



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF RADIO ENGINEERING

**FÁZOVÉ ZMĚNY ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ A JEJICH  
PRÁVĚ ROZPOZNATELNÝ ROZDÍL**

PHASE CHANGES IN AUDIO SIGNALS AND THEIR JND

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ivana Štěpánková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Dr. Ing. Libor Husník**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 28.12.2017

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce Dr. Ing. Liboru Husníkovi za poskytnutí odborné literatury, cenné rady a připomínky k obsahu i formě této diplomové práce. Dále chci poděkovat všem, kteří byli ochotni zúčastnit se psychoakustických experimentů.

Tato práce byla podporována studentskou grantovou soutěží Českého vysokého učení technického v Praze č. SGS17/190/OHK3/3T/13.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpánková** Jméno: **Ivana** Osobní číslo: **406064**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Multimediální technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Fázové změny zvukových signálů a jejich právě rozpoznatelný rozdíl**

Název diplomové práce anglicky:

**Phase Changes in Audio Signals and their JND**

Pokyny pro vypracování:

Připravte subjektivní test na zjištění právě rozpoznatelného rozdílu při změně fázových poměrů ve zvukovém signálu. Vyberte různé typy změn fáze pro různé části kmitočtového spektra. Jako zvukový testovací materiál použijte přirozené hudební signály. Subjektivní test proveďte a vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Syrový, Václav.: Hudební akustika, nakladatelství AMU, Praha, 2003.
- [2] Laitinen, Mikko-Ville; Disch, Sascha; Pulkki, Ville: Sensitivity of Human Hearing to Changes in Phase Spectrum, JAES, V61, Nr. 11, p860.
- [3] Lazars. Lazarus Homepage. Dostupné z: <http://www.lazarus-ide.org>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

\_\_\_\_\_

Datum zadání diplomové práce: **05.09.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce zimního semestru 2018/2019**

\_\_\_\_\_  
Dr. Ing. Libor Husník  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vlivem změn ve fázovém spektru na sluchový vjem. Ačkoliv lidský sluchový systém byl dlouhou dobu považován za takzvaně fázově hluchý, v dnešní době několik současných studií prokázalo, že změna fázového spektra zvuku má významný vliv na sluchový vjem. Cílem této práce je pomocí poslechových testů ověřit vliv několika vybraných případů fázových změn zvukových signálů na sluchový vjem a určit jejich právě rozpoznatelný rozdíl. V první části psychoakustického experimentu byly fázové změny provedeny na dvou skupinách signálů – syntetických a reálných zvukových signálech. Tyto testy sloužily k ověření vlivu fáze na sluchový vjem. Výsledky testů byly zpracovány statistickou metodou Analýza rozptylu (ANOVA). Druhá část psychoakustického experimentu byla provedena pro určení právě rozpoznatelného rozdílu fázových změn hudebních signálů. Na základě všech získaných výsledků byl určen vliv vybraných fázových změn na sluchový vjem, a právě rozpoznatelný rozdíl fázových úprav hudebních signálů použitých v psychoakustickém experimentu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Změna fáze, fázové spektrum, psychoakustický test, právě rozpoznatelný rozdíl, analýza rozptylu

## ABSTRACT

This paper deals with sensitivity of human auditory to changes in sound phase spectrum. Although the human auditory system was considered “phase deaf” for a long time, nowadays a few recent studies proved that the change of sound phase spectrum has a significant impact on auditory perception. The aim of this paper is to verify the effect of several selected phase changes of sound signals on auditory perception and to determine their JND. To achieve this aim it is fundamental to perform listening tests with phase changed audio signals. In the first part of psychoacoustic experiment the phase changes were applied to two groups of audio signals – synthetic signals and real signals. These tests were performed to verify the effect of phase changes to auditory perception. The second part of the experiment was performed to determine the JND of phase changes in real music signals. The results of the tests were statistically analyzed by ANOVA and the effect of phase changes and their JND was determined based on these results.

## KEYWORDS

Phase change, phase spectrum, psychoacoustic test, just noticeable difference, analysis of variance

# OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>I</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>III</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>1. PSYCHOAKUSTIKA</b>	<b>3</b>
<b>2. LIDSKÝ SLUCHOVÝ SYSTÉM</b>	<b>5</b>
2.1 PRINCIP VZNIKU SLUCHOVÉHO VJEMU	5
2.2 STRUKTURA LIDSKÉHO UCHA	5
2.2.1 VNĚJŠÍ UCHO	6
2.2.2 STŘEDNÍ UCHO	7
2.2.3 VNITŘNÍ UCHO	7
<b>3. STUDIE VLIVU FÁZOVÝCH ZMĚN NA SLUCHOVÝ VJEM</b>	<b>9</b>
3.1 STARŠÍ STUDIE	9
3.2 NOVĚJŠÍ STUDIE	9
<b>4. PSYCHOAKUSTICKÉ METODY MĚŘENÍ</b>	<b>11</b>
4.1 PÁROVÉ SROVNÁVÁNÍ ZVUKOVÝCH PODNĚTŮ	12
4.2 POSUZOVÁNÍ ZVUKOVÝCH PODNĚTŮ NA SUBJEKTIVNÍCH POSUZOVACÍCH ŠKÁLÁCH	13
4.3 METODA KONSTANTNÍCH PODNĚTŮ	13
4.4 VÝBĚR MĚŘICÍCH METOD PRO PSYCHOAKUSTICKÉ EXPERIMENTY	14
<b>5. AMPLITUDOVÉ A FÁZOVÉ SPEKTRUM SIGNÁLU</b>	<b>17</b>
<b>6. PSYCHOAKUSTICKÝ EXPERIMENT – PRVNÍ ČÁST</b>	<b>19</b>
6.1 SYNTETICKÉ SIGNÁLY	19
6.1.1 EXPERIMENT 1	19
6.1.2 EXPERIMENT 2	21
6.1.3 EXPERIMENT 3	22
6.2 REÁLNÉ SIGNÁLY	23
6.3 PROGRAM PRO TESTOVÁNÍ	24
6.3.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ LAZARUS	25
6.3.2 PRVKY PROGRAMU	25
6.4 POSLECHOVÝ TEST	28
<b>7. VYHODNOCENÍ PRVNÍ ČÁSTI PSYCHOAKUSTICKÉHO EXPERIMENTU</b>	<b>31</b>
7.1 ANALÝZA ROZPTYLU	31
7.1.1 JEDNOFAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU (ONE-WAY ANOVA)	31
7.1.2 MULTIKOMPARATIVNÍ TESTY	32
7.1.3 TUKEYHO METODA	32
7.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 1	33
7.2.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 1	34
7.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 2	35
7.3.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 2	36
7.4 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 3	37
7.4.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 3	38
7.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 4	39
7.5.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 4	40
7.6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 5	40
7.6.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 5	42
7.7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 6	42
7.7.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 6	43

<b>8.</b>	<b>PSYCHOAKUSTICKÝ EXPERIMENT – DRUHÁ ČÁST</b>	<b>45</b>
8.1	METODY PRO URČENÍ PRAHOVÉ HODNOTY	45
8.1.1	METODA LINEÁRNÍ INTERPOLACE	45
8.1.2	METODA ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU DEKUMULOVANÉHO ROZDĚLENÍ	46
8.1.3	METODA SČÍTÁNÍ	46
8.1.4	METODA INTERPOLACE DAT VYROVNANÝCH POMOCÍ NORMÁLNÍHO ROZLOŽENÍ	47
8.1.5	METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ BEZ VÁŽENÍ DAT	47
8.1.6	METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ S POUŽITÍM VÁŽENÍ DAT DLE MÜLLERA A URBANA	48
8.1.7	VÝBĚR METODY PRO URČENÍ PRAHOVÉ HODNOTY	48
8.2	PARAMETRY SIGNÁLŮ	48
8.2.1	EXPERIMENT 7	48
8.2.2	EXPERIMENT 8	51
8.3	PROGRAM PRO TEST	53
8.4	POSLECHOVÝ TEST	55
<b>9.</b>	<b>VYHODNOCENÍ DRUHÉ ČÁSTI PSYCHOAKUSTICKÉHO EXPERIMENTU</b>	<b>57</b>
9.1	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 7	57
9.1.1	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	58
9.1.2	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	59
9.1.3	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	60
9.1.4	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	61
9.1.5	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	62
9.1.6	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	63
9.1.7	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	64
9.1.8	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	65
9.1.9	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	66
9.1.10	SHRnutí VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 7	67
9.2	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 8	67
9.2.1	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	68
9.2.2	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	69
9.2.3	KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	70
9.2.4	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	71
9.2.5	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	72
9.2.6	POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	73
9.2.7	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH	74
9.2.8	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH	75
9.2.9	VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH	76
9.2.10	SHRnutí VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 8	77
<b>10.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>79</b>
	<b>LITERATURA</b>	<b>81</b>
	<b>PUBLIKACE AUTORKY</b>	<b>83</b>
	<b>OBSAH DATOVÉ PŘÍLOHY</b>	<b>85</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Struktura lidského ucha, převzato z [11].....	6
Obrázek 2.2 Rezonance zvukovodu, převzato z [12] .....	6
Obrázek 2.3 Bazilární membrána, převzato z [15]. .....	7
Obrázek 5.1 Příklad amplitudového a fázového spektra signálu. ....	17
Obrázek 6.1 Fázová spektra signálů 11 a 12. ....	20
Obrázek 6.2 Amplitudová spektra signálů 11, 13, 14, 15. ....	20
Obrázek 6.3 Fázová spektra signálů 21 a 22. ....	21
Obrázek 6.4 Amplitudová spektra signálů 21, 23, 24, 25. ....	22
Obrázek 6.5 Fázová spektra signálů 31, 32, 33, 34, 35. ....	23
Obrázek 6.6 Příklad modifikace fázového spektra exponenciální funkcí. ....	24
Obrázek 6.7 Ukázka přípravy vzorků. ....	25
Obrázek 6.8 Generování pořadí vzorků. ....	26
Obrázek 6.9 Předtestový dotazník. ....	26
Obrázek 6.10 Vyhodnocení dotazníku. ....	27
Obrázek 6.11 Záloha výsledků. ....	27
Obrázek 6.12 Testovací okno. ....	28
Obrázek 6.13 Výsledky testu. ....	28
Obrázek 7.1 Výsledky experimentu 1. ....	34
Obrázek 7.2 Výsledky experimentu 2. ....	36
Obrázek 7.3 Výsledky experimentu 3. ....	38
Obrázek 7.4 Výsledky experimentu 4. ....	40
Obrázek 7.5 Výsledky experimentu 5.7. ....	41
Obrázek 7.6 Výsledky experimentu 6. ....	43
Obrázek 8.1 Příklad fázové modifikace pro experiment 8 - útlum fázového spektra lineární funkcí. ....	51
Obrázek 8.2 Hlavní okno programu. ....	53
Obrázek 8.3 Hlavní okno – anglická verze. ....	54
Obrázek 8.4 Volba jazyka. ....	54
Obrázek 8.5 Testovací okno. ....	55
Obrázek 9.1 Amplitudové spektrum signálu kastaněty. ....	58
Obrázek 9.2 Amplitudové spektrum signálu kastaněty. ....	68





## SEZNAM TABULEK

Tabulka 4.1 Guilfordovo třídění psychologických a škálovacích metod, převzato z [7].....	11
Tabulka 4.2 Porovnání psychologických měřicích metod v psychoakustice, převzato z [7].....	15
Tabulka 6.1 Parametry signálů použitých v experimentu 1.....	20
Tabulka 6.2 Parametry signálů použitých v experimentu 2.....	21
Tabulka 6.3 Parametry signálů použitých v experimentu 3.....	22
Tabulka 6.4 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 4. ....	24
Tabulka 6.5 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 5. ....	24
Tabulka 6.6 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 6. ....	24
Tabulka 7.1 Parametry signálů použitých v experimentu 1.....	33
Tabulka 7.2 Naměřené hodnoty – experiment 1.....	33
Tabulka 7.3 Analýza rozptylu – experiment 1.....	34
Tabulka 7.4 Multikomparativní testy – experiment 1.....	34
Tabulka 7.5 Parametry signálů použitých v experimentu 2.....	35
Tabulka 7.6 Naměřené hodnoty - experiment 2. ....	35
Tabulka 7.7 Analýza rozptylu - experiment 2. ....	36
Tabulka 7.8 Multikomparativní testy - experiment 2. ....	36
Tabulka 7.9 Parametry signálů použitých v experimentu 3.....	37
Tabulka 7.10 Naměřené hodnoty - experiment 3. ....	37
Tabulka 7.11 Analýza rozptylu - experiment 3. ....	38
Tabulka 7.12 Multikomparativní testy - experiment 3. ....	38
Tabulka 7.13 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 4. ....	39
Tabulka 7.14 Naměřené hodnoty - experiment 4. ....	39
Tabulka 7.15 Analýza rozptylu - experiment 4. ....	40
Tabulka 7.16 Multikomparativní testy - experiment 4. ....	40
Tabulka 7.17 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 5. ....	41
Tabulka 7.18 Naměřené hodnoty - experiment 5. ....	41
Tabulka 7.19 Analýza rozptylu - experiment 5. ....	42
Tabulka 7.20 Multikomparativní testy - experiment 5. ....	42
Tabulka 7.21 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 6. ....	43
Tabulka 7.22 Naměřené hodnoty - experiment 6. ....	43
Tabulka 7.23 Analýza rozptylu - experiment 6. ....	44
Tabulka 7.24 Multikomparativní testy - experiment 6. ....	44
Tabulka 8.1 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, nízké frekvence. ....	49
Tabulka 8.2 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, střední frekvence. ....	49
Tabulka 8.3 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, vysoké frekvence. ....	49
Tabulka 8.4 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, nízké frekvence. ....	50
Tabulka 8.5 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, střední frekvence. ....	50
Tabulka 8.6 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, vysoké frekvence. ....	50
Tabulka 8.7 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, nízké frekvence. ....	50
Tabulka 8.8 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, střední frekvence. ....	50
Tabulka 8.9 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, vysoké frekvence. ....	50
Tabulka 8.10 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, nízké frekvence. ....	51
Tabulka 8.11 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, střední frekvence. ....	52
Tabulka 8.12 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, vysoké frekvence. ....	52
Tabulka 8.13 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, nízké frekvence. ....	52
Tabulka 8.14 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, střední frekvence. ....	52
Tabulka 8.15 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, vysoké frekvence. ....	52
Tabulka 8.16 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, nízké frekvence. ....	52
Tabulka 8.17 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, střední frekvence. ....	52
Tabulka 8.18 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, vysoké frekvence. ....	53

---

Tabulka 9.1 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, nízké frekvence.....	58
Tabulka 9.2 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, střední frekvence.....	59
Tabulka 9.3 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - kastaněty, střední frekvence.....	59
Tabulka 9.4 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, vysoké frekvence.....	60
Tabulka 9.5 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - kastaněty, vysoké frekvence.....	60
Tabulka 9.6 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, nízké frekvence.....	61
Tabulka 9.7 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, nízké frekvence.....	61
Tabulka 9.8 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, střední frekvence.....	62
Tabulka 9.9 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, střední frekvence.....	62
Tabulka 9.10 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, vysoké frekvence.....	63
Tabulka 9.11 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, vysoké frekvence.....	63
Tabulka 9.12 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, nízké frekvence.....	64
Tabulka 9.13 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, nízké frekvence.....	64
Tabulka 9.14 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, střední frekvence.....	65
Tabulka 9.15 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, střední frekvence.....	65
Tabulka 9.16 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, vysoké frekvence.....	66
Tabulka 9.17 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, vysoké frekvence.....	66
Tabulka 9.18 Výsledky experimentu 7.....	67
Tabulka 9.19 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, nízké frekvence.....	68
Tabulka 9.20 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, střední frekvence.....	69
Tabulka 9.21 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - kastaněty, střední frekvence.....	69
Tabulka 9.22 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, vysoké frekvence.....	70
Tabulka 9.23 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - kastaněty, vysoké frekvence.....	70
Tabulka 9.24 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, nízké frekvence.....	71
Tabulka 9.25 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, nízké frekvence.....	71
Tabulka 9.26 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, střední frekvence.....	72
Tabulka 9.27 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, střední frekvence.....	72
Tabulka 9.28 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, vysoké frekvence.....	73
Tabulka 9.29 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, vysoké frekvence.....	73
Tabulka 9.30 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, nízké frekvence.....	74
Tabulka 9.31 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - vážná hudba, nízké frekvence.....	74
Tabulka 9.32 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, střední frekvence.....	75
Tabulka 9.33 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - vážná hudba, střední frekvence.....	75
Tabulka 9.34 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, vysoké frekvence.....	76
Tabulka 9.35 Zpracování dat experimentu 8 metodou sčítání – vážná hudba, vysoké frekvence.....	76
Tabulka 9.36 Výsledky experimentu 8.....	77
Tabulka 10.1 Výsledky experimentu 7 a 8.....	80

## ÚVOD

Fázové spektrum bylo po mnoho let považováno za nepříliš významnou složku zvukových signálů, která nemá na výsledný sluchový vjem výrazný vliv. Lidské ucho označil za fázově hluché již v roce 1845 George Simon Ohm [1]. Další experimenty provedl na základě Ohmových předpokladů Hermann Helmholtz [2], který potvrdil Ohmovu teorii o nulovém vlivu fázových změn na sluchový vjem. Tato tvrzení byla později mnoha vědci vyvrácena. Nedávné výzkumy prokázaly, že lidský sluch je citlivý na změny fázového spektra především u potlesku a řeči [3]. Za důvod, proč byla tato tvrzení považována dlouhé roky za správná, je možné považovat fakt, že fázové změny zvukového signálu v mnohých případech nezpůsobují sluchově vnímatelný rozdíl. Novější výzkumy dokazují, že změna fáze signálu se projeví především v barvě zvuku [4], [5]. Účinnou metodou, jak tato stanoviska ověřit, je provedení psychoakustických experimentů na skupině posluchačů a otestovat tak několik různě fázově modifikovaných zvukových signálů.



