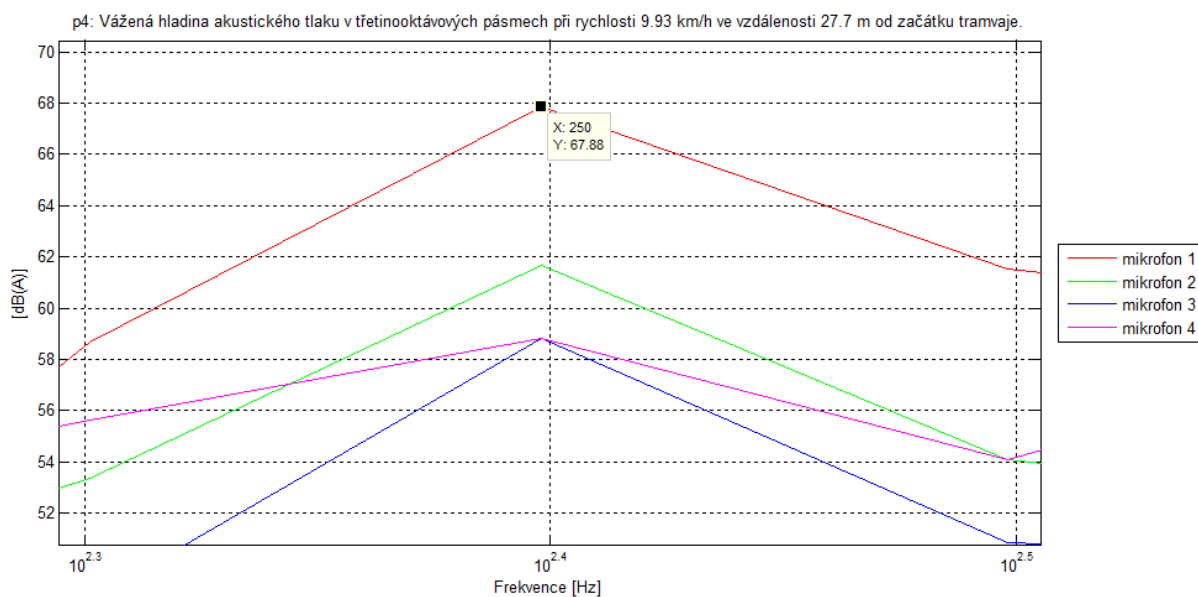
Průměrný hluk pozadí pro pásmo 1600 Hz je 33,4 dB(A).

Další hlučné místo na střeše je z grafu na Obr. 6.2 místo vzdálené 27,7 m od začátku tramvaje. Spektrum pro toto místo je vidět na grafu Obr. 6.8.