# 1. PSYCHOAKUSTIKA

Psychologická akustika, zkráceně psychoakustika, se zabývá vztahy mezi fyzikálními podněty a sluchovými vjemy a tvoří základ pro vytvoření psychoakustických subjektivních měření. Jedná se o mezioborovou disciplínu, která kromě psychologie a akustiky propojuje i celou řadu dalších oborů. Mezi tyto obory patří neurofyzilogie, teorie signálů, statistika, kybernetika, estetika a jiné. Cílem psychoakustiky je vyšetřování veškerých účinků zvukových dějů na psychiku člověka a nalezení kvantitativních vztahů mezi akustickými podněty a sluchovými vjemy posluchačů [6]. Využitím psychoakustiky lze tak zkoumat široké spektrum otázek. Z tohoto důvodu patří v dnešní době k velmi frekventovaným termínům v akustice a v příbuzných technických oborech. Mezi typické příklady aplikace psychoakustiky patří posuzování zvukové kvality hudebních nástrojů, zkoumání rušivých účinků hluku v automobilu, nebo měření prahů slyšení [7]. Kompresní metody zvukových souborů jsou založeny na psychoakustických principech. Díky psychoakustickému modelu lidského sluchu lze tak odhalit data, která jsou pro výsledný sluchový vjem nadbytečná a je tedy možné snížení velikosti zvukových souborů bez zhoršení jejich subjektivní poslechové kvality [8]. V této práci budou psychoakustické subjektivní testy využívány pro ověření vlivu fázové změny hudebních signálů a určení právě rozpoznatelného rozdílu těchto změn.



## 2. LIDSKÝ SLUCHOVÝ SYSTÉM

Zvuk, který je zodpovědný za sluchový vjem, představují kmitavé pohyby hmoty v pevném, kapalném a plynném skupenství (nejčastěji částic vzduchu). Při kmitavém pohybu se hmotný bod nebo celá soustava hmotných bodů střídavě pohybuje kolem své rovnovážné polohy. Podmínkou vzniku kmitání je existence pružných vazeb mezi body. Jako vlnění je označováno kmitání vzniklé následkem vlastní pružnosti, kdy jsou výchylky jednotlivých bodů při kmitání různé. Důsledkem kmitavého pohybu částic v bezprostřední vzdálenosti od lidského ucha je sluchový vjem. Sluchový orgán slouží k přenosu zvukové informace do lidského vědomí a ovlivňuje kvantitativní i kvalitativní stránku sluchového vjemu zvuku [9].

### 2.1 PRINCIP VZNIKU SLUCHOVÉHO VJEMU

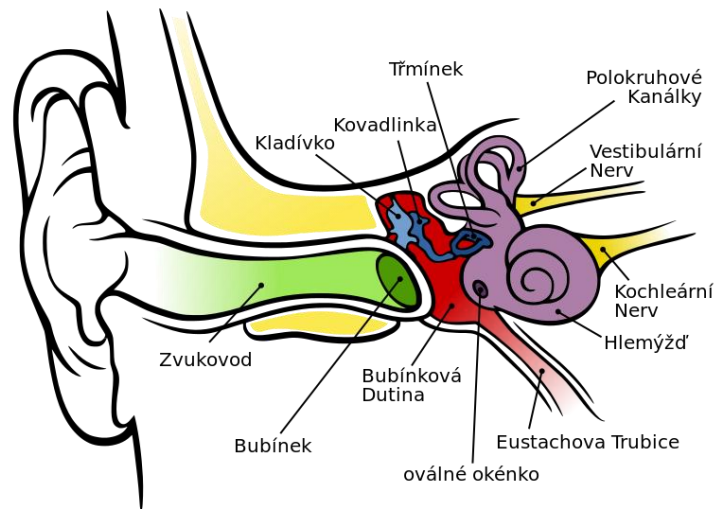
Lidské ucho zajišťuje převod zvukových vln na sluchový vjem. Tradičně je rozděleno na tři hlavní části – vnější, střední a vnitřní. Vnější část ucha pracuje jako tlakový přijímač zvuku. Jeho funkce spočívá především ve vyvolání pohybu bubínku akustických tlakem a přenosu vzniklých vibrací zvukovodem. Tyto vibrace jsou následně přenášeny třemi kůstkami ve středním uchu do hlemýžďe. Ve hlemýždi jsou mechanické vibrace přeměněny na nervové pulsy vláskových buněk umístěných tonotopicky podél bazilární membrány. To znamená, že vláskové buňky citlivé na vysoké frekvence se nacházejí nejbližší místu, ve kterém vibrace vstupují do vnitřního ucha. Naopak vláskové buňky citlivé na nižší frekvence jsou umístěné dále od přicházejících vibrací. Buňky pro vysoké frekvence reagují dříve než buňky citlivé na nízké frekvence. Z tohoto důvodu je vytvořeno skupinové zpoždění závislé na frekvenci, které je částečně kompenzováno během vyšší úrovně zpracování. Nicméně neexistují jednoznačné údaje o zpožděních sluchového systému. V poslední část vzniku sluchového vjemu vláskové buňky přenášejí informaci skrz kochleární nerv do mozkového kmenu [5].

### 2.2 STRUKTURA LIDSKÉHO UCHA

Průchod zvukové informace jednotlivými částmi ucha má za následek různé podoby zvukové informace. Kmitavý pohyb částic vzduchu ve vnějším uchu je měněn na mechanické vibrace díky převodnímu systému středního ucha. V části středního ucha je přenos zvukové informace zajištěn šířením vln v kapalině a následně se mění na elektrochemické děje ve smyslových buňkách. Zvuková informace se dále šíří nervovými vlákny do sluchové kůry mozku po sluchové dráze [9].

Lidské ucho je tradičně děleno na tři části [10]:

- Vnější ucho – boltec, zvukovod, bubínek
- Střední ucho – Eustachova trubice, sluchové kůstky
- Vnitřní ucho – oválné okénko, hlemýžď (kochlea)

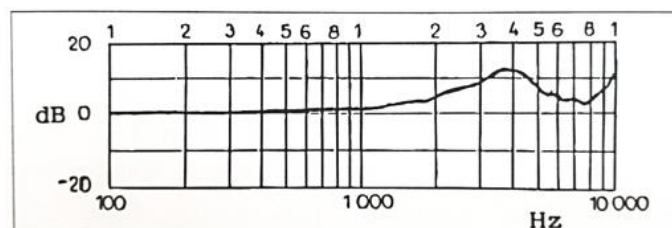


Obrázek 2.1 Struktura lidského ucha, převzato z [11].

### 2.2.1 VNĚJŠÍ UCHO

Vnější ucho se skládá z viditelného ušního boltce a zvukovodu, který je zakončen blanou bubínku. Ušní boltce představuje elastickou chrupavčitou část (s výjimkou ušního lalůčku, který je tvořen tukovou tkání), jejímž hlavním úkolem je směřování akustických vln do zvukovodu [10]. Záhyby boltce slouží pro odhad vzdálenosti zdroje zvuku a jeho lokalizaci v horizontálním a vertikálním směru. Při vysokých frekvencích nad 500 Hz se uplatňuje směrový efekt ušního boltce, který je ještě znásoben akustickým stínem hlavy a šikmou polohou zvukovodu [9]. Zvukovod představuje trubici s nepravidelným eliptickým průřezem. Její délka dosahuje u dospělého člověka 25 až 35 mm a její průměr přibližně 7 mm. Vnější část trubice je tvořena chrupavčitými stěnami, které představují jednu třetinu až polovinu zvukovodu. Zbytek trubice je tvořen kostěnými stěnami. Kůže pokrývající zvukovod obsahuje mazové žlázy. Důležitou funkcí zvukovodu je ochrana dalších částí ucha před poškozením. Na konci zvukovodu se nachází velmi pružná vazivová blanka o tloušťce přibližně 0,1 mm, která je nazývána bubínek. Ten tvoří pomyslný přechod mezi vnějším a středním uchem. Zvukové vlny přicházející zvukovodem rozkmitávají membránu bubínku a následně jsou přenášeny pomocí kůstek středního ucha do dalších částí sluchového aparátu [9], [12].

Díky rezonančnímu účinku zvukovodu dochází ke zvýraznění přenosu frekvencí v oblasti kolem 3 až 4 kHz o přibližně 15 dB. Průběh rezonance zvukovodu je znázorněn na obrázku 2.2. Zvýraznění tohoto frekvenčního pásma je velmi důležité pro srozumitelnost řeči. Relativně plochá charakteristika je důsledkem absorpce velké části zvukové energie bubínkem. Další příčinou nezanedbatelných ztrát zvukové energie je tření o stěny zvukovodu [9], [13].



Obrázek 2.2 Rezonance zvukovodu, převzato z [12]



## 2.2.2 STŘEDNÍ UCHO

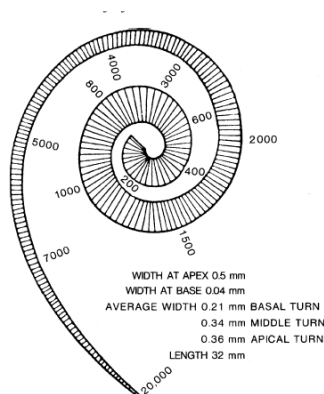
Střední ucho se nachází v dutině nepravidelného tvaru umístěné za bubínkem. Tato dutina je vyplněna vzduchem a vystlána sliznicí. Skládá se ze tří sluchových kůstek, jejich propojovacích vazů a Eustachovy trubice. Konec této části ucha a oddělení středního a vnitřního ucha reprezentuje oválné a okrouhlé okénko [9]. Celkový objem dutiny středního je často udáván okolo  $2 \text{ cm}^3$ , ale ve skutečnosti se objem u jednotlivých osob značně liší [14]. Funkci vyrovnávání tlaku vzduchu s vnějším prostředím vykonává při každém polknutí Eustachova trubice, která spojuje střední ucho s nosohltanem.

Tři sluchové kůstky (kladívko, kovadlinka, třmínek) jsou umístěny ve středoušní dutině. První kůstka (kladívko) je z jedné strany spojena s bubínkem, z druhé přes téměř pevný kloub s kovadlinkou. Na její výběžek navazuje třmínek, který je srostlý s blankou oválného okénka. Kmitání oválného okénka uvádí do pohybu kapalinu vnitřního ucha.

Funkcí tří sluchových kůstek je převod kmitů z vnějšího vzdušného prostředí do vnitřního ucha, které obsahuje kapalinu. Kmitání bubínku o velké výchylce a malé síle je tak přeměněno na kmitání oválného okénka o malé výchylce a velké síle. Dochází tak k transformaci tlaku z velké plochy bubínku na malou plochu ploténky třmínku v poměru 1:18. Amplituda kmitů se na těchto třech kůstkách zmenšuje, ale zvětšuje se akustická impedance v poměru 1:336. Díky tomuto mechanickému systému středního ucha je zabráněno ztrátám, které by vznikly v případě přímého přechodu zvukového vlnění ze vzduchu do kapaliny [9], [14].

## 2.2.3 VNITŘNÍ UCHO

Vnitřní a střední část ucha jsou od sebe navzájem odděleny oválným okénkem. Vnitřní ucho obklopuje nejtvrďší kost v lidském těle (kost skalní) a vytváří tak kostěný labyrint, jehož prostor je zcela vyplněn tekutinou – endolymfou a perilymfou [13]. Vnitřní ucho se skládá z hlemýždě (kochley) a ústrojí rovnováhy (statokinetického a vestibulárního) [10]. Hlemýžděm je nazývána trubice stočená do dvou a půl spirálovitých stoupajících závitů. Její celková délka dosahuje průměrně 35 mm. Kochleární přepážkou je trubice rozdělena po délce na dvě patra. Cortiho ústrojí sloužící jako smyslový orgán se nalézá v kanálku na kochleární přepážce. Od spodního patra trubice hlemýždě je Cortiho ústrojí odděleno bazilární membránou, která je pokryta smyslovými vláskovými buňkami. Podrážděním smyslových buněk dochází ke vzniku nervových pulsů a zvuková informace je následně přenesena skrz kochleární nerv do mozkového kmenu. Schéma bazilární membrány na Obrázek 2.3 znázorňuje, ve kterých částech membrány jsou excitovány příslušné buňky danou frekvencí [9], [15].



Obrázek 2.3 Bazilární membrána, převzato z [15].



### 3. STUDIE VLIVU FÁZOVÝCH ZMĚN NA SLUCHOVÝ VJEM

V současné době existuje několik studií vlivu fázových změn na sluchový vjem. Výsledky jednotlivých testů se ale od sebe vzájemně liší. V této kapitole je uvedeno několik těchto studií a výsledných stanovisek ohledně vlivu fázového spektra zvukového signálu na lidský sluchový vjem.

#### 3.1 STARŠÍ STUDIE

Se studií vlivu změn fázového spektra na sluchový vjem přišel jako první v roce 1845 Georg Simon Ohm [1]. Ve své práci stanovil, že podoba fázového spektra není pro sluchový vjem podstatná.

O několik let později (roku 1877) experimentoval na základě Ohmova předpokladu Hermann L. F. Helmholtz [2]. Jeho experiment spočíval ve změně fáze prvních dvanácti harmonických. Představoval si hlemýžď lidského ucha jako spektrální analyzátor a tvrdil, že velikosti jednotlivých frekvenčních složek jsou jediné faktory, které ovlivňují vnímání hudebních tónů. Jeho konkrétní tvrzení zní: „*Vnímaná kvalita zvuku není závislá na fázi, ale pouze na existenci jednotlivých základních frekvencí v signálu.*“ [16]. Potvrdil tak Ohmovo stanovisko, že rozdíly ve fázovém spektru zvuku nemají na sluchové vnímání žádný vliv. Tato tvrzení však byla později označována za nesprávná. Mezi vědce, kteří dále zkoumali vliv fáze zvuku na sluchový vjem patří T. Seebeck, Plomp a Steeneken, Bislen a Carlson, M. S. Patterson [5].

#### 3.2 NOVĚJŠÍ STUDIE

Helmholtzovy experimenty byly roku 1987 M. S. Pattersonem onačeny za nesprávné [5]. Domníval se, že akustické vlastnosti místnosti mohly při Helmholtzových experimentech eliminovat existující rozdíl fázově modifikovaného zvukového signálu. Další studie také prokázaly, že změny fázového spektra signálu mají vliv na vnímané zabarvení zvuku [4], [5]. V následujícím textu je uveden popis několika konkrétních experimentů.

Plomp a Steeneken zkoumali vliv fázového spektra zvukového signálu na vnímané zabarvení zvuku provedením několika poslechových testů. V každém testu byly porovnávány dvojice zvukových signálů s identickým amplitudovým spektrem a odlišným fázovým spektrem. Testovanými signály byly harmonické komplexní tóny, které tvořilo prvních deset harmonických. Fáze jednotlivých harmonických složek referenčního signálu byly stejné. V případě modifikovaných zvukových signálů byl vytvořen fázový posuv každých dvou sousedních harmonických složek 90°. Výsledky testů prokázaly, že tóny se střídavými sinusovými a kosinusovými složkami vykazovaly významný rozdíl ve srovnání se signály, které obsahovaly pouze sinové nebo kosinové složky [4].

Reference:

$$x_{ref}(t) = \cos(2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 2f_0 t) + \dots + \frac{1}{10} \cos(2\pi 10f_0 t) \quad (3.1)$$

Vzorek:

$$x_{phase}(t) = \sin(2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 2f_0 t) + \dots + \frac{1}{9} \sin(2\pi 9f_0 t) + \frac{1}{10} \cos(2\pi 10f_0 t) \quad (3.2)$$

V druhé části jejich experimentu se snažili fázovou změnu zvukového signálu z předešlého testu kvantitativně vyjádřit změnou strmosti amplitudového spektra. Došli tak k závěru, že vliv fázové změny na barevné zabarvení signálu je kvantitativně menší než změna strmosti amplitudového

spektra o 2 dB/okt a zároveň určili, že vliv fázové změny je menší pro vysoké frekvence než pro frekvence nízké [4].

Další podobné testy fázových změn provedl M. S. Patterson [17]. Zaměřil se na vliv lokální a globální fázové modifikace. Lokální změny signálů představovaly změnu fázového spektra v ERB (equivalent rectangular bandwidth) pásmech. Změna fáze spočívala v posunu každé druhé harmonické složky o stejný posuv  $D$ . Takto fázově modifikované signály byly při testech porovnávány s referenčními signály obsahující součet kosinových složek.

Reference:

$$x_{ref}(t) = \cos(2\pi f_0 t) + \cos(2\pi 2f_0 t) + \dots + \cos(2\pi N f_0 t) \quad (3.3)$$

Vzorek:

$$\begin{aligned} x_{phase}(t) = & \cos(2\pi f_0 t) + \cos(2\pi 2f_0 t + D) + \dots \\ & \dots + \cos(2\pi(N-1)f_0 t) + \cos(2\pi N f_0 t + D) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Cílem tohoto experimentu bylo nalézt hodnotu  $D$ , která by představovala právě rozpoznatelný rozdíl mezi porovnávanými signály. Bylo zjištěno, že hodnota  $D$  vyjadřující vnímatelný rozdíl je závislá na intenzitě signálu a na základní frekvenci  $f_0$ . V některých případech byla hodnota  $D$  rovna 15 stupňů, zatímco v jiném více než 60 stupňů. V další části experimentu byl zkoumán vliv globálních fázových změn. Pro tento testy byly použity zvukové signály, jejichž harmonické byly postupně posunuty v čase. Vysoké frekvenční složky testovaných signálů byly fázově posunuty oproti nízkým frekvencím a naopak. Bylo zjištěno, že globální fázové změny nejsou vnímatelné, pokud je časové zpoždění harmonických menší než 4-5 ms. Schopnost rozlišit rozdíl mezi testovanými signály byla v tomto případě silně závislá na frekvenčním pásmu, ve kterém byla fáze modifikována. Tato schopnost se naopak projevila jako nezávislá na ostatních vlastnostech signálu.

Vědci Moore a Glasberg se věnovali experimentům pro ověření schopnosti detekce fázové změny jedné harmonické složky v komplexním tónu [3]. Byly použity komplexní tóny obsahující prvních 20 harmonických. Fázově posunuta byla vždy pouze jedna harmonická složka. Cílem bylo zjistit, jaké je minimální požadované množství fázového posunu, aby bylo dosaženo vnímatelného rozdílu. V některých případech byl tak určen fázový posun s hodnotou 2 až 4 stupňů.

## 4. PSYCHOAKUSTICKÉ METODY MĚŘENÍ

Tato kapitola je převzata z mé bakalářské práce [18], která se zabývá měřicími metodami pro psychoakustické testy.