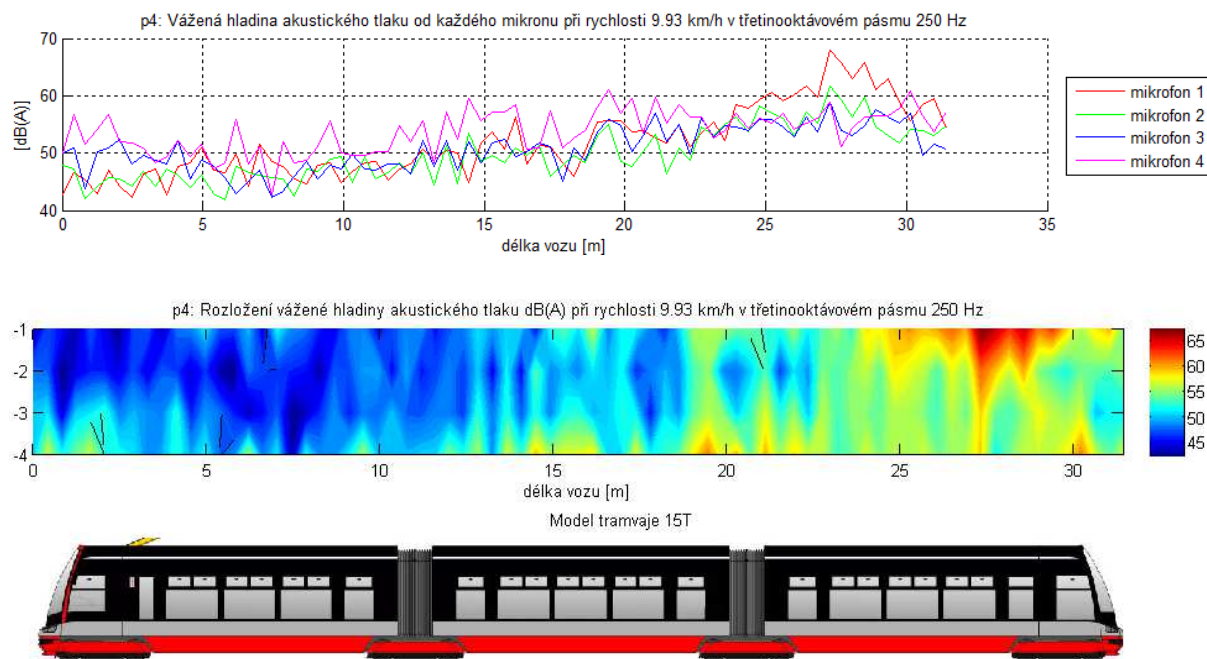
Obr. 6.8: Spektrum v třetinooktávových pásmech pro rychlost cca. 10 km/h ve vzdálenosti 27,7 m od začátku tramvaje

Opět je zde vidět složka 10 kHz od podvozku a další složka je na grafu Obr. 6.9 přiblížena.



Obr. 6.9: Detail grafu Obr. 6.8

Významně se zde projevuje tónová složka v třetinooktávovém pásmu 250 Hz. Graf pro toto pásmo vypadá následovně (viz Obr. 6.10)



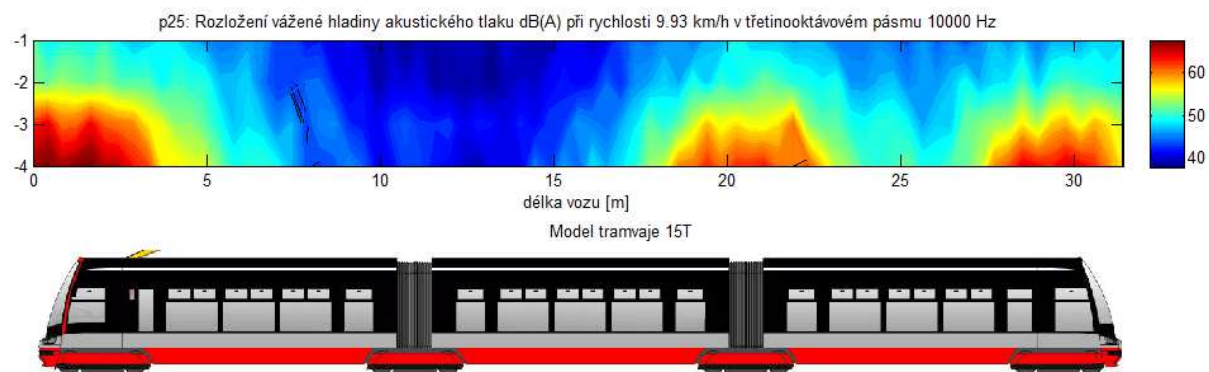
Obr. 6.10: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 250 Hz

Průměrný hluk pozadí je pro pásmo 250 Hz 27,1 dB(A).

## 6.4 Analýza simulovaných poruch

### 6.4.1 Vypnutý 2. podvozek

Průjezdy s vypnutým druhým podvozkem jsou označeny p22 až p29 (podrobně jsou popsány v příloze A). Jak již bylo zjištěno a v odstavci 6.2 napsáno, v oblasti podvozků je výrazná tónová složka 10 kHz. Na obrázku Obr. 6.11 je vidět, jak v třetinooktávovém pásmu 10 000 Hz jsou hlučná místa jen v místech zbylých třech podvozků.

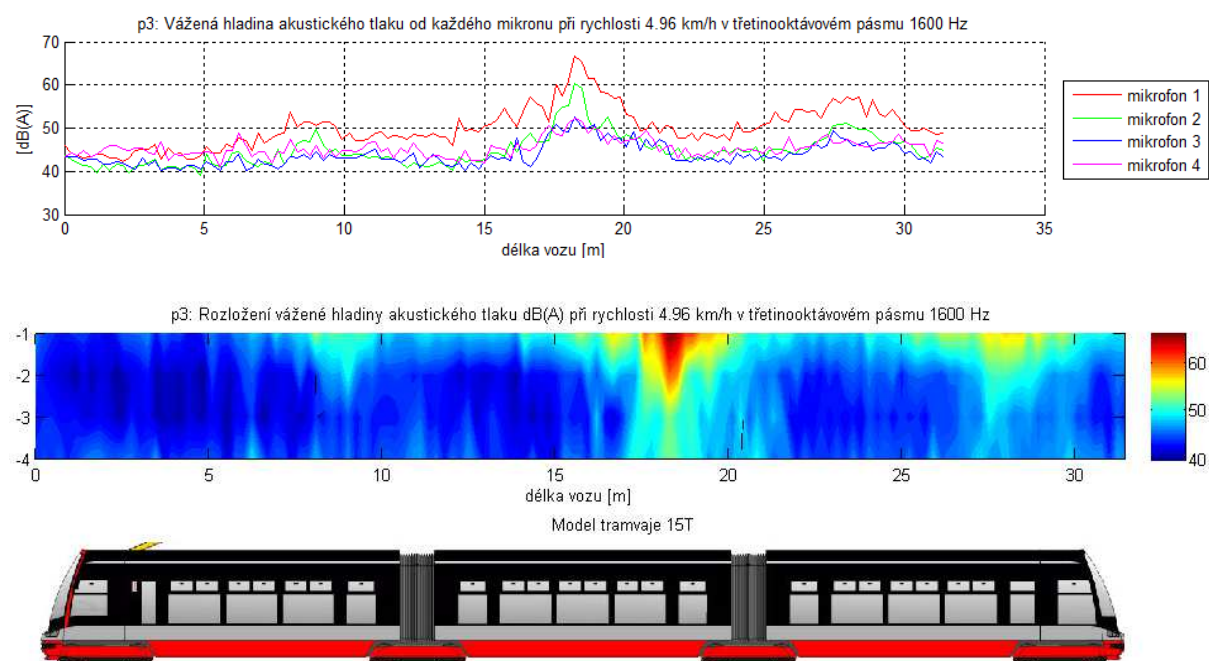


Obr. 6.11: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 10 kHz při vypnutém 2. podvozku

Průměrný hluk pozadí pro pásmo 10 000 Hz je 13,2 dB(A).