Pro rozdělení psychoakustických metod využíváme klasifikaci psychofyzických a škálovacích metod, kterou vytvořil Joy Paul Guilford [19]. Podstata Guilfordova rozdělení psychoakustických metod měření se zakládá na dvou klasifikačních principech. Jedním z těchto dvou principů je hlavní cíl experimentátora při měření, kterým může být určování ekvivalentních podnětů, stanovení pořadí podnětů, vytvoření stupnice se společnou jednotkou nebo dosažení nejvyššího stupně škálování na poměrové škále. Druhým principem jsou různé způsoby měření, které jsou rozděleny na přímé a nepřímé metody. Měření založené na přímém pozorování měřených objektů je označováno jako metoda přímá. Nepřímé metody jsou založeny na pravděpodobnosti, která je považována za záruku větší spolehlivosti měření než při použití přímých metod (přímého pozorování měřených objektů). Guilfordovo rozdělení metod je přehledněji znázorněno v Tabulka 4.1 Guilfordovo třídění psychologických a škálovacích metod, převzata z . [7]

Tabulka 4.1 Guilfordovo třídění psychologických a škálovacích metod, převzata z [7]

Hlavní cíl měření	Přímé metody	Nepřímé metody
<b>Určování ekvivalence podnětů</b>	Metoda průměrné chyby Metoda minimálních změn	Metoda konstantních rozdílů Metoda párového srovnávání
<b>Určování pořadí podnětů</b>	Metoda seřazování do pořadí Metoda následných kategorií Metoda posuzování na subjektivních posuzovacích škálách	Metoda párového srovnávání Metoda rozvinutí dat
<b>Určování rovnosti intervalů</b>	Metoda právě postřehnutelných rozdílů Metoda stejných vzdáleností Metoda zdánlivě stejných intervalů	Metoda párového srovnávání Metoda seřazování do pořadí Metoda triadického srovnávání Metoda čtveřic Metoda následných kategorií Metoda podobných reakcí Metoda vyvážených hodnot
<b>Určování poměrů</b>	Metoda dělení na části Metoda konstantního součtu	Metoda srovnávání poměrů

Mezi nejčastěji používané psychoakustické metody měření patří:

- Metoda párového srovnávání
- Metody posuzování na subjektivních posuzovacích škálách
- Metoda konstantních podnětů
- Metoda seřazování do pořadí
- Metoda nastavování zvukových podnětů
- Metoda sémantického diferenciálu
- Metoda měření podobnosti zvukových podnětů

## 4.1 PÁROVÉ SROVNÁVÁNÍ ZVUKOVÝCH PODNĚTŮ

Metoda párového srovnání zvukových podnětů se řadí mezi nejstarší a také technicky i teoreticky nejpropracovanější psychometrické metody. Důležitou předností této metody je její široká použitelnost pro škálování různých psychologických proměnných. Hlavní nevýhoda metody se projevuje především při měření velkého počtu objektů, které je velmi náročné na čas a trpělivost testujících posluchačů [7].

Princip metody spočívá v postupném párovém srovnávání každého z celkem posuzovaných podnětů se všemi zbývajících  $n - 1$  podněty. Při každém srovnání posluchač označí jeden z dvojice právě posuzovaných podnětů  $S_j, S_k$  za dominantní v předem určené vlastnosti. Příkladem takového srovnání může být označení, který ze zvukových podnětů je vyšší, ostřejší, hlasitější apod. než druhý podnět. Matematicky se odpovědi posluchačů vyjadřují pomocí nerovností jako  $S_j > S_k$  (dominance podnětu  $j$  nad podnětem  $k$ ) nebo jako  $S_j < S_k$  (dominance podnětu  $k$  nad podnětem  $j$ ). Při testování je obvykle používána technika zvaná nucená volba, kdy se posluchači nedovoluje, aby oba podněty označil v posuzované vlastnosti jako stejné a musí jednoznačně rozhodnout, který z dvojice podnětů  $S_j, S_k$  je dominantní. Možnost neutrálního soudu  $S_j = S_k$  se připouští při testování podnětů s velmi malým rozdílem v posuzované vlastnosti. V takových situacích může nastat, že posluchač nedokáže rozhodnout pro jeden podnět a může pouze hádat, který podnět je dominantní. Pokud by k tomuto docházelo během testu opakovaně, hrozí, že někteří posluchači budou deprimováni a ztratí tak motivaci k hodnocení. Důsledkem toho pak dojde ke snížení kvality jejich hodnocení i při posuzování méně náročných dvojic podnětů. Paradoxně však některým posluchačům možnost neutrálního soudu snižuje kvalitu jejich soudů. Posluchači si totiž testování zjednoduší tím, že u všech náročněji posuzovaných dvojic podnětů zvolí neutrální soud. Při zpracování neutrálních soudů je možné použít dva způsoby. První možností je připsat půl bodu ve prospěch každého z obou podnětů páru. Druhou možností je rozdělit body za neutrální soudy mezi podněty  $S_j$  a  $S_k$  v poměru výsledných četností soudů  $S_j > S_k$  a soudů  $S_j < S_k$ , které zjistíme při opakovaném srovnávání.

Pokud nebereme v úvahu pořadí podnětů v párech, vyjadřuje celkový počet párů výraz

$$C_2(n) = \frac{n(n-1)}{2} = 0,5(n^2 - n), \quad (4.1)$$

který vyjadřuje kombinaci 2. třídy z  $n$  prvků bez opakování. Bereme-li pořadí podnětů v párech v úvahu, bude celkový počet párů dán výrazem

$$V_2(n) = n(n - 1) = n^2 - n, \quad (4.2)$$

což je celkový počet variací 2. třídy z  $n$  prvků bez opakování. Ze vzorců  $C_2(n) = \frac{n(n-1)}{2} = 0,5(n^2 - n)$ , (4.1) a  $V_2(n) = n(n - 1) = n^2 - n$ , (4.2) je zřejmé, že celkový počet párů podnětů narůstá přibližně s druhou mocninou počtu podnětů. Jelikož zvukové podněty jsou posluchači předkládány v časovém sledu neboli sukcesivně, je nutné uvažovat vliv časového pořadí podnětů na výsledek. Tento vliv lze snížit tím, že posluchačům předložíme každou dvojici podnětů dvakrát, vždy v opačném pořadí. Z porovnání rovnic  $C_2(n) = \frac{n(n-1)}{2} = 0,5(n^2 - n)$ ,

(4.1) a  $V_2(n) = n(n - 1) = n^2 - n$ , (4.2) je ale zřejmé, že tímto postupem dojde ke zdvojnásobení počtu celkového počtu párů. Při experimentu se proto posluchačům předkládá každý pár podnětů jen jednou a vliv časového pořadí na výsledek se snažíme potlačit správným časovým uspořádáním podnětů.

Aplikace metody párového srovnávání je možná některou z těchto tří možností, přičemž při řešení praktických problémů v psychoakustice se obvykle využívá první uvedený způsob.

- několik osob několikrát opakovaně posuzuje všechny páry podnětů
- jedna nebo několik málo osob mnohokrát opakovaně posuzuje všechny páry podnětů
- mnoho pokusných osob posuzuje všechny páry podnětů jen jednou

## 4.2 POSUZOVÁNÍ ZVUKOVÝCH PODNĚTŮ NA SUBJEKTIVNÍCH POSUZOVACÍCH ŠKÁLÁCH

Metoda posuzování zvukových podnětů na subjektivních posuzovacích škálách je nejoblíbenější a nejčastěji využívanou psychometrickou metodou. Na rozdíl od metody párového srovnávání zvukových podnětů je velmi rychlá a snadno použitelná i při velkém množství posuzovaných objektů. U této metody je však nezbytná značná opatrnost a důslednost při přípravě testu i při vyhodnocování výsledků testu, aby nedošlo ke zkreslení výsledků měření [7].

Podstatou metody je umístění podnětu na spojitém psychologickém prostředí nebo jeho zařazení do některé z kategorií, na které je toto prostředí rozděleno. Předpokládá se, že podněty se posuzují podle jedné dílčí psychologické dimenze nebo podle celkového dojmu, který je výsledkem působení několika dimenzí, jejichž váhy a vzájemné vazby jsou relativně stabilní. V případě, kdy není tento předpoklad splněn, mohou vést výsledky posuzování k chybným závěrům.

Pro posuzování zvukových podnětů na subjektivních škálách podle Guilfordova rozdělení připadají v úvahu především škály numerické a grafické.

### Numerické posuzovací škály

Numerické posuzovací škály jsou tvořeny posloupností celých čísel, uspořádaných na několikastupňové škále. Všechny nebo alespoň některé stupně škály jsou doplněny slovním popisem. Posluchač tak přiřazuje každému podnětu číslo na stupnici, jehož slovní popis nejlépe odpovídá vyvolanému vjemu. Při návrhu numerické škály je důležité dbát na to, aby přírůstky číselných hodnot co nejvíce odpovídaly významovým rozdílům slovních popisů. Znamená to, že měření by mělo probíhat na úrovni intervalové škály. Jako příklad klasické numerické škály lze uvést pětistupňovou školní stupnici, která slouží k hodnocení prospěchu. V některých případech se numerická škála posluchačům předkládá pouze se slovním popisem, tedy bez čísel. Posluchač označí jen slovní kategorii, která nejvíce odpovídá jeho vjemu a čísla si experimentátor doplní při vyhodnocování výsledků sám. Pro dosažení co nejlepší rovnosti psychologických intervalů je ale vhodnější posluchačům předkládat numerickou stupnici jak se slovním popisem, tak s čísly.

### Grafické posuzovací škály

Grafická škála je nejpoužívanější formou subjektivních posuzovacích škál. Práce s ní je rychlá a pro posluchače zajímavější a jednodušší než práce s numerickou posuzovací škálou. Důležitou výhodou je také to, že lze dosáhnout maximálního rozlišení, kterého je hodnotící posluchač schopen. Úkolem posluchače je umístit posuzovaný podnět na dostatečně dlouhé úsečce, která znázorňuje kontinuum škálované psychologické proměnné. Grafické škály se od sebe mohou lišit délkou, orientací (vodorovně nebo svisle), měřítkem, slovními popisy referenčních úseků nebo jednotlivých bodů. Doporučení a pravidla, jak tvořit grafické škály musí být respektována.

## 4.3 METODA KONSTANTNÍCH PODNĚTŮ

Společně s metodou konstantních rozdílů podnětů patří metoda konstantních podnětů do skupiny takzvaných konstantních metod. Metody této skupiny jsou považovány jako nejpřesnější a nejdříve aplikovatelné. Na rozdíl od výsledků jiných metod neleží výsledné hodnoty měření při použití některé konstantní metody na psychologické (subjektivní) škále, ale na stupnici příslušné podnětové

(fyzikální) proměnné. Metoda konstantních podnětů slouží k určování absolutních prahů, metodu konstantních rozdílů podnětů využíváme pro určení relativních rozdílových prahů. Pro psychoakustická měření se mnohem častěji využívá metoda konstantních podnětů, například pro zjištění prahu slyšení, prahu rušivosti zvuku apod. [7].

Podstatou metody je přiřazování podnětům jednoho z dvojice symbolů „1“, „0“ nebo „+“, „-“. Zvukové podněty jsou opakovaně předkládány pokusné osobě, která přiřazením symbolu rozhodne, zda měl či neměl podnět zjišťovanou vlastnost (zda byl pokusnou osobou slyšitelný či ne, zda jej posluchač vnímal či nevnímal jako rušivý, zkreslený, tichý či hlasitý). Přiřazením symbolu „1“ nebo „+“ posluchač vyjadřuje, že podnět zjišťovanou vlastnost má, přiřazením symbolu „0“ nebo „-“ naopak. Experimentátor by měl připravit test tak, aby přibližně polovina vybraných podnětů ležela na škále podnětové proměnné  $S$  nad předpokládanou hodnotou absolutního prahu  $S_{0,5}$ , zatímco aby druhá polovina vybraných podnětů ležela pod hodnotou předpokládaného absolutního prahu. Podněty ležící uprostřed volíme tak, aby jejich velikost byla co nejbližší předpokládané prahové hodnotě  $S_{0,5}$ . Intervaly mezi sousedními podněty na podnětové škále by měly mít přibližně stejnou délku. Při testování metodou konstantních podnětů je vhodné zvolit menší počet podnětů (obvykle 4 až 7), které posluchači předkládáme v několikanásobném opakování.

### 4.4 VÝBĚR MĚŘICÍCH METOD PRO PSYCHOAKUSTICKÉ EXPERIMENTY

Po prostudování psychoakustických měřicích metod byly pro připravovaný experiment vybrány dvě měřicí metody. Pro první část experimentu byla zvolena metoda škálování, jejíž princip je popsán v kapitole 4.2. Výhodou metody posuzování zvukových podnětů na subjektivních posuzovacích škálách je její použitelnost pro větší počet testovaných podnětů a taky její oblíbenost u pokusných osob, kterým se obvykle jeví jako nejzábavnější. Tím by nemělo docházet ke snížení motivace k hodnocení podnětů a snížení tak kvality testu. U této metody je však velmi důležitá opatrnost při přípravě testu a správné připravení škály pro hodnotící posluchače. Vzhledem k tomu, že v druhé části experimentu je cílem určit hodnotu právě rozpoznatelného rozdílu, vhodnou měřicí metodou pro tuto část je metoda konstantních rozdílů. Tato metoda je popsána v kapitole 4.3. Nevýhodou metody konstantních podnětů je její časová náročnost. V tomto případě je velmi důležité rozdělit test na kratší úseky, mezi kterými si v případě nutnosti může testující osoba odpočinout. Přehledné porovnání metod je znázorněno v tabulce 4.2.



Tabulka 4.2 Porovnání psychologických měřicích metod v psychoakustice, převzato z [7].

Metoda měření	Úroveň měření	Počet soudů jedné osoby	Časová náročnost	Obtížnost pro pokusné osoby	Pracnost přípravy pokusů	Poznámka
<b>Metoda konstantních podnětů</b>	poměrová stupnice	$o = kn$	velká	malá	střední	Metoda je vhodná k měření absolutních podnětových prahů
<b>Párové srovnávání</b>	pořadová až intervalová stupnice	$o = 0,5 \cdot k(n^2 - n)$	velká	malá	střední	Použití metody je zvlášť vhodné při malých rozdílech mezi podněty
<b>Seřazení do pořadí</b>	pořadová až intervalová stupnice	$kn < o < 0,5(n^2 - n)$	střední	malá	malá	Metoda je použitelná i při velkém počtu objektů
<b>Posuzování na subjektivní škála</b>	pořadová až intervalová stupnice	$o = kn$	malá	velká	střední	Metoda je použitelná i při velkém počtu objektů



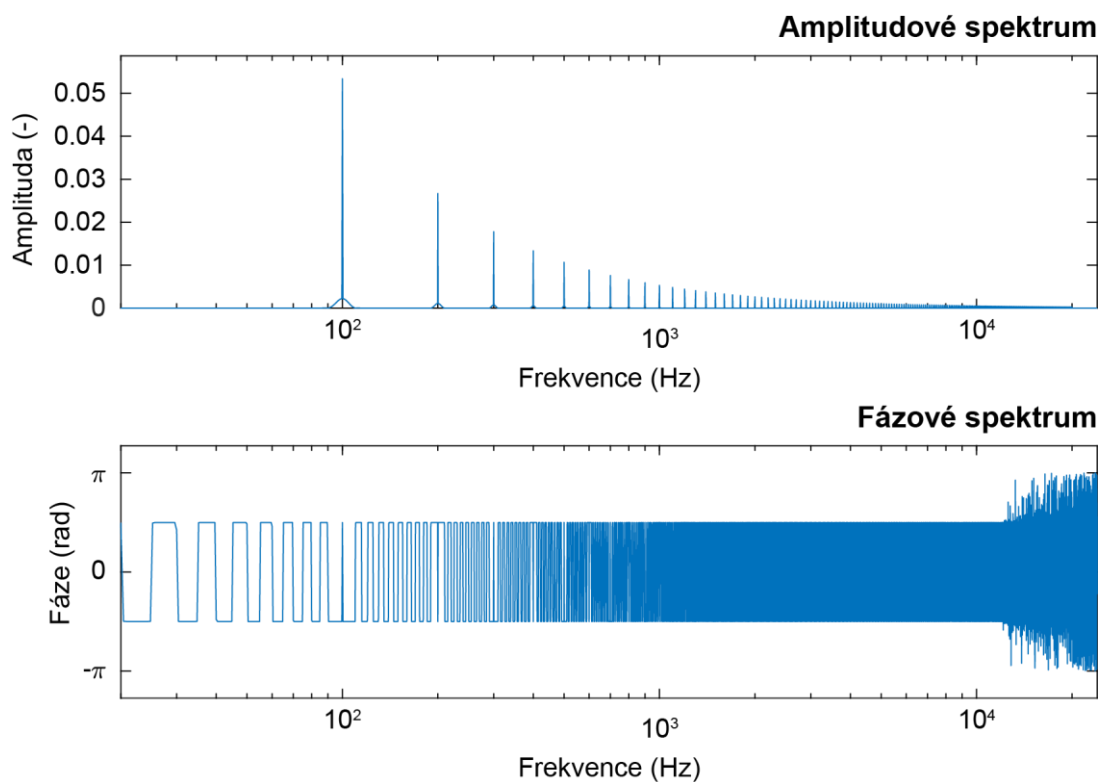
## 5. AMPLITUDOVÉ A FÁZOVÉ SPEKTRUM SIGNÁLU

V této práci jsou fázově modifikovány přirozené hudební signály. Pro převod z časové do frekvenční oblasti je využita Fourierova transformace. Komplexní tvar frekvenčního spektra je možné vyjádřit ve tvaru

$$S(\omega) = |S(\omega)|e^{j\arg(S(\omega))}, \quad (5.1)$$

kde  $|S(\omega)|$  je amplitudové spektrum a  $\arg(S(\omega))$  představuje fázové spektrum, které vypovídá o počáteční fázi jednotlivých složek spektra [20].

Na obrázku 5.1 je uveden příklad amplitudového a fázového spektra syntetického zvukového signálu, který je v první části psychoakustického experimentu použitý jako referenční signál.



Obrázek 5.1 Příklad amplitudového a fázového spektra signálu.



## 6. PSYCHOAKUSTICKÝ EXPERIMENT – PRVNÍ ČÁST

V první části psychoakustického experimentu bylo cílem ověřit, zda fázové změny mají vliv na poslechový vjem. Pro testování byly provedeny různé fázové změny na dvou skupinách signálů. První skupina obsahuje syntetické signály, druhou skupinu tvoří reálné signály.