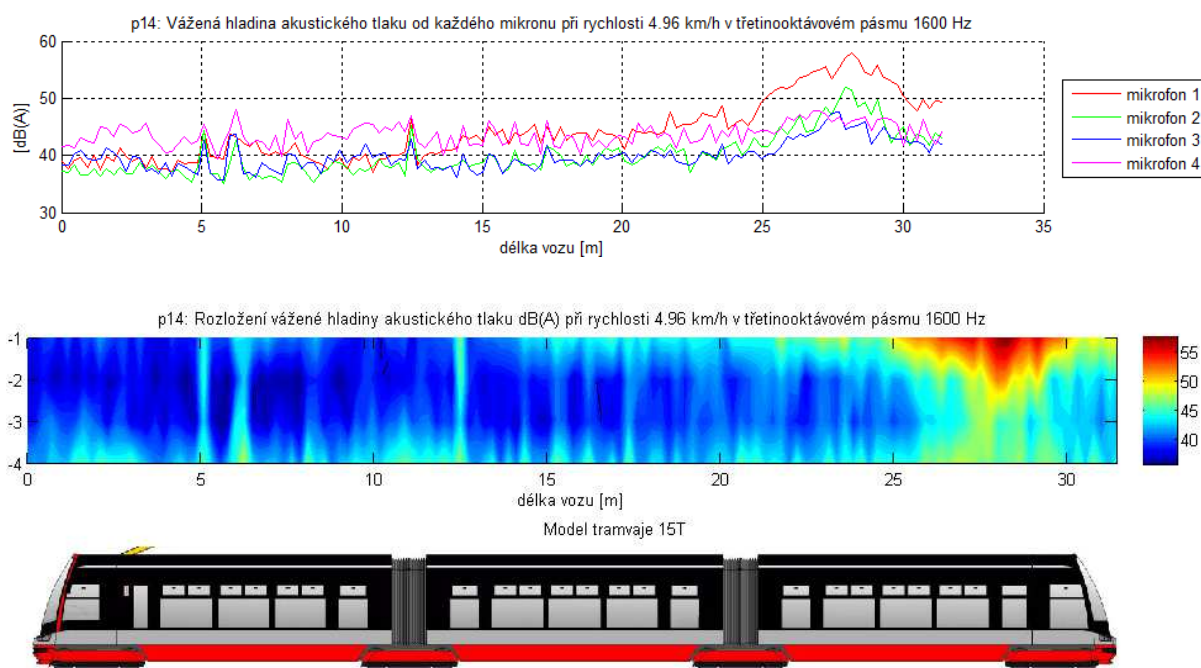
#### 6.4.2 Vypnutá ventilace

Průjezdy s vypnutou ventilací jsou označeny p14 až p21 (podrobně jsou popsány v příloze A). Ventilace na střeše způsobuje tónovou složku v záznamu na frekvenci 1600 Hz. Jelikož se jedná o elektro-výzbroj, je sledován pouze záznam v rychlosti 5 km/h. Obr. 6.12 ukazuje průjezd se zapnutou ventilací a Obr. 6.13 s vypnutou ventilací.



Obr. 6.12: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 1600 Hz při zapnuté ventilaci