### 6.1 SYNTETICKÉ SIGNÁLY

Všechny syntetické signály použité pro psychoakustický experiment byly vytvořeny v prostředí MATLAB jako součet kosinů s různými parametry. Tato metoda a parametry signálů byly převzaty z předchozí studie fázových změn [5]. Signály tak byly vytvořeny podle následujícího vzorce:

$$x(t) = G \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n}{n} \cos(2\pi n f_0 (t - \tau_n) + \phi_n), \quad 6.1$$

kde  $G$  je zisk ovlivňující úroveň signálu,  $g_i$  je frekvenčně závislý zisk ovlivňující amplitudové spektrum,  $n$  je pořadové číslo je jednotlivých harmonických složek,  $f_0$  je základní frekvence (100 Hz),  $\tau_n$  je frekvenčně závislé zpoždění a  $\phi_n$  je frekvenčně závislý úhel ovlivňující fázové spektrum. Délka všech syntetických signálů, které byly pro test použity je 2,5 sekundy. Skripty pro vytváření těchto signálů jsou uvedeny v datové příloze.

Tímto způsobem byly připraveny tři experimenty, které se soustředí na:

- Experiment 1 - Porovnání vlivu fázové a amplitudové modifikace
- Experiment 2 - Vliv fázového posunu jedné harmonické složky
- Experiment 3 - Vliv různých úrovní fázových změn

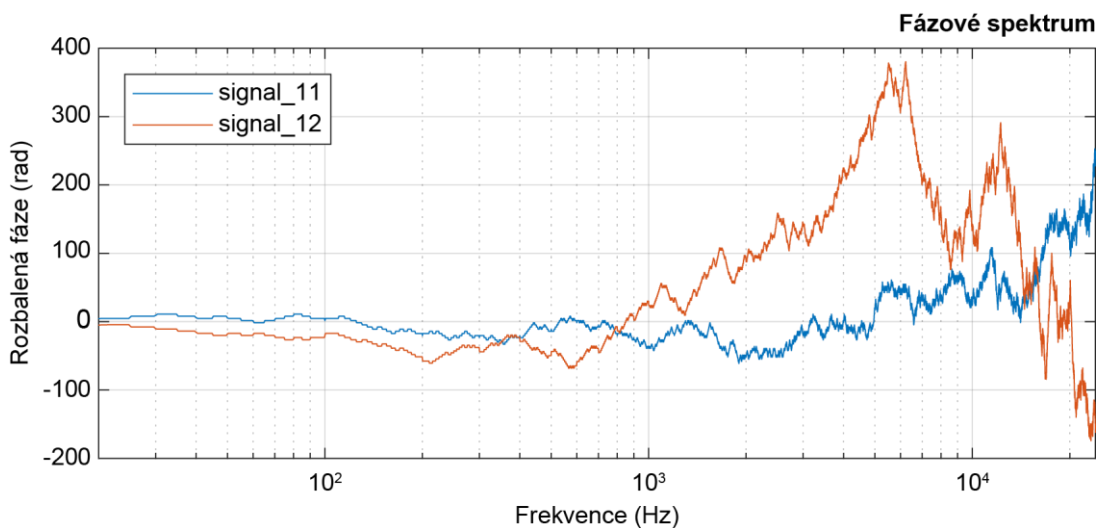
V následujících kapitolách je uveden podrobný popis psychoakustických experimentů, které obsahují syntetické signály. Každý experiment tvoří 5 signálů, které jsou porovnávány s referenčním signálem. Tento referenční signál je stejný pro všechny následující experimenty (experiment 1, experiment 2 a experiment 3). V tabulkách s parametry signálů použitých v experimentech je vždy uveden na prvním místě.

#### 6.1.1 EXPERIMENT 1

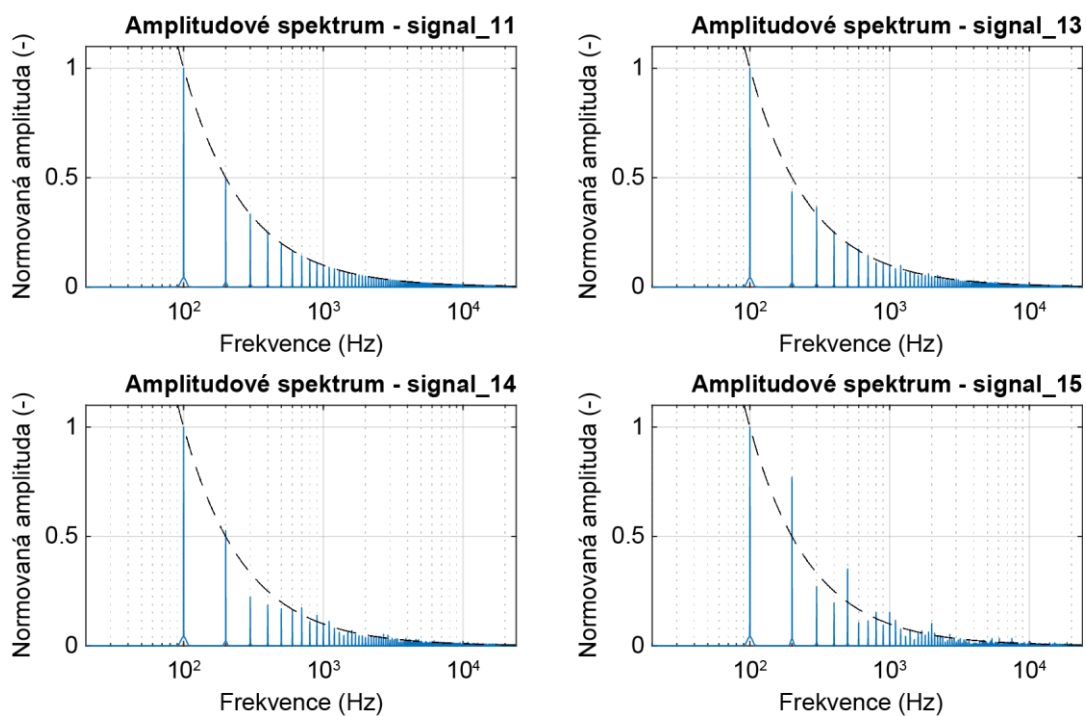
Experiment 1 slouží k porovnání vlivu změny fázového a amplitudového spektra. Tento test tvoří pět syntetických signálů, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1. Signál 11 je zde referenčním signálem. Jeho jednotlivé harmonické složky mají konstantní počáteční fázi. Opak tohoto signálu představuje signál 12, jehož parametry zůstávají stejné jako v případě signálu 11, ale počáteční fáze jednotlivých harmonických složek je náhodná z intervalu  $(0, 2\pi)$ . U signálů 13–15 bylo zachováno stejné fázové spektrum jako u referenčního signálů. Modifikována byla jejich amplitudová spektra. Tyto změny spočívají v násobení harmonických složek daným ziskem  $g_n$ , který byl získán z normálního rozložení se standartní odchylkou 1, 2 nebo 4 dB.

Tabulka 6.1 Parametry signálů použitých v experimentu 1.

Signál	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_11	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_12	100	1	$\sim U(0, 2\pi)$	0
signal_13	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 1)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_14	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 2)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_15	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 4)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0



Obrázek 6.1 Fázová spektra signálů 11 a 12.



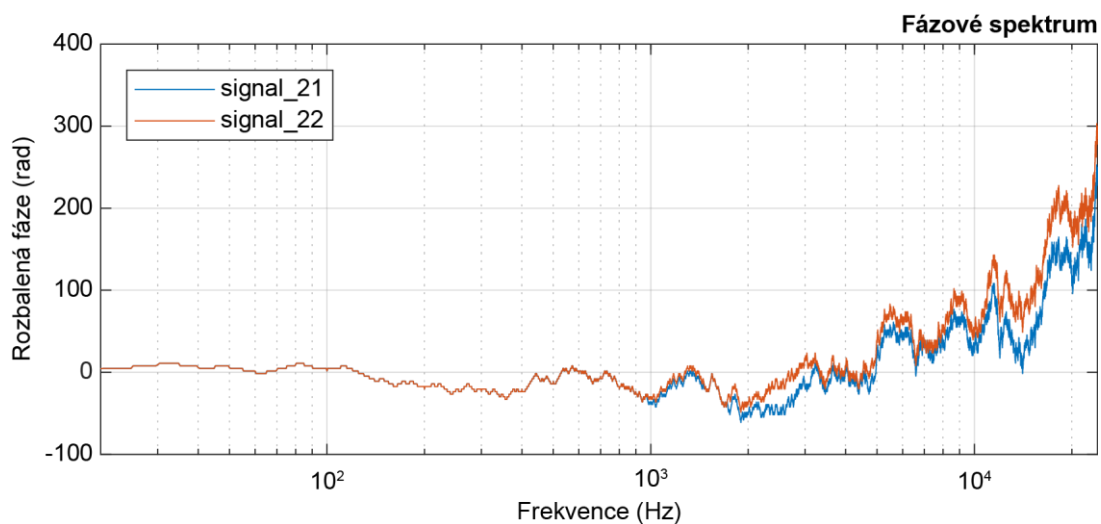
Obrázek 6.2 Amplitudová spektra signálů 11, 13, 14, 15.

## 6.1.2 EXPERIMENT 2

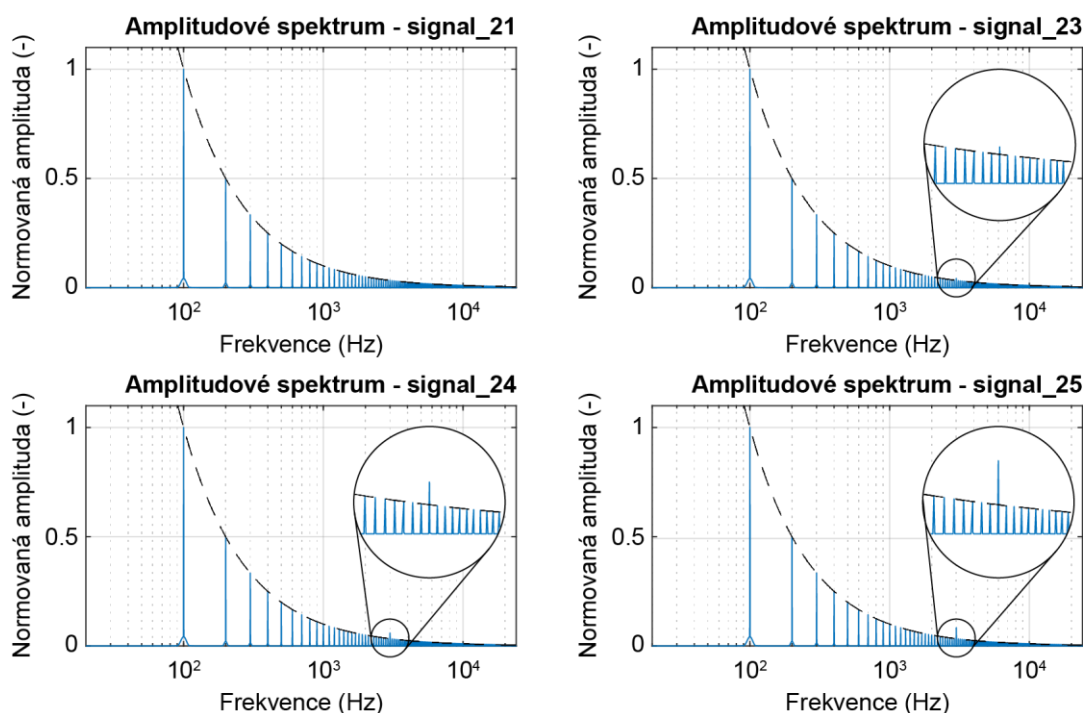
Tento experiment je zaměřen na vliv fázového posunu jedné harmonické složky. Tento test tvoří pět syntetických signálů, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 6.2. Referenční signál, jehož všechny harmonické složky jsou ve fázi, je uveden na prvním místě tabulky. Signál 22 se od referenčního signálu liší ve fázovém posunu harmonické složky s frekvencí 3 kHz o  $180^\circ$ . Tato maximální hodnota fázového posunu byla zvolena z důvodu dosažení největšího možného efektu. Počáteční fáze harmonických složek signálů 23–25 se shoduje s referencí. Amplituda harmonické složky s frekvencí 3 kHz byla v případě těchto signálů zesílena o 3, 6 a 9 dB. Ve studii [3] bylo zjištěno, že zesílení amplitudy harmonické složky způsobuje stejný efekt jako v případě jejího fázového posunu. Tento experiment tak slouží k nalezení hodnoty zesílení potřebné k dosažení stejného efektu jako v případě maximálního fázového posunu harmonické složky o  $180^\circ$ .

Tabulka 6.2 Parametry signálů použitých v experimentu 2.

Signál	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_21	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_22	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \pi, i = 30$ $(i - 1) \cdot \pi/2, i \neq 30$	0
signal_23	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 3, i = 30$ 1, $i \neq 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_24	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 6, i = 30$ 1, $i \neq 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_25	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 9, i = 30$ 1, $i \neq 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0



Obrázek 6.3 Fázová spektra signálů 21 a 22.



Obrázek 6.4 Amplitudová spektra signálů 21, 23, 24, 25.

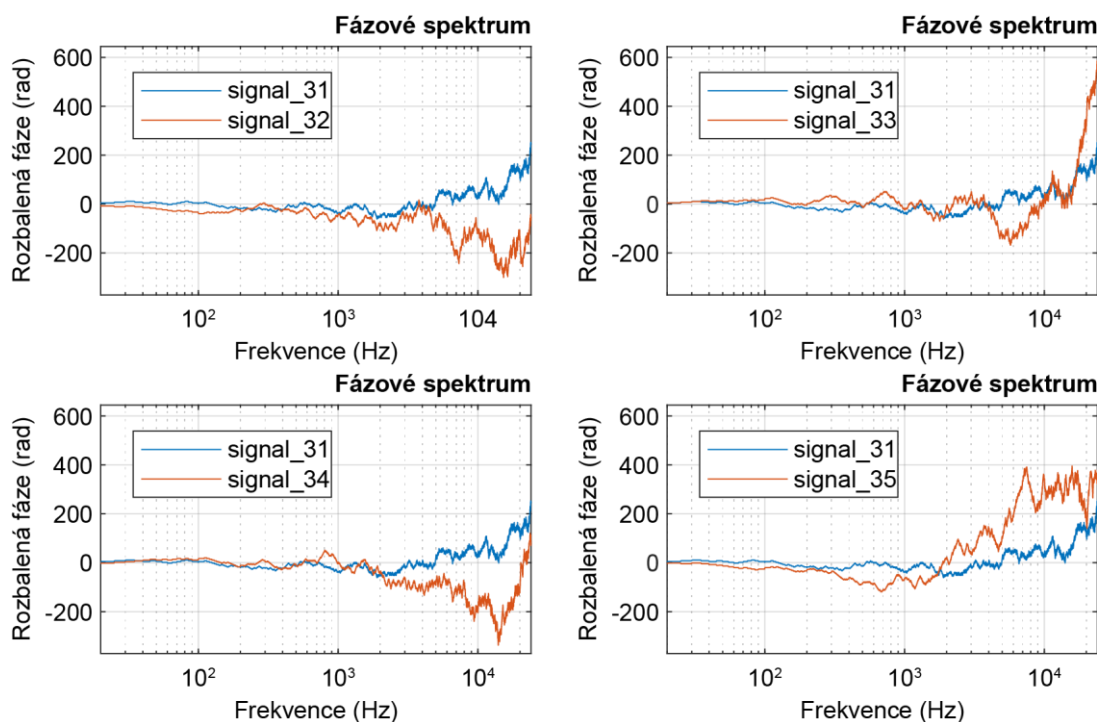
### 6.1.3 EXPERIMENT 3

Tento experiment zkoumá vlivy různých úrovní fázových změn. Tvoří ho pět syntetických signálů, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 6.3. Referenční signál se shoduje s referencí dvou výše uvedených experimentů se syntetickými signály a opět je uveden v tabulce na prvním místě. V případě referenčního signálu 31 mají všechny harmonické složky stejný fázový posuv. V dalších signálech je počáteční fáze harmonických složek znáhodněna. Maximální případ znáhodnění fáze představuje signál 35, kde je harmonickým složkám náhodná počáteční fáze. V případě signálů 32-34 je znáhodnění fázového posunu oproti referenčnímu signálu omezeno krajními hodnotami  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ .

Tabulka 6.3 Parametry signálů použitých v experimentu 3.

Signal	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\Phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_31	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_32	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/9, \pi/9)$	0
signal_33	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/4, \pi/4)$	0
signal_34	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/2, \pi/2)$	0
signal_35	100	1	$\sim U(0, 2\pi)$	0





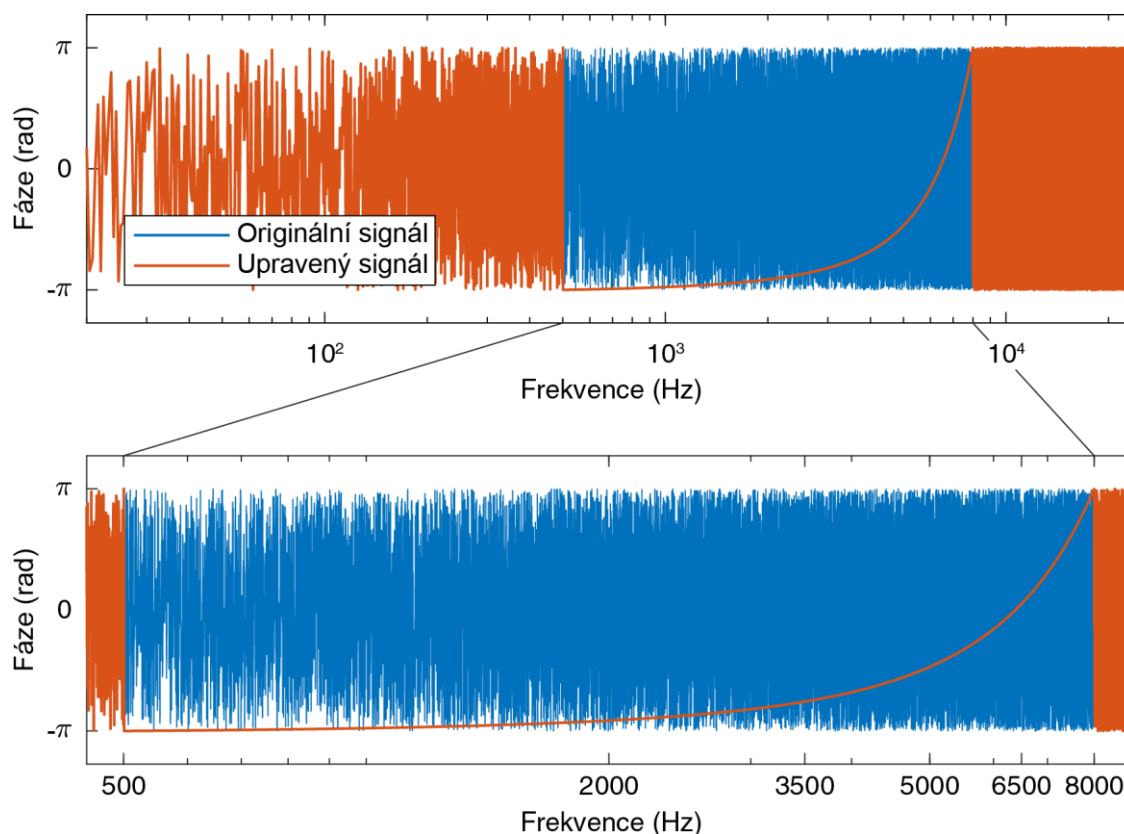
Obrázek 6.5 Fázová spektra signálů 31, 32, 33, 34, 35.