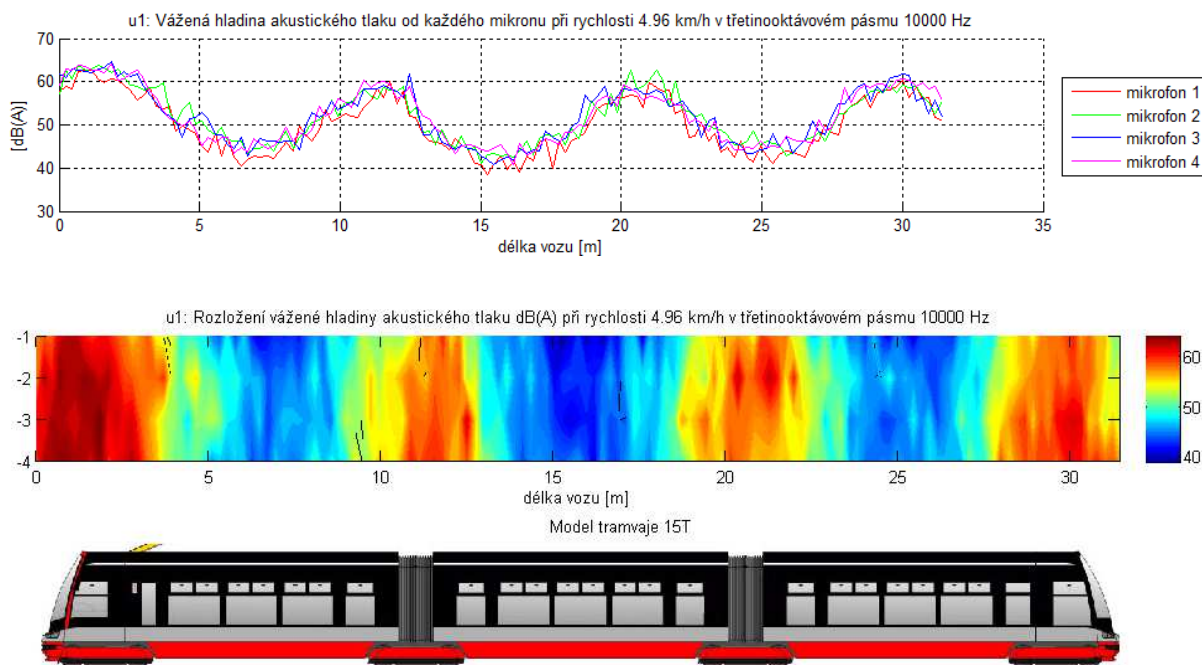


Obr. 6.13: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 1600 Hz při vypnuté ventilaci

Porovnáním průběhu horního mikronu 1 na obou výše zobrazených grafech je vidět, že při vypnuté ventilaci je frekvenční složka třetinooktávového pásmu 1600 Hz výrazně nižší než při zapnuté. Zároveň je vidět, že ventilace na střeše prostředního článku tramvaje je výrazně hlasitější než na zbylých dvou člancích. To mohlo být způsobeno např. nezavřeným víkem kontejneru.

## 6.5 Hodnocení záznamů při měření v oblasti podvozků

Pro úplnost je zde zobrazen pouze jeden graf ze záznamu pořízeného v oblasti podvozků (viz Obr. 6.14).



Obr. 6.14: Vážená hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu 10 000 Hz při rychlosti cca. 5 km/h a měření v oblasti podvozků

Z grafu na Obr. 6.14 jsou zřejmé opět čtyři podvozky, přičemž je možné pouze říci, že první podvozek generuje vyšší hladinu hluku než ostatní.

## Závěr

V rámci této diplomové práce se podařilo navrhnout a zrealizovat metodu pro analýzu největších zdrojů hluku na jedoucím trakčním kolejovém vozidle. Metoda byla prakticky použita při měření hluku emitovaném jedoucí tramvají typu Škoda 15T Praha, kterou vyrábí plzeňská ŠKODA TRANSPORTATION a.s., jež je i zadavatelem práce. Při měření bylo vyzkoušeno několik režimů a byly simulovány poruchy jako například porucha jednoho z podvozků.

V práci je popsán princip metody, který spočívá v nahrávání zvukových záznamů, které jsou později vyhodnoceny v softwarovém nástroji Matlab. Pro účely vyhodnocení byla v Matlabu vytvořena aplikace, jejíž stěžejní bloky jsou v práci uvedeny a popsány. Je zde popsán způsob jejího používání a ukázány její grafické a textové výstupy.

Vzhledem k nevyhovujícím podmínkám zkušební koleje, kdy kolejnice je stykovaná, nesvařená, dochází k rázům o několik metrů dále od mikrofonů a výsledky jsou tím zkresleny. Pokud by měla být metoda používána, bylo by vhodné vybudovat zkušební kolej vhodnou pro měření hluku. Především by měly být kolejnice k sobě svařené a připevněné k betonovým pražcům.

Existuje samozřejmě několik dalších metod, jak měření provádět např. měřit intenzitními sondami, které ale mají svoje omezení především ve vzdálenosti od měřeného objektu (vzdálenost musí být malá), nebo metodou zvanou Akustická holografie. V této práci navržená metoda je, v porovnání s výše uvedenými, levná, ale také nemusí být příliš přesná především u zvuků nízkých frekvencí, kdy je vlnová délka velká a hluk se přenáší na velké vzdálenosti.

Měřicí metodu by bylo vhodné modifikovat použitím měřicí karty s mikrofony, kdy je tento řetězec již kalibrován a měří přímo v hodnotách akustického tlaku.