## 6.2 REÁLNÉ SIGNÁLY

Pro fázové změny reálných signálů byly zvoleny tři typy zvukových signálů – řeč, potlesk a instrumentální hudba. Celkem tak byly vytvořeny tři dílčí experimenty. Signály obsahující řeč a potlesk byly vybrány na základě výsledků z předcházejících studií [21], [22], které označily tyto signály za takzvaně fázově citlivé. Fázová spektra všech testovaných signálů byla modifikována v prostředí MATLAB. Úprava fázového spektra v tomto případě spočívala v nahrazení přesné části fázového spektra exponenciální funkcí s rozsahem od  $-\pi$  do  $\pi$ . Na obrázku 6.1 je tato fázová změna názorně předvedena. Délka každého signálu typu potlesk je 4 sekundy, signály obsahující instrumentální hudbu a řeč trvají 5 sekund. Jako referenční signál byl vždy použit originál bez fázových změn. S tímto signálem byly v každém experimentu porovnávány modifikované signály včetně samotné reference.

Pro každý typ audio signálu byly vytvořeny čtyři upravené signály, které se od sebe navzájem liší frekvenčním pásmem fázového spektra, které bylo modifikováno. Pro zvukové signály obsahující instrumentální hudbu a potlesk jsou frekvenční pásma upraveného fázového spektra stejná, u řečových vzorků je maximální hodnota modifikovaného frekvenčního pásma 8000 Hz.

V následujících tabulkách jsou uvedeny parametry signálů pro tři psychoakustické experimenty, které obsahují reálné zvuky. V každé tabulce jsou uvedeny názvy modifikovaných signálů a je zde upřesněno, jaká část fázového spektra signálu byla nahrazena exponenciální funkcí. Referenční signály, se kterými jsou tyto modifikované signály porovnávány, jsou v tabulkách pojmenovány jako *hudba*, *aplous* a *rec*. Fázově modifikované signály jsou navíc označeny číslem.



Obrázek 6.6 Příklad modifikace fázového spektra exponenciální funkcí.

Tabulka 6.4 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 4.

Signál	hudba_1	hudba_2	hudba_3	hudba_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 500	500 – 8000	8000 – 24000

Tabulka 6.5 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 5.

Signál	aplous_1	aplous_2	aplous_3	aplous_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 500	500 – 8000	8000 – 24000

Tabulka 6.6 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 6.

Signál	rec_1	rec_2	rec_3	rec_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 300	300 – 500	500 – 8000

### 6.3 PROGRAM PRO TESTOVÁNÍ

Pro psychoakustický experiment byla zvolena metoda posuzování na subjektivních škálách, která je popsána v kapitole 4.2. Proto byl pro testování vytvořen program, který umožňoval testujícím osobám přehrávat referenční i modifikované zvukové vzorky. Rozdíl mezi nimi byl zaznamenáván na stupnici od 1 do 5 s krokem 0,1.

### 6.3.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ LAZARUS

Pro testování byla naprogramována aplikace, která umožňuje porovnávání modifikovaných vzorků s referencí. Při tvorbě programů bylo čerpáno z návodů pro programování v jazyce Object Pascal [23], [24]. Jako vývojové prostředí bylo zvoleno multiplatformní vývojové prostředí Lazarus ve své nejnovější verzi 1.2.6, které je volně šířené pod licencí GNU. Vývojové prostředí obsahuje nástroje na intuitivní tvorbu grafického uživatelského rozhraní. Lazarus umožňuje do programu vložit různé ovládací prvky jako například tlačítka, textová pole, posuvníky a mnohé další. Následně se stanovují akce, při kterých se spouští určité části kódu aplikace. Další velkou výhodou Lazaru je fakt, že stejný zdrojový kód lze kompilovat pro různé operační systémy a není nutné zdrojové soubory jakkoli upravovat.

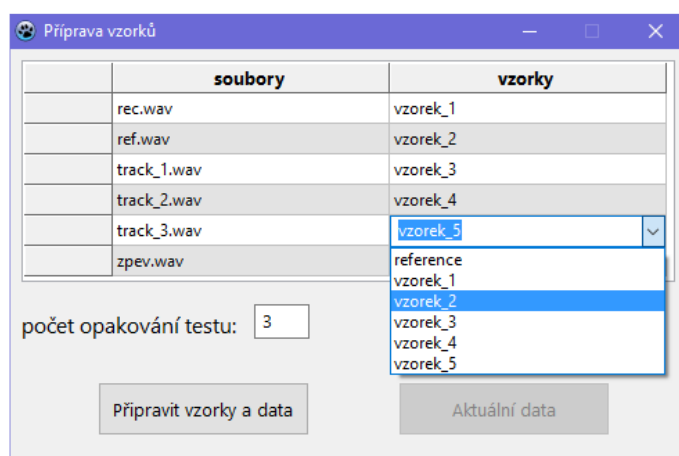
### 6.3.2 PRVKY PROGRAMU

V této kapitole jsou popsány funkce jednotlivých prvků programu, kterými jsou:

- Příprava vzorků
- Předtestový dotazník
- Test
- Vyhodnocení dotazníků
- Záloha výsledků
- Náповěda

#### Příprava vzorků

Tento prvek programu umožňuje přiřadit danému vzorku jeho úlohu při testování a dále umožňuje zvolit počet opakování testu. Vzorek je možné označit jako referenci, nebo jako testovaný signál s názvem vzorek1 až vzorek5. Poté dojde k přejmenování zvukových souborů a současně se vytvoří náhodné posloupnosti pořadí vzorků pro zvolený počet opakování testu. Testovací data jsou po vytvoření uložena a je možné použít je k dalším testům při novém spuštění programu. Po dokončení celého procesu se vygenerovaná pořadí zobrazí uživateli v tabulce. Uživatel může kliknout na tlačítko „Generovat znovu“ a vygenerovat nové posloupnosti. Příprava dat se ukončí kliknutím na tlačítko „Ok“.



Obrázek 6.7 Ukázka přípravy vzorků.

Pořadí vzorků

Vzorky připraveny, generovaná pořadí:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
test 1	1	2	3	4	5
test 2	3	4	1	5	2
test 3	1	2	4	5	3

počet opakování testu:

Obrázek 6.8 Generování pořadí vzorků.

### Předtestový dotazník

Před spuštěním testu je testující vyzván, aby vyplnil krátký dotazník. Data z dotazníků jsou uložena do složky „dotazniky“ v textovém formátu a dále hromadně vyhodnocována. Po kliknutí na tlačítko „Uložit a spustit test“ program zkontroluje, zda jsou všechny otázky zodpovězeny. V případě chybějící odpovědi je zobrazeno upozornění a výzva k doplnění chybějící části dotazníku.

Dotazník

**Předtestový dotazník**

pohlaví:  
 muž  
 žena

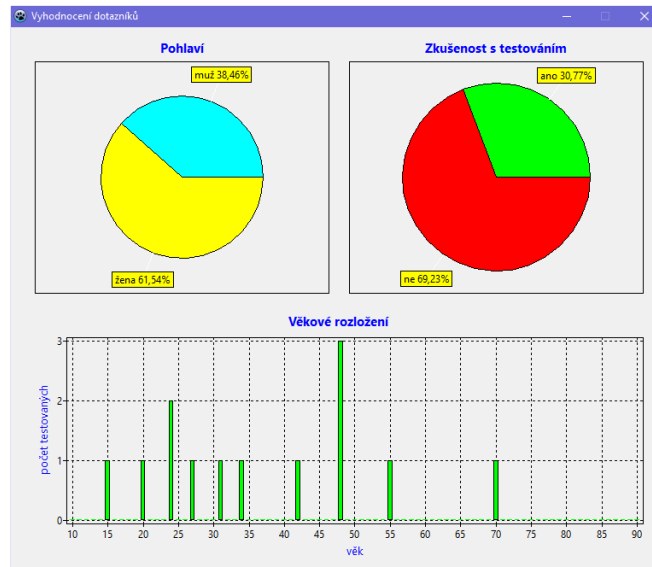
věk:

Mám předchozí zkušenost s testováním?  
 ano  ne

Obrázek 6.9 Předtestový dotazník.

## Vyhodnocení dotazníků

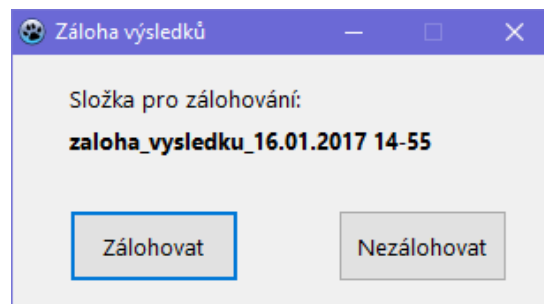
Dotazníky uložené v textových souborech se hromadně vyhodnocují a následně jsou vytvořeny souhrnné grafy.



Obrázek 6.10 Vyhodnocení dotazníku.

## Záloha výsledků

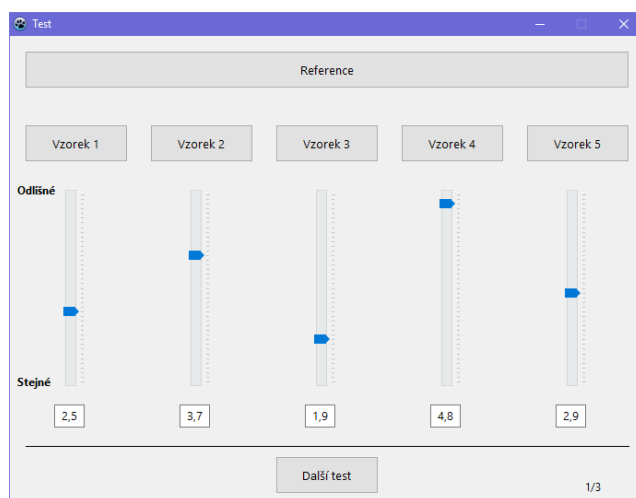
Program umožňuje přesunout všechny vytvořené soubory s výsledky do určité složky. Tato funkce slouží k oddělování jednotlivých sad provedených testů.



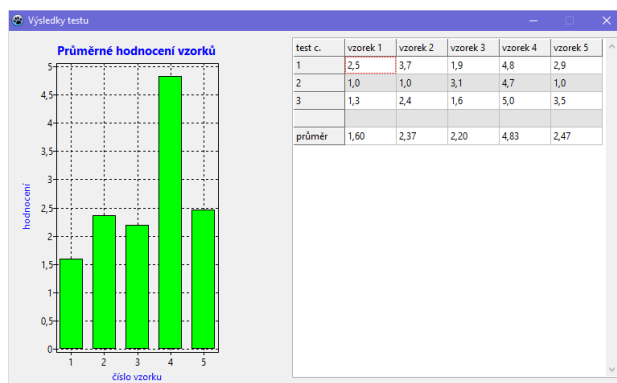
Obrázek 6.11 Záloha výsledků.

## Test

Testovací okno obsahuje pět tlačítek pro přehrání hodnocených vzorků a jedno pro přehrání referenčního vzorku. U každého vzorku je hodnocena jeho podobnost s referencí na stupnici od 1 do 5. V pravém dolním rohu okna je zobrazeno, v jaké části se testování nachází. Po ukončení testu se zobrazí souhrnná tabulka s výsledky a graf s průměrným hodnocením vzorků.



Obrázek 6.12 Testovací okno.



Obrázek 6.13 Výsledky testu.

## 6.4 POSLECHOVÝ TEST

Připravený psychoakustický experiment byl proveden na katedře radioelektroniky v audiologické komoře, která zajišťuje izolaci od okolního hluku. Experimentu se zúčastnilo 14 osob s výjimkou autorky. Každé testující osobě byl nejprve vysvětlen princip testování. Následně byl testující vyzván, aby si spustil zkušební test. Díky zkušebnímu testu se zabránilo situaci, ve které by se posluchač na začátku testu těžko orientoval. Poté by mohlo dojít k nesprávnému hodnocení několika prvních testovaných vzorků. Vzhledem k tomu, že experiment tvoří šest dílčích testů, bylo testujícím umožněno v případě únavy mezi jednotlivými částmi testu experiment přerušit a odreagovat se.

Grafické rozhraní znázorněné na obrázku 6.5 bylo použito pro všech šest dílčích testů. Umožňuje testujícím osobám hodnotit rozdíl mezi referenčním zvukovým vzorkem a fázově modifikovanými vzorky. Rozdíl testující zaznamenávali na numerickou stupnici od 1 do 5 s krokem 0,1. Číslo 1 na stupnici představuje absolutní shodu s referenčním signálem, absolutní rozdíl představuje číslo 5. Testující mohli libovolně a opakovaně přehrávat referenční nebo modifikovaný signál, dokud si nebyli jisti svým hodnocením. Vzhledem k tomu závisela celková doba testu na rychlosti hodnocení každé testující osoby. Celková doba testu nikdy nepřesáhla 15 minut. Průměrná doba testu byla přibližně 7 minut. Pořadí modifikovaných signálů bylo znáhodněno pro každý test. Před zahájením testu byly všechny testované osoby požádány o vyplnění krátkého formuláře, který obsahoval otázky týkající se věku, pohlaví a zkušeností s psychoakustickými testy. Z dotazníků bylo

zjištěno, že většina zúčastněných osob v psychoakustickém experimentu měla zkušenosti s poslechovými testy. Z celkového počtu 14 osob se experimentu zúčastnilo 10 mužů a 4 ženy ve věku 22 až 29 let.

Při psychoakustickém experimentu v audiologické komoře byly použity tyto typy přístrojů:

- zvuková karta RME Fireface UC
- sluchátka Sennheiser HD650

Je předpokládáno, že fázová odezva použitých sluchátek není ideálně konstantní přes celé frekvenční pásmo. Typicky pro sluchátka i reproduktory roste skupinové zpoždění na nízkých frekvencích. Teoreticky je možné provést korekci fázové odezvy, ale spojení mezi lidským uchem a sluchátkem ovlivňují potřebnou korekci. Proto byla korekce fázové odezvy sluchátek vynechána. Pro experiment byl použit pouze jeden typ sluchátek, takže všechny testující osoby měli při experimentu stejné podmínky pro testování.





## 7. VYHODNOCENÍ PRVNÍ ČÁSTI PSYCHOAKUSTICKÉHO EXPERIMENTU

Pro všech 6 experimentů byla zvolena metoda škálování, jejíž princip je popsán v kapitole 4.2. Výsledné hodnoty testovaných signálů jsou určeny jako aritmetické průměry naměřených hodnot. Tento způsob zpracování dat je součástí popisné neboli deskriptivní statistiky. Výsledky získané těmito postupy slouží jako podklad k vyvození závěrů měření. Pro upřesnění získaných výsledků psychoakustických testů byla proto použita analýza rozptylu, která je popsána v následující kapitole.

### 7.1 ANALÝZA ROZPTYLU

Tato kapitola je převzata z mé bakalářské práce [18], která se zabývá různými měřicími metodami pro psychoakustické testy.

Analýza rozptylu (Analysis of variance – ANOVA) je statistická analytická metoda, která umožňuje určit, zda má daný faktor statisticky významný vliv na hodnotu zkoumané závislé proměnné. Při vyhodnocování psychoakustických testů lze díky použití analýzy rozptylu zjistit, zda jsou rozdíly mezi hodnoceními různých objektů statisticky významné, či nikoliv. Je proto vhodným nástrojem k objasnění několika problémů. Pokud například získáme výsledky dvou zvukových signálů, které jsou si velmi blízké (hodnocení na škále je téměř stejné), nemůžeme si být jisti, zda můžeme tento rozdíl považovat za skutečný nebo zanedbatelný. Nelze tedy určit, zda jsou rozdíly mezi hodnoceními statisticky významné. Po použití ANOVA lze tyto a podobné problémy objasnit. Daným faktorem analýzy provedené v této práci byly fázové modifikace, závislou proměnou bylo určeno hodnocení jednotlivých signálů na stupnici [25], [26].

#### 7.1.1 JEDNOFAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU (ONE-WAY ANOVA)

Na počátku analýzy je zavedena takzvaná nulová hypotéza  $H_0$ , která tvrdí, že všechny střední hodnoty všech  $k$  testovaných skupin jsou stejné. V případě zamítnutí nulové hypotézy  $H_0$  platí alternativní hypotéza  $H_A$ , kdy se alespoň jedna ze středních hodnot  $\mu$  liší od ostatních.

Pro zamítnutí či potvrzení stanovené nulové hypotézy je potřeba vypočítat několik následujících parametrů:

**SS (sum of squares) = součet čtverců**

- $SS_B$  (SS mezi skupinami) = součet kvadrátů všech odchylek střední hodnoty skupiny od celkové střední hodnoty všech skupin
- $SS_W$  (SS uvnitř skupin) = součet kvadrátů odchylek každého hodnocení v dané skupině od střední hodnoty skupiny

**df (degrees of freedom) = stupně volnosti**

- $df_B$  – numerator degree of freedom (df mezi skupinami)  
 $df_B = k - 1$ ,  $k$  je počet skupin
- $df_W$  – numerator degree of freedom (df uvnitř skupin)  
 $df_W = k(n - 1)$ ,  $k$  je počet skupin,  $n$  je počet hodnocení v rámci jedné skupiny

**MS (mean square) = průměrný čtverec**

- $MS_B$  (MS mezi skupinami)

$$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$$

- $MS_W$  ( $MS$  uvnitř skupin)

$$MS_W = \frac{SS_W}{df_W}$$

### **F poměr (F ratio)**

- $F = \frac{MS_B}{MS_W}$

### **F kritické (F krit)**

- tabulková hodnota z Fisher-Snedecorova rozdělení, na ose x je vynášeno  $df_B$ , na ose y je hledána hodnota  $df_W$
- lze zvolit pro různé hladiny významnosti  $\alpha$ , v tabulkách jsou obvykle uvedeny hodnoty  $F_{krit}$  pro  $\alpha = 0,05$  nebo  $\alpha = 0,01$ .

### **hodnota p (p-value)**

- $p = F - 1$

Po správném určení parametrů analýzy rozptylu lze stanovit závěr, tedy zamítnutí nebo potvrzení nulové hypotézy  $H_0$ . Rozhodnutí učiníme na základě porovnání parametrů  $F$  a  $F_{krit}$ . Nulovou hypotézu  $H_0$  zamítáme v případě, kdy je  $F \geq F_{krit}$ . Zamítnutí nulové hypotézy  $H_0$  dále potvrzuje hodnota  $p$ , která určuje, na jaké hladině významnosti je možné  $H_0$  zamítnout. Porovnává se s předem stanovenou hodnotou, pro kterou jsme zvolili  $F_{krit}$ . Je-li hodnota  $p$  menší, nulová hypotéza  $H_0$  je zamítnuta. Tím je zjištěno, že daný faktor má vliv na hodnotu zkoumané závislé proměnné a existuje alespoň jeden statisticky významný rozdíl hodnocení dvou skupin. V opačném případě, kdy je  $F < F_{krit}$ , je nulová hypotéza  $H_0$  potvrzena a platí, že všechny střední hodnoty skupin jsou stejné.

## **7.1.2 MULTIKOMPARATIVNÍ TESTY**

V situaci, kdy je nulová hypotéza  $H_0$  zamítnuta, je zjištěno, že nejméně u dvou z celkového počtu testovaných skupin  $k$  můžeme považovat rozdíl jejich středních hodnot za statisticky významný. Je proto třeba ještě analýzu doplnit o další testy, které blíže určí, u kterých z  $0,5(k^2 - k)$  párů skupin tato situace opravdu nastala. Jednofaktorovou analýzu rozptylu tak doplníme o multikomparativní testy neboli o testy pro mnohonásobné porovnávání všech dvojic skupin. Jednou z vhodných metod pro multikomparativní testy je Tukeyho metoda.

### **7.1.3 TUKEYHO METODA**

Tato metoda využívaná pro mnohonásobné porovnávání je založena na určení parametru  $HDS$  (honestly significant difference). Výpočet  $HDS$  je proveden pomocí následujícího vzorce, kde  $MS_W$  je průměrný čtverec vypočtený uvnitř skupin (hodnota byla zjištěna už při jednofaktorové analýze rozptylu) a  $n$  je počet hodnocení v rámci jedné skupiny. Hodnotu  $q$  je možné zjistit v tabulce hodnot Studentized Range Distribution, kdy na ose x vynášíme počet skupin  $k$  a na ose y hledáme hodnotu  $k(n - 1)$ .

$$HDS = q \sqrt{\frac{MS_W}{n}} \quad (7.1)$$

Určení, zda jsou rozdíly středních hodnot v daném páru statisticky významné, se provádí pomocí

porovnávání hodnoty  $HDS$  s absolutní hodnotou rozdílu středních hodnot zkoumaných skupin (například  $|\mu_1 - \mu_2|$ ). Toto porovnání se provede pro všech  $0,5(k^2 - k)$  párů skupin. Pokud je  $HDS < |\mu_1 - \mu_2|$ , znamená to, že nulová hypotéza  $H_0$  je pro pár obsahující skupiny 1 a 2 zamítnuta. Poté můžeme říci, že mezi středními hodnotami skupin je statisticky významný rozdíl. V opačném případě je nulová hypotéza  $H_0$  potvrzena a rozdíly středních hodnot skupin jsou na dané hladině významnosti  $\alpha$  nevýznamné.

## 7.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 1

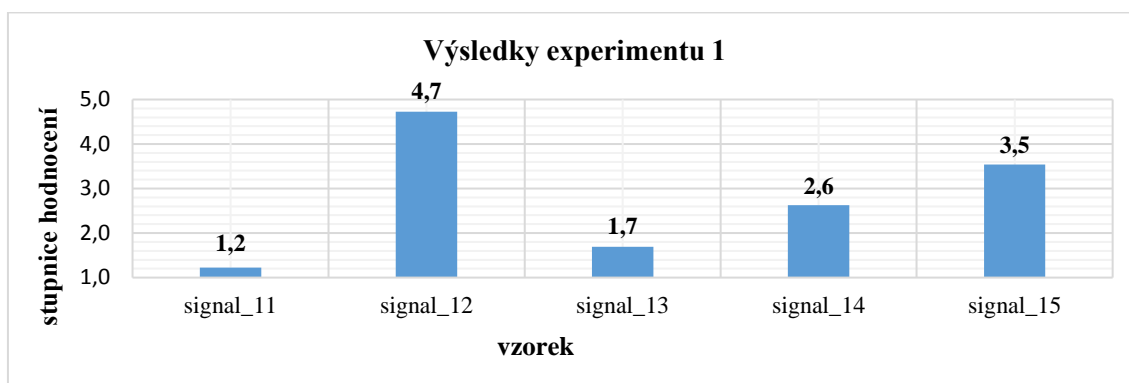
Tento psychoakustický experiment byl proveden za účelem porovnání vlivu fázových a amplitudových změn. Parametry signálů, které byly v tomto experimentu testovány, jsou uvedeny v tabulce 7.1. Naměřené hodnoty při tomto experimentu jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tabulka 7.1 Parametry signálů použitých v experimentu 1.

Signál	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_11	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_12	100	1	$\sim U(0, 2\pi)$	0
signal_13	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 1)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_14	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 2)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_15	100	$10^{L/20}, L \sim N(0, 4)$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0

Tabulka 7.2 Naměřené hodnoty – experiment 1.

Posluchač	signal_11	signal_12	signal_13	signal_14	signal_15
1	1	5	1,7	2,4	3,8
2	1	4	1,5	2,8	3,5
3	1,7	5	3	2	4,1
4	1,2	4,8	1,8	2,7	3,5
5	1,8	5	2	2,5	4,2
6	1	5	2	2,3	3
7	1,4	3,3	1,2	1,8	2,5
8	1	5	1,9	2,9	3,5
9	1,1	4,3	1,4	2,5	2,5
10	1,5	5	1	2,2	3,5
11	1,3	5	1,4	3,7	4
12	1	5	1,4	3,2	4
13	1	5	1,6	3,1	3,7
14	1,1	4,8	1,8	2,7	3,8
<b>Průměr</b>	1,2	4,7	1,7	2,6	3,5



Obrázek 7.1 Výsledky experimentu 1.

Výsledky experimentu, které jsou znázorněny na obrázku 7.1, dokazují, že v případě signálu použitého v tomto experimentu má znáhodnění fázového spektra podstatně větší vliv na sluchový vjem než znáhodnění jeho amplitudového spektra. Signál 12 (počáteční fáze jednotlivých harmonických složek je náhodná z intervalu  $(0, 2\pi)$ ) byl testujícími na stupnici označen jako téměř maximálně odlišný od referenčního signálu. V případě signálů 13 - 15 bylo zjištěno, že velikost vnímaného rozdílu roste se změnou amplitudového spektra.

### 7.2.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 1

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 1 jsou uvedeny v tabulce 7.3. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy (tabulka 7.4).

Tabulka 7.3 Analýza rozptylu – experiment 1.

Zdroj variability	SS	Df	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	112,2	4,0	28,0	125,8	$7,4 \cdot 10^{-30}$	2,5
Všechny výběry	14,5	65,0	02			
<b>Celkem</b>	126,6	69,0				

Tabulka 7.4 Multikomparativní testy – experiment 1.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
signal_11 + signal_12	3,51	0,30	rozdílné
signal_11 + signal_13	0,47	0,30	rozdílné
signal_11 + signal_14	1,41	0,30	rozdílné
signal_11 + signal_15	2,32	0,30	rozdílné
signal_12 + signal_13	3,04	0,30	rozdílné
signal_12 + signal_14	2,10	0,30	rozdílné
signal_12 + signal_15	1,19	0,30	rozdílné
signal_13 + signal_14	0,94	0,30	rozdílné
signal_13 + signal_15	1,85	0,30	rozdílné
signal_14 + signal_15	0,91	0,30	rozdílné

Na základě výsledků multikomparativních testů z tabulky 7.4 bylo zjištěno, že rozdíly mezi

hodnoceními všech páru testovaných signálů jsou statisticky významné. To znamená, že mezi všemi testovanými zvukovými signály je vnímatelný fázový rozdíl.

### 7.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 2

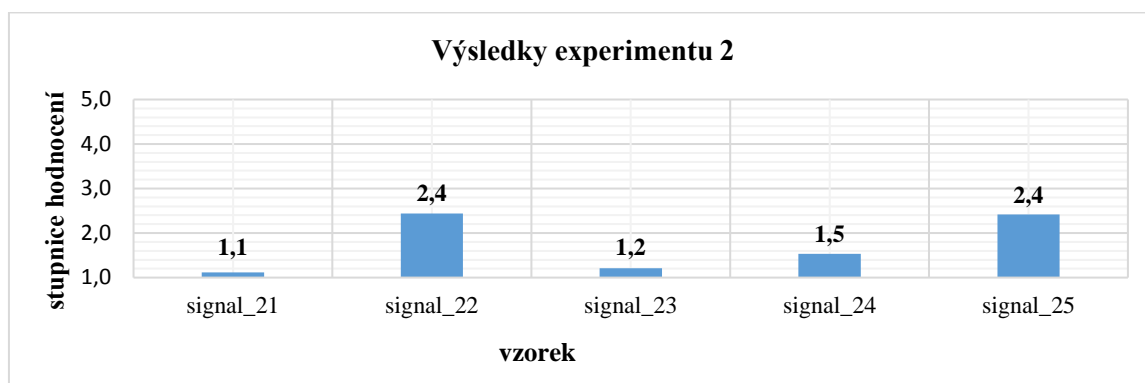
Tento experiment byl zaměřen na zkoumání vlivu fázového posunu jedné harmonické složky. Cílem tohoto testu bylo nalézt hodnotu zesílení amplitudy harmonické složky, která způsobuje stejný efekt jako v případě maximálního fázového posunu harmonické složky o  $180^\circ$ . Parametry signálů použitých pro tento experiment jsou uvedeny v tabulce 7.5. Naměřené hodnoty při tomto experimentu jsou uvedeny v tabulce 7.6.

Tabulka 7.5 Parametry signálů použitých v experimentu 2.

Signál	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_21	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_22	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \pi, i = 30$ $(i - 1) \cdot \pi/2, i \neq 30$	0
signal_23	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 3, i = 30$ 1, $i \neq 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_24	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 6, i = 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_25	100	$10^{\frac{L}{20}}, L = 9, i = 30$	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0

Tabulka 7.6 Naměřené hodnoty - experiment 2.

Posluchač	signal_21	signal_22	signal_23	signal_24	signal_25
1	1	2,9	1	2	2,9
2	1,3	2,3	1,2	1	2,2
3	1,2	1,6	1	1,4	1,7
4	1,4	3,1	1,2	1,6	2,6
5	1,2	2	1,2	1,3	1,8
6	1	3,4	1,6	1,6	3,4
7	1	1,5	1	1	1,5
8	1	1,7	1,3	1,7	2,4
9	1	3,4	1	1,9	3,1
10	1,2	1,9	1	1,3	1,7
11	1	2,5	1,2	2,4	2,4
12	1,2	2,2	1,3	1,2	2,2
13	1	2,8	1,6	1,6	3,1
14	1,1	2,9	1,3	1,5	2,8
<b>Průměr</b>	1,1	2,4	1,2	1,5	2,4



Obrázek 7.2 Výsledky experimentu 2.

Z výsledků tohoto experimentu znázorněných na obrázku 7.2 je patrné, že signál 22 (všechny harmonické složky jsou ve fázi s výjimkou harmonické s frekvencí 3 kHz, která je posunuta o 180°) byl ohodnocen jako stejně odlišný od referenčního signálu jako signál 25 (všechny harmonické složky ve fázi, ale amplituda harmonické složky s frekvencí 3 kHz je zesílena o 9 dB). Fázový posun jedné harmonické složky s frekvencí 3 kHz způsobuje sluchový vjem jako přičtení další kosinové složky s frekvencí 3 kHz, jejíž hlasitost je zesílena o 9 dB. Tato zjištění potvrzují studii [3].

### 7.3.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 2

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 2 jsou uvedeny v tabulce 7.7. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.8.

Tabulka 7.7 Analýza rozptylu - experiment 2.

Zdroj variability	SS	df	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	23,3	4,0	5,8	29,3	$6,1 \cdot 10^{-14}$	2,51
Všechny výběry	12,9	65	0,2			
<b>Celkem</b>	<b>36,3</b>	<b>69</b>				

Tabulka 7.8 Multikomparativní testy - experiment 2.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
signal_21 + signal_22	1,33	0,28	rozdílné
signal_21 + signal_23	0,09	0,28	Stejné
signal_21 + signal_24	0,42	0,28	rozdílné
signal_21 + signal_25	1,30	0,28	rozdílné
signal_22 + signal_23	1,24	0,28	rozdílné
signal_22+ signal_24	0,91	0,28	rozdílné
signal_22+ signal_25	0,03	0,28	Stejné
signal_23 + signal_24	0,33	0,28	rozdílné
signal_23 + signal_25	1,21	0,28	rozdílné
signal_24 + signal_25	0,88	0,28	rozdílné

Z multikomparativních testů vyplývá, že statisticky významný rozdíl v hodnocení signálů

neexistuje pouze u dvou párů signálů. Konkrétně se jedná o tyto páry signálů:

- **signal\_21** (reference) + **signal\_23** (amplituda harmonické na 3kHz zesílena o 3dB)
- **signal\_22** (všechny harmonické složky jsou ve fázi s výjimkou harmonické s frekvencí 3 kHz, která je posunuta o  $180^\circ$ ) + **signal\_25** (všechny harmonické složky ve fázi, ale amplituda harmonické složky s frekvencí 3 kHz je zesílena o 9 dB)

Pro všechny ostatní páry tetovaných zvukových signálů lze tvrdit, že mezi nimi existuje vnímatelný fázový rozdíl.

## 7.4 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 3

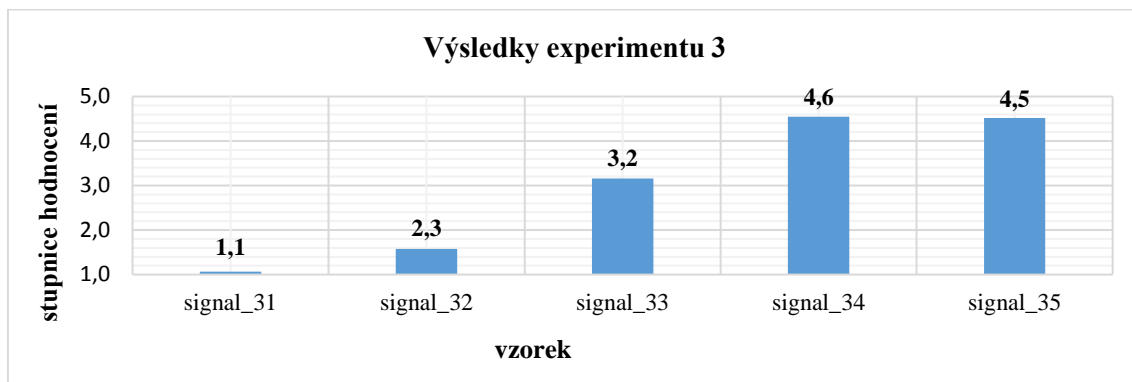
Tento experiment zkoumá vliv různých úrovní fázových změn. Parametry signálů použitých pro tento experiment jsou uvedeny v tabulce 7.9. Naměřené hodnoty při tomto experimentu jsou uvedeny v tabulce 7.10.

Tabulka 7.9 Parametry signálů použitých v experimentu 3.

Signal	$f_0$ [Hz]	$g_i$	$\phi_i$	$\tau_i$ [ms]
signal_31	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2$	0
signal_32	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/9, \pi/9)$	0
signal_33	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/4, \pi/4)$	0
signal_34	100	1	$(i - 1) \cdot \pi/2 + \sim U(-\pi/2, \pi/2)$	0
signal_35	100	1	$\sim U(0, 2\pi)$	0

Tabulka 7.10 Naměřené hodnoty - experiment 3.

Posluchač	signal_31	signal_32	signal_33	signal_34	signal_35
1	1	2	3,5	4,2	4,5
2	1	1,4	2,8	3,6	3,9
3	1	1,7	3	4,3	4,9
4	1,4	1,5	3	4,9	4,6
5	1,2	1,4	4	4,9	4,3
6	1	1,4	2,6	4,3	5
7	1	1,5	2,3	4,3	3
8	1	1,7	3,4	5	5
9	1	1,4	2,6	4,7	3,8
10	1,1	1,5	3,4	4,6	5
11	1,2	2,1	4,2	5	5
12	1	1,6	3,6	4,8	4,5
13	1	1,4	2,6	4,3	5
14	1	1,5	3,2	4,8	4,7
<b>Průměr</b>	1,1	1,6	3,2	4,6	4,5



Obrázek 7.3 Výsledky experimentu 3.

Z výsledků znázorněných na obrázku 7.3 vyplývá, že v případě signálů použitých v tomto experimentu způsobuje i nejmenší úroveň znáhodnění fáze harmonických složek slyšitelný rozdíl. Dále bylo zjištěno, že dva signály s největší úrovní znáhodnění fáze harmonických složek se od referenčního signálu liší nejvíce. Konkrétně se jedná o signál 24 (znáhodnění fázového posunu oproti referenčnímu signálu omezeno krajními hodnotami  $\pm 90^\circ$ ) a signál 25, jehož harmonické složky mají náhodnou fázi. Výsledky tak prokazují, že velikost vnímaného rozdílu roste spolu s úrovní fázových změn harmonických složek.

#### 7.4.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 3

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 3 jsou uvedeny v tabulce 7.11. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.12.