## Seznam použité a citované literatury

- [1] ČSN EN ISO 3095. *Železniční aplikace - Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly*. Praha : Český normalizační institut, září 2006. 36 s.
- [2] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. 146 s. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze. ISBN 80-01-02460-1.
- [3] TRÁVNÍČEK, Bohumír. 16. konference „Železniční dopravní cesta 2010“: MOŽNOSTI ŘEŠENÍ HLUKOVÉ ZÁTĚŽE Z POZICE PROVOZOVATELE DRÁHY V KONTEXTU STÁVAJÍCÍ PRÁVNÍ ÚPRAVY [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2010/06sb.pdf>.
- [4] *Datový list spínacího relé D1A121000* [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://doc.chipfind.ru/pdf/cosmo/d1a121000.pdf>.
- [5] *Firemní dokumentace společnosti ŠKODA TRANSPORTATION, a.s.*
- [6] *Tramvaj ForCity Praha : ŠKODA TRANSPORTATION a.s.* [online]. datum vydání neuveden [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: <http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/tramvaj-forcity-praha>.
- [7] *O ForCity* [online]. 2010 [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: <http://www.forcitytram.cz/o-forcity/>.
- [8] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: <http://mapy.cz>
- [9] SMETANA, Ctirad, et al. *Hluk a vibrace : Měření a hodnocení*. 1. vydání. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [10] Digitální zpracování signálů. In: [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: [http://www.337.vsb.cz/materialy/zaklady\\_experimentalni\\_mechaniky/EXPME\\_3.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/zaklady_experimentalni_mechaniky/EXPME_3.pdf)
- [11] Hann function. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hann\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Hann_function)

- [12] Clipping (zvuk). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Clipping\\_%28zvuk%29](http://cs.wikipedia.org/wiki/Clipping_%28zvuk%29)

## Zdroje obrázků

- [13] <http://altomusic.com/shop/images/product/896hd-da5dcc7a4c3f3e9e1e3fe7db8179d9ac.jpg>
- [14] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Xlr-connectors.jpg/800px-Xlr-connectors.jpg>

## Přílohy

- A Přehled a označení měřených průjezdů a jejich režimy
- B Obsah přiloženého CD

## Příloha A – Přehled a označení průjezdů a jejich režimy

Tab. A: Měření v celé výšce tramvaje

označení průjezdu	rychlost tramvaje	režim	poznámka
p1	5 km/h	normální	
p2	5 km/h	normální	NEPLATNÝ ZÁZNAM *)
p3	5 km/h	normální	
p4	10 km/h	normální	
p5	10 km/h	normální	
p6	10 km/h	normální	
p7	20 km/h	normální	
p8	20 km/h	normální	
p9	20 km/h	normální	
p10	20 km/h	normální	
p11	30 km/h	normální	
p12	30 km/h	normální	
p13	30 km/h	normální	
p14	5 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p15	5 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p16	10 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p17	10 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p18	20 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p19	20 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p20	30 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p21	30 km/h	vypnutá ventilace salonu pro cestující	
p22	5 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p23	5 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p24	10 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p25	10 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p26	20 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p27	20 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p28	30 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	
p29	30 km/h	vypnutý pohon 2. podvozku	

pozn.: Normální režim znamená chod ventilace salonu pro cestující na 100% a pohon všech podvozků zapnutý.

\*) během průjezdu se ozval hluk z jedné z hal v okolí

Tab. B: Měření v oblasti podvozku

označení průjezdu	rychlost tramvaje	režim	poznámka
u1	5 km/h	normální	
u2	5 km/h	normální	
u3	10 km/h	normální	
u4	10 km/h	normální	
u5	20 km/h	normální	
u6	20 km/h	normální	
u7	30 km/h	normální	
u8	30 km/h	normální	

pozn.: Normální režim znamená chod ventilace salonu pro cestující na 100% a pohon všech podvozků zapnutý.

## Příloha B – Obsah přiloženého CD

\\Datové listy a manuály

\\Vlastní práce

\\Zadání diplomové práce

\\Zdrojové kódy pro Matlab + nahrané zvukové záznamy