Tabulka 7.11 Analýza rozptylu - experiment 3.

Zdroj variability	SS	df	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	146,8	4,0	36,7	205,6	$3,9 \cdot 10^{-36}$	2,5
Všechny výběry	11,6	65,0	0,2			
<b>Celkem</b>	158,4	69,0				

Tabulka 7.12 Multikomparativní testy - experiment 3.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
signal_31 + signal_32	0,51	0,27	rozdílné
signal_31 + signal_33	2,09	0,27	rozdílné
signal_31 + signal_34	3,49	0,27	rozdílné
signal_31 + signal_35	3,45	0,27	rozdílné
signal_32 + signal_33	1,58	0,27	rozdílné
signal_32 + signal_34	2,97	0,27	rozdílné
signal_32 + signal_35	2,94	0,27	rozdílné
signal_33 + signal_34	1,39	0,27	rozdílné
signal_33 + signal_35	1,36	0,27	rozdílné
signal_34 + signal_35	0,04	0,27	stejně



Pomocí multikomparativních testů bylo určeno, že statisticky významný rozdíl v hodnocení signálů neexistuje pouze u jednoho páru signálů. Konkrétně se jedná o tento pár signálů:

- **signal\_34** (náhodný fázový posuv  $\pm 90^\circ$ ) + **signal\_35** (maximálně znáhodněná fáze)

Znamená to, že pouze u toho páru signálů není vnímatelný fázový rozdíl. Ve všech ostatních testovaných párech signálů byl tento rozdíl prokázán.

## 7.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 4

Fázové změny v Experimentu 4, 5 a 6 spočívaly v nahrazení určité části fázové spektra exponenciální funkcí s rozsahem od  $-\pi$  do  $\pi$ . V tomto experimentu byla tato modifikace fáze provedena na reálném signálu obsahující instrumentální hudbu. Frekvenční rozsahy upraveného fázového spektra pro jednotlivé testované signály jsou uvedeny v tabulce 7.13. Tyto signály byly porovnávány s referenčním originálním signálem. Rozdíl mezi signály byl zaznamenáván na stupnici od 1 do 5. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.14.

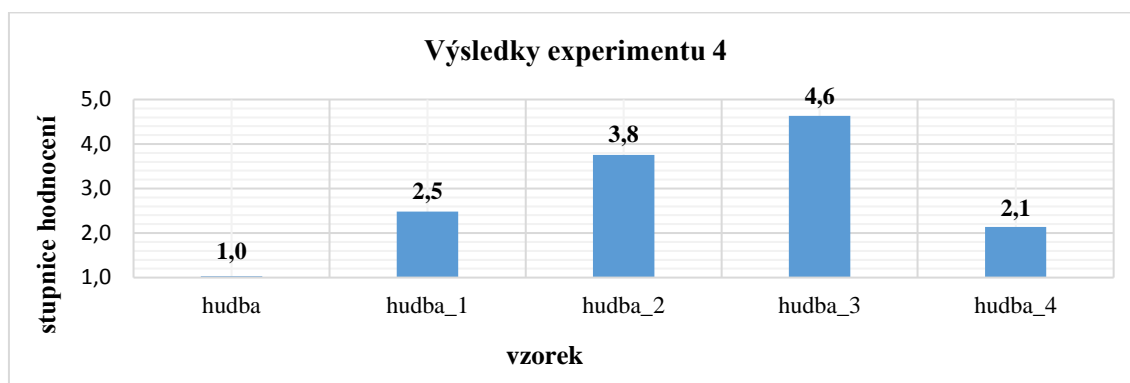
Tabulka 7.13 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 4.

Signál	hudba_1	hudba_2	hudba_3	hudba_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 500	500 – 8000	8000 – 24000

Tabulka 7.14 Naměřené hodnoty - experiment 4.

Posluchač	hudba	hudba_1	hudba_2	hudba_3	hudba_4
1	1	2,1	3,4	5	2,6
2	1	1,9	3,4	4,2	1,4
3	1	2,9	3,7	5	2,2
4	1,1	3,1	4,2	4,8	2,6
5	1,2	3,2	4,2	5	1,8
6	1	3	4,3	4,5	3,1
7	1	2,3	3,2	4,7	2,9
8	1	2,4	4	5	2,4
9	1	3	3,8	4,5	2
10	1	2,2	2,8	4,2	1,4
11	1	1,8	3,5	4,4	1,6
12	1	1,9	3,6	4,3	1,5
13	1	2,2	4,3	4,5	2,1
14	1,1	2,8	4,2	4,8	2,3
<b>Průměr</b>	1,0	2,5	3,8	4,6	2,1

Z výsledků experimentu znázorněných na obrázku 7.4 vyplývá, že největší vnímatelný rozdíl způsobila změna fázového spektra testovaného signálu v rozsahu 500 – 8000 Hz. Naopak jako nejméně odlišné z testovaných signálů se jeví signály s fázovou úpravou nízkých frekvencí (0 – 100 Hz) a vysokých frekvencí (8000 – 24000 Hz).



Obrázek 7.4 Výsledky experimentu 4.

### 7.5.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 4

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 4 jsou uvedeny v tabulce 7.15. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.16.

Tabulka 7.15 Analýza rozptylu - experiment 4.

Zdroj variability	SS	df	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	111,5	4,0	27,9	161,7	$5,1 \cdot 10^{-33}$	2,5
Všechny výběry	11,2	65,0	0,2			
<b>Celkem</b>	122,7	69,0				

Tabulka 7.16 Multikomparativní testy - experiment 4.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
hudba + hudba_1	1,46	0,26	rozdílné
hudba + hudba_2	2,73	0,26	rozdílné
hudba + hudba_3	3,61	0,26	rozdílné
hudba + hudba_4	1,11	0,26	rozdílné
hudba_1 + hudba_2	1,27	0,26	rozdílné
hudba_1 + hudba_3	2,15	0,26	rozdílné
hudba_1 + hudba_4	0,35	0,26	rozdílné
hudba_2 + hudba_3	0,88	0,26	rozdílné
hudba_2 + hudba_4	1,62	0,26	rozdílné
hudba_3 + hudba_4	2,50	0,26	rozdílné

Na základě těchto testů je zjištěno, že statisticky významný rozdíl v hodnocení signálů existuje u všech párů signálů. To znamená, že mezi všemi testovanými páry signálů existuje vnímatelný fázový rozdíl.

## 7.6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 5

Pro experiment 5 byly zvoleny reálné signály typu potlesk. Frekvenční rozsahy nahrazeného

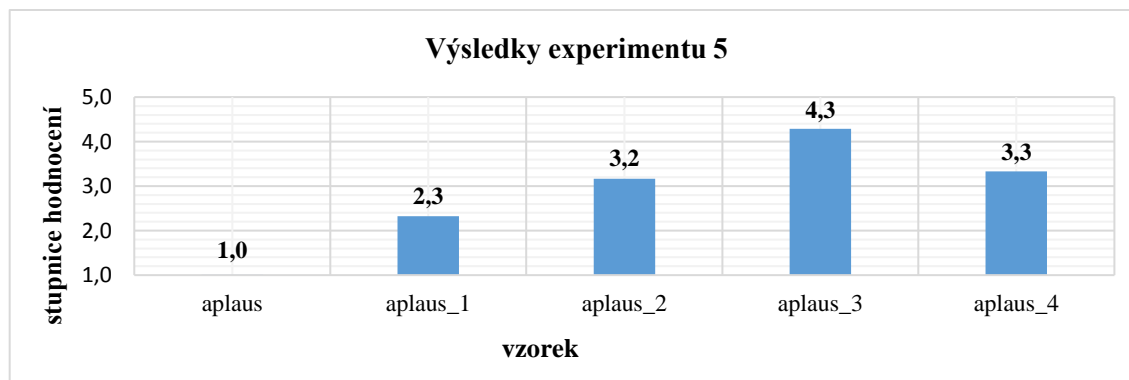
fázového spektra exponenciální funkcí jsou uvedeny v tabulce 7.17. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.14.

Tabulka 7.17 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 5.

Signál	aplous_1	aplous_2	aplous_3	aplous_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 500	500 – 8000	8000 – 24000

Tabulka 7.18 Naměřené hodnoty - experiment 5.

Posluchač	aplous	aplous_1	aplous_2	aplous_3	aplous_4
1	1	2,9	2,5	5	3,6
2	1	1,7	2,9	3,6	1,9
3	1	2,3	2,8	3,8	3,2
4	1,1	2,3	2,8	4,6	3,1
5	1	3,5	4,2	4	3,5
6	1	2,9	3,5	4,2	3,6
7	1	1,5	2,1	3	2,5
8	1	2	5	5	3
9	1	2,2	3,1	4,8	2,8
10	1	2,3	3,1	5	4
11	1	2,3	3	4,4	4,5
12	1	1,9	2,9	4	4,1
13	1	2,5	3,5	4,2	3,6
14	1	2,2	2,9	4,4	3,2
<b>Průměr</b>	1,0	2,3	3,2	4,3	3,3



Obrázek 7.5 Výsledky experimentu 5.7

Z výsledků experimentu 5 znázorněných na obrázku 7.5 vyplývá, že v tomto případě je největší vnímatelný rozdíl způsoben změnou fázového spektra signálu v rozsahu 500 – 8000 Hz. Naopak jako nejméně odlišné se jeví signály s fázovou úpravou nízkých frekvencí (0 – 100 Hz).

### 7.6.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 5

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 3 jsou uvedeny v tabulce 7.19. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.20.

Tabulka 7.19 Analýza rozptylu - experiment 5.

Zdroj variability	SS	Df	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	84,8	4,0	21,2	67,1	$2,3 \cdot 10^{-22}$	2,5
Všechny výběry	20,6	65,0	0,3			
<b>Celkem</b>	105,4	69,0				

Tabulka 7.20 Multikomparativní testy - experiment 5.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
<b>aplaus+ aplaus_1</b>	1,31	0,36	rozdílné
<b>aplaus+ aplaus_2</b>	2,16	0,36	rozdílné
<b>aplaus + aplaus_3</b>	3,28	0,36	rozdílné
<b>aplaus + aplaus_4</b>	2,32	0,36	rozdílné
<b>aplaus_1 + aplaus_2</b>	0,84	0,36	rozdílné
<b>aplaus_1 + aplaus_3</b>	1,96	0,36	rozdílné
<b>aplaus_1 + aplaus_4</b>	1,01	0,36	rozdílné
<b>aplaus_2 + aplaus_3</b>	1,12	0,36	rozdílné
<b>aplaus_2 + aplaus_4</b>	0,16	0,36	stejně
<b>aplaus_3 + aplaus_4</b>	0,96	0,36	rozdílné

Na základě výsledků multikomparativních testů je zjištěno, že statisticky významný rozdíl v hodnocení signálů neexistuje pouze u jednoho páru signálů. Konkrétně se jedná o tento pár signálů:

- **aplaus\_2** (100 – 500 Hz) + **aplaus\_4** (8000 – 24000 Hz)

Pro všechny ostatní testované páry signálů je prokázáno, že mezi nimi existuje vnímatelný fázový rozdíl.

## 7.7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 6

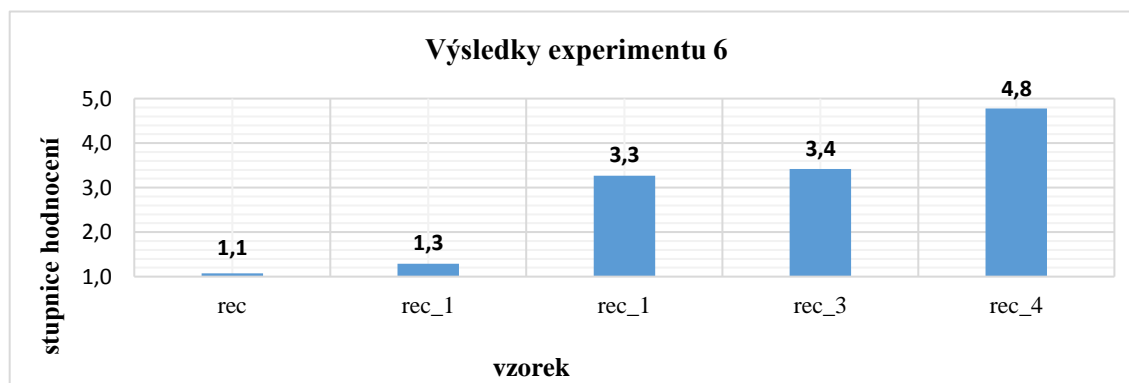
Pro experiment 5 byly zvoleny reálné signály obsahující řeč. Frekvenční rozsahy nahrazeného fázového spektra exponenciální funkcí jsou uvedeny v tabulce 7.21. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.22.

Tabulka 7.21 Kmitočtové rozsahy modifikovaných částí fázových spekter - signály z experimentu 6.

Signál	rec_1	rec_2	rec_3	rec_4
Rozsah kmitočtů [Hz]	0 – 100	100 – 300	300 – 500	500 – 8000

Tabulka 7.22 Naměřené hodnoty - experiment 6.

Posluchač	rec	rec_1	rec_2	rec_3	rec_4
1	1	1,2	3,4	3,7	5
2	1	1,6	3,3	3,9	5
3	1	1,7	2,2	2,1	4
4	1,1	1,4	3,4	4,2	4,9
5	1	1	3,2	4,1	5
6	1	1	3,4	4	5
7	1	1	3	2,5	4
8	1	1	3,4	2,6	5
9	1,2	1,5	2,4	2	4
10	1	1,1	4,3	3	5
11	1,7	1,3	4	4,5	5
12	1	1,6	3,9	3,2	5
13	1	1,3	2,6	4	5
14	1	1,4	3,2	4,1	5
<b>Průměr</b>	1,1	1,3	3,3	3,4	4,8



Obrázek 7.6 Výsledky experimentu 6.

Z výsledků experimentu 6 znázorněných na obrázku 7.6 vyplývá, že největší vnímatelný rozdíl způsobila změna fázového spektra signálu v rozsahu 500 – 8000 Hz. Naopak jako nejméně odlišné z testovaných signálů se jeví signály s fázovou úpravou nízkých frekvencí (0 – 100 Hz).

### 7.7.1 ANALÝZA ROZPTYLU – EXPERIMENT 6

Po provedení Analýzy rozptylu bylo zjištěno  $F > F_{kritické}$ . Z těchto výsledků vyplývá, že existuje alespoň jeden pár signálů, mezi jejichž hodnoceními je statisticky významný rozdíl. Výsledky Analýzy rozptylu pro experiment 2 jsou uvedeny v tabulce 7.23. Analýza rozptylu byla doplněna multikomparativními testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.24.

Tabulka 7.23 Analýza rozptylu - experiment 6.

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	136,8	4,0	34,2	128,7	$3,9 \cdot 10^{-30}$	2,5
Všechny výběry	17,3	65,0	0,3			
<b>Celkem</b>	154,1	69,0				

Tabulka 7.24 Multikomparativní testy - experiment 6.

Srovnání	Absolutní rozdíl	HSD	Střední hodnoty
rec + rec_1	0,22	0,33	stejně
rec + rec_2	2,19	0,33	rozdílné
rec + rec_3	2,35	0,33	rozdílné
rec + rec_4	3,71	0,33	rozdílné
rec_1 + rec_2	1,97	0,33	rozdílné
rec_1 + rec_3	2,13	0,33	rozdílné
rec_1 + rec_4	3,49	0,33	rozdílné
rec_2 + rec_3	0,16	0,33	stejně
rec_2 + rec_4	1,51	0,33	rozdílné
rec_3 + rec_4	1,36	0,33	rozdílné

Na základě těchto testů je zjištěno, že statisticky významný rozdíl v hodnocení signálů neexistuje pouze u dvou párů signálů. Konkrétně se jedná o tyto páry signálů:

- **rec** (reference) + **rec\_1** (0 – 100 Hz)
- **rec\_2** (100 – 300 Hz) + **rec\_3** (300 – 500 Hz)

Znamená to, že mezi těmito dvěma páry signálů není vnímatelný fázový rozdíl. U všech ostatních páru signálů je pomocí multikomparativních testů tento rozdíl prokázán.

## 8. PSYCHOAKUSTICKÝ EXPERIMENT – DRUHÁ ČÁST

Ve druhé části psychoakustického experimentu bylo cílem sestavit, provést a vyhodnotit test pro určení právě rozpoznatelného rozdílu fázových změn v hudebních signálech. Jde o nejmenší postřehnutelný rozdíl (anglicky just noticeable difference, zkráceně JND) neboli práh rozlišitelnosti velikosti podnětu, změřený na podnětovém kontinuu [7].

Hodnota JND v tomto experimentu představuje nejmenší velikost fázových změn signálu, která vyvolá rozdílný vjem v porovnání s originálním signálem. Pro tento psychoakustický experiment bylo zvolena měřicí metoda konstantních podnětů, jejíž princip je popsán v kapitole 4.3.

### 8.1 METODY PRO URČENÍ PRAHOVÉ HODNOTY

V této kapitole jsou uvedeny principy několika metod, kterými lze určit velikost absolutního podnětového prahu. Kromě krátkého vysvětlení principu každé metody je i popsáno, v jakých situacích a za jakých podmínek je vhodné danou metodu pro určení absolutní velikosti podnětového prahu použít či nikoliv.

Při určování absolutní velikosti podnětového prahu jsou matematicky zpracovávány hodnoty měření získané metodou konstantních podnětů. Výchozími daty jsou tak hodnoty relativních četností  $p = f/n$ , kde  $f$  je absolutní četnost odpovědí „1“ a  $n$  je počet opakovaných stimulací stejným podnětem. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.3, absolutní podnětový práh je definován jako hodnota  $S_{0,5}$  podnětové proměnné  $S$ , které na psychometrické křivce, odpovídá hodnota  $p = 0,5$ . Tato hodnota tedy v rámci tohoto psychoakustického experimentu představuje situaci, kdy polovina posluchačů označila podnět  $S_{0,5}$  za odlišný od referenčního podnětu, zatímco druhá polovina posluchačů nerozpoznala mezi podněty žádný rozdíl. Mezi nejznámější a nejpoužívanější metody pro určení hodnoty absolutního podnětového prahu patří tyto:

- Metoda lineární interpolace
- Metoda aritmetického průměru dekulovaného rozdělení
- Metoda sčítání
- Metoda interpolace dat vyrovnaných pomocí normálního rozdělení
- Metoda nejmenších čtverců bez vážení dat
- Metoda nejmenších čtverců s použitím vážení dat podle Müllera a Urbana

#### 8.1.1 METODA LINEÁRNÍ INTERPOLACE

Použití lineární interpolace pro určení absolutního podnětového prahu je nejjednodušší a nejrychlejší metodou. Princip této metody spočívá ve výpočtu úseku křivky lineární interpolací. Tato křivka je ohraničena dvěma body – zdola hodnotou  $S_{sub}$  podprahového podnětu, který leží nejbližší hledanému práhu a shora hodnotou  $S_{supra}$ , která představuje nejbližší nadprahovou hodnotu podnětového prahu. Relativní četnost  $p_{sub}$  pak odpovídá hodnotě  $S_{sub}$ , relativní četnost  $p_{supra}$  odpovídá hodnotě  $S_{supra}$ . Pomocí těchto hodnot lze metodou lineární interpolace určit absolutní podnětový práh jako

$$S_{0,5} = S_{sub} + \frac{(S_{supra} - S_{sub})(0,5 - p_{sub})}{p_{supra} - p_{sub}}. \quad (8.1)$$

Použití této metody není ale nejvhodnějším řešením z několika důvodů. Tím nejpodstatnějším

problémem je fakt, že metoda nepoužívá všechna naměřená data, nicméně pracuje pouze s daty naměřených u dvou podnětů. V případě tohoto psychoakustického experimentu by proto byla více než polovina naměřených dat nevyužita. Z tohoto důvodu je metoda označována za nehospodárnou. Použití této metody by bylo v pořádku v případě, že psychoakustický experiment tvoří pouze dva podněty, které jsou pečlivě zvoleny tak, aby každý ležel na opačné straně předpokládaného prahu. Další nedokonalostí metody je předpoklad, že úsek křivky  $p = p(S)$  mezi body  $S_{sub}$  a  $S_{supra}$  je vždy lineární. Přestože většina psychometrických křivek se v tomto úseku blíží lineárnímu průběhu a chyba způsobená lineární interpolací je zanedbatelná, neplatí tento předpoklad v každém případě. Metoda lineární by proto neměla být použita v případě, že psychoakustický experiment obsahuje více než 4 podněty a je-li požadováno určení přesné hodnoty absolutního prahu a směrodatné odchylky.

### 8.1.2 METODA ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU DEKUMULOVANÉHO ROZDĚLENÍ

Princip metody autora C. E. Spearmana [27] spočívá v dekumulaci získaných kumulativních četností odpovědí „1“. Dekumulací je tak vytvořeno nekumulativní rozdělení absolutních četností v na sebe navazujících intervalech, na které je rozděleno kontinuum podnětové proměnné  $S$ . Za velikost absolutního podnětového prahu  $S_{0,5}$  je pak považována hodnota aritmetického průměru  $M$ , vypočtená z tohoto rozdělení následujícím vzorcem:

$$S_{0,5} = M = S_{stř} + \frac{\Delta S}{n} \sum f x', \quad (8.2)$$

kde

$$x' = \frac{S - S_{stř}}{\Delta S}. \quad (8.3)$$

Směrodatná odchylka  $s$  rozdělení je vypočtena z této rovnice:

$$s = \Delta S \sqrt{\frac{\sum f x'^2 - \frac{(\sum f x')^2}{n}}{n-1}}. \quad (8.4)$$

### 8.1.3 METODA SČÍTÁNÍ

Metoda sčítání je kromě určování absolutního podnětového prahu také často používanou metodou pro určení střední hodnoty a směrodatné odchylky velmi objemných naměřených souborů dat. Tuto metodu lze zvolit v případě, že krajní podněty jsou pro experiment voleny tak, aby získané krajní relativní četnosti těchto podnětů  $p_{min}$  a  $p_{max}$  byly velmi blízké nebo se rovnaly extrémním hodnotám  $p = 0$  a  $p = 1$ . Pomocí následující dvojice rovnic lze získat hodnoty kumulativního rozdělení  $M$ :

$$S_{0,5_1} = M_1 = S_1 - 0,5\Delta S - \Delta S \sum p, \quad (8.5)$$

$$S_{0,5_2} = M_2 = S_0 - 0,5\Delta S - \Delta S \sum q, \quad (8.6)$$

kde

- $S_1$  je hodnota podnětu, při které  $p = 1$ ,
- $S_0$  je hodnota podnětu, při které  $p = 0$ ,
- $\Delta S$  je velikost podnětového intervalu (šířka intervalu mezi sousedními podněty),
- $p$  je relativní četnost odpovědi „1“
- $q = 1 - p$

Absolutní hodnota prahového podnětu je pak stanovena jako střední hodnota  $M$  kumulativního



rozdělení:

$$S_{0,5} = \frac{M_1 + M_2}{2}. \quad 8.7$$

Pro výpočet směrodatné odchylky absolutního podnětového prahu je možné zvolit jednu z následujících dvou rovnic:

$$s = S\sqrt{2\sum p_c - (\sum p)^2 - \sum p}, \quad 8.8$$

$$s = \Delta S\sqrt{2\sum q_c - (q)^2 - \sum q}, \quad 8.9$$

kde  $p_c$  a  $q_c$  jsou součtové relativní četnosti postupně načítané od malých k velkým hodnotám  $p$  a  $q$ .

Z principu metody je zřejmé, že metoda využívá postupného sčítání četností. Vzhledem k tomu, že hodnoty součtových četností jsou přímo získanými daty při použití metody konstantních podnětů, je tato metoda pro určení absolutního podnětového prahu velmi vhodná. Metodu sčítání je vhodné použít v případě, že jsou při experimentu použité více než čtyři podněty a je požadována velmi přesná hodnota absolutního podnětového prahu a jeho směrodatné odchylky.

#### 8.1.4 METODA INTERPOLACE DAT VYROVNANÝCH POMOCÍ NORMÁLNÍHO ROZLOŽENÍ

Tato metoda je bezpochyby přesnější než metoda lineární interpolace, jejíž princip je vysvětlen na začátku této kapitoly. Rozdíl této metody oproti metodě lineární interpolace spočívá v tom, že předpokládá závislost  $p = p(S)$  blízkou se distribuční funkcí standardizovaného normálního rozdělení četností  $p$ . Základním principem metody je transformace změřených hodnot součtových relativních četností  $p$  na hodnoty standardizované proměnné  $z$ . Hodnoty  $z$  jsou pak nazývány jako  $z$ -skóre nebo standardní skóre proměnné  $S$ . Vztah  $z = z(S)$  by po transformaci měl být přibližně lineární [7].

Poloze absolutního podnětového prahu  $S_{0,5}$  po transformaci odpovídá na škále hodnota  $z = 0$ . Pro výpočet hodnoty prahu  $S_{0,5}$  lze použít rovnice

$$S_{0,5} = S_{sub} + \frac{-z_{sub}}{z_{supra} - z_{sub}} (S_{supra} - S_{sub}), \quad 8.10$$

$$S_{0,5} = S_{supra} - \frac{z_{supra}}{z_{supra} - z_{sub}} (S_{supra} - S_{sub}), \quad 8.11$$

kde

- $S_{sub}$  je velikost největšího změřeného podprahového podnětu, kterému odpovídá hodnota standardního  $z_{sub}$ ,
- $S_{supra}$  je velikost nejmenšího změřeného podprahového podnětu, kterému odpovídá hodnota standardního  $z_{supra}$ .

Tato metoda lze použít ve všech případech, kdy lze použít metodu lineární interpolace. Zároveň v případech, kdy je rozdělení normální nebo experiment obsahuje více než čtyři podněty. Hlavní nevýhoda metody lineární interpolace (absolutní práh i směrodatná odchylka jsou určovány pouze ze dvou hodnot relativních četností) zůstává i u této metody. Díky transformaci je ale odstraněna další nedokonalost metody týkající se možné nelinearity části křivky.

#### 8.1.5 METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ BEZ VÁŽENÍ DAT

Tato metoda je dle vhodná, pokud je experiment tvořen více než čtyřmi podněty a zároveň nelze-li

použit metodu sčítání ani metodu výpočtu aritmetického průměru nekumulativního rozdělení. [19]

### 8.1.6 METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ S POUŽITÍM VÁŽENÍ DAT DLE MÜLLERA A URBANA

Tato metoda je nejpracovanější metodou určování absolutního podnětového prahu. Většina experimentů neobsahuje tak velké množství podnětů a naměřená data nejsou natolik jemná, aby se použití této pracné metody vyplatilo [7].

### 8.1.7 VÝBĚR METODY PRO URČENÍ PRAHOVÉ HODNOTY

Po prostudování metod, které lze použít pro určení prahové hodnoty, byla zvolena metoda sčítání (kapitola 8.1.3). Tuto metodu je dle [7] vhodné použít, pokud jsou při měření získané hodnoty relativních četností  $p = 0$  a  $p = 1$  nebo alespoň hodnoty, které se těmto hodnotám přibližují. Při sestavování testu využívající metodu konstantních podnětů je doporučováno zvolit velikost největšího podnětu tak, aby jeho relativní četnost činila přibližně  $p = 0,95$ . Naopak nejmenší podnět je správně zvolen v případě, že jeho relativní četnost přibližně odpovídá hodnotě  $p = 0,05$ . Toto kritérium je proto splněno. Metodu sčítání je dále vhodné použít, je-li počet měřených podnětů  $n \geq 5$ . Jednotlivé psychoakustické testy popisovány v této části práce tvořilo 5 podnětů. Výhodou metody sčítání je získání velmi přesné hodnoty prahu a velmi dobrý odhad směrodatné odchylky prahu [7].

## 8.2 PARAMETRY SIGNÁLŮ

Pro experimenty sloužící k nalezení právě rozpoznatelného rozdílu fázových změn bylo zvoleno tři typy hudebních monofonních signálů:

- Kastaněty
- Popová hudba – Happy, P. Williams
- Vážná hudba – Symfonie č. 9 „Z Nového světa“, A. Dvořák (ukázka ze 4. části Allegro con fuoco)

Pro každý typ signálu byly zvoleny tři frekvenční pásma délky jedné oktávy, ve kterých byly provedeny fázové změny:

- Nízké frekvence: 100 – 200 Hz
- Střední frekvence: 500 – 1000 Hz
- Vysoké frekvence: 5000 – 10000 Hz

Každý modifikovaný signál obsahoval fázové změny pouze v jednom frekvenčním pásmu. Úpravy fázového spektra signálů byly provedeny v prostředí MATLAB. Fourierova transformace signálu byla počítána vždy z celé délky vzorku (bez použití oken). Vzorkovací frekvence všech vzorků je 48 kHz.

### 8.2.1 EXPERIMENT 7

Tento experiment navazuje na výsledky experimentu 3, které jsou popsány v kapitole 7.5. Experiment 3 zkoumá vlivy různých úrovní fázových změn, které byly provedeny na syntetických signálech. Z výsledků vyplývá, že velikost vnímaného rozdílu roste spolu s úrovní fázových změn harmonických složek. V tomto experimentu byl proto proveden stejný typ fázové změny v různých úrovních na reálných hudebních signálech. Cílem experimentu je najít právě rozpoznatelných rozdíl

těchto fázových změn ve třech frekvenčních pásmech každého testovaného typu signálu:

- Nízké frekvence: 100 – 200 Hz
- Střední frekvence: 500 – 1000 Hz
- Vysoké frekvence: 5000 – 10000 Hz

Fázové úpravy spočívají v přiřazení náhodné hodnoty fázového posuvu z určitého intervalu frekvenčním složkám v pásmu o délce jedné oktávy. Interval mezi jednotlivými modifikovanými frekvenčními složkami je  $\frac{f_s}{N}$ , kde  $f_s$  je vzorkovací frekvence nastavena na hodnotu 48 kHz a  $N$  je počet vzorků signálu, který se pro jednotlivé typy signálů liší. Konkrétní intervaly, ze kterých byl frekvenčním složkám přiřazován náhodný fázový posuv, jsou uvedeny v následujících tabulkách. Pro přesné vysvětlení uvedu příklad z tabulky 8.3, název signálu *kastanety\_5c*. Hodnota v tabulce  $\pm 9^\circ$  znamená, že frekvenčním složkám v pásmu 5000 až 10000 Hz fázového spektra je přiřazen náhodný fázový posuv z intervalu od  $-9^\circ$  do  $9^\circ$ .

### Kastaněty

- Počet vzorků signálu  $N = 189217$
- Interval mezi fázově modifikovanými frekvenčními složkami  $n = \frac{f_s}{N} = \frac{48000}{189217} \doteq 0,25$  Hz

Tabulka 8.1 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, nízké frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	kastanety_1a	kastanety_2a	kastanety_3a	kastanety_4a	kastanety_5a
Maximální fázový posun	$\pm 244,8^\circ$	$\pm 270^\circ$	$\pm 293,4^\circ$	$\pm 315^\circ$	$\pm 334,8^\circ$

Tabulka 8.2 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, střední frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	kastanety_1b	kastanety_2b	kastanety_3b	kastanety_4b	kastanety_5b
Maximální fázový posun	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 12,6^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 30,6^\circ$

Tabulka 8.3 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - kastaněty, vysoké frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	kastanety_1c	kastanety_2c	kastanety_3c	kastanety_4c	kastanety_5c
Maximální fázový posun	$\pm 1,8^\circ$	$\pm 3,6^\circ$	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 7,2^\circ$	$\pm 9^\circ$

**Popová hudba**

- Počet vzorků signálu  $N = 300460$
- Interval mezi fázově modifikovanými frekvenčními složkami  $n = \frac{f_s}{N} = \frac{48000}{300460} \doteq 0,16 \text{ Hz}$

Tabulka 8.4 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, nízké frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	pop_1a	pop_2a	pop_3a	pop_4a	pop_5a
Fázový posun	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 90^\circ$	$\pm 158,4^\circ$	$\pm 225^\circ$	$\pm 291,6^\circ$

Tabulka 8.5 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, střední frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	pop_1b	pop_2b	pop_3b	pop_4b	pop_5b
Fázový posun	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 12,6^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 30,6^\circ$

Tabulka 8.6 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - popová hudba, vysoké frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	pop_1c	pop_2c	pop_3c	pop_4c	pop_5c
Fázový posun	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 12,6^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 30,6^\circ$

**Vážná hudba**

- Počet vzorků signálu  $N = 421368$
- Interval mezi fázově modifikovanými frekvenčními složkami  $n = \frac{f_s}{N} = \frac{48000}{421368} \doteq 0,11 \text{ Hz}$

Tabulka 8.7 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, nízké frekvence.

Vážná hudba, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	klasika_1a	klasika_2a	klasika_3a	klasika_4a	klasika_5a
Fázový posun	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 68,4^\circ$	$\pm 113,4^\circ$	$\pm 158,4^\circ$	$\pm 203,4^\circ$

Tabulka 8.8 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, střední frekvence.

Vážná hudba, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	klasika_1b	klasika_2b	klasika_3b	klasika_4b	klasika_5b
Fázový posun	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 12,6^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 23,4^\circ$	$\pm 30,6^\circ$

Tabulka 8.9 Rozsahy fázových posunů v experimentu 7 - vážná hudba, vysoké frekvence.

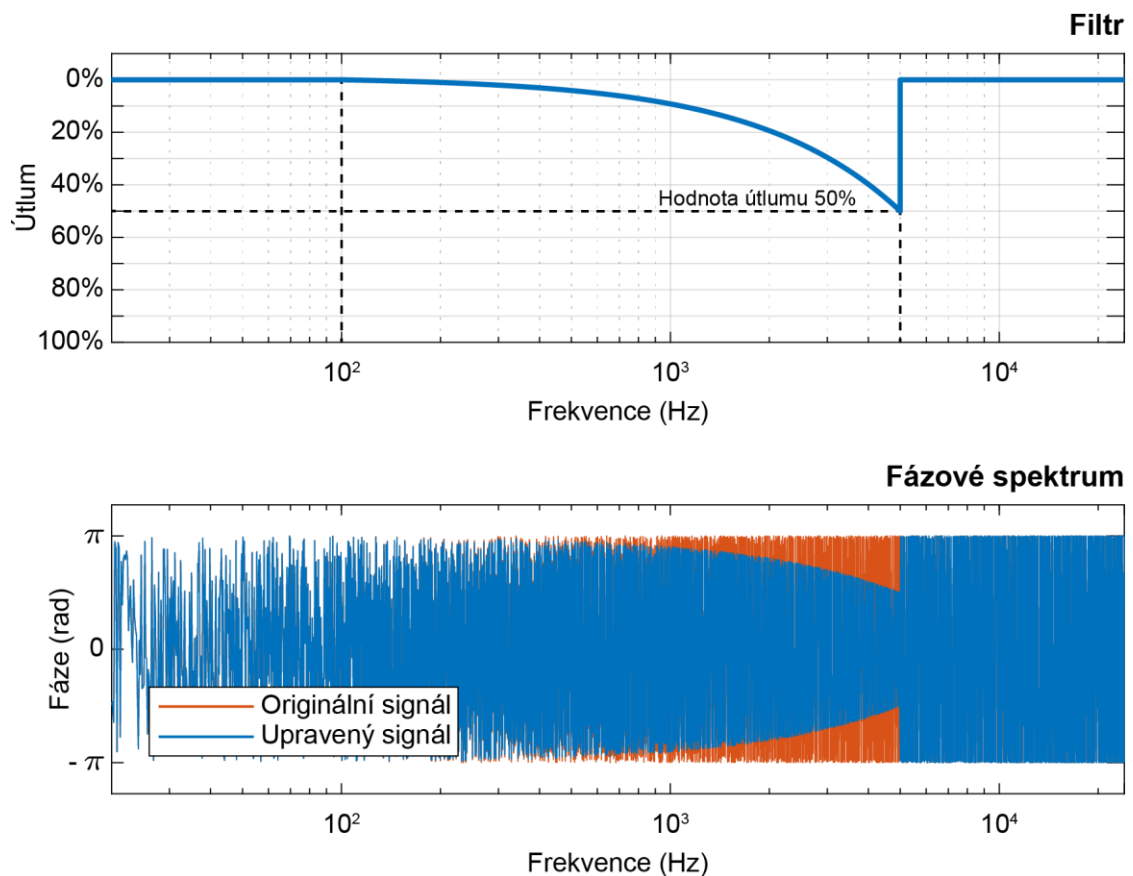
Vážná hudba, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	klasika_1c	klasika_2c	klasika_3c	klasika_4c	klasika_5c
Fázový posun	$\pm 5,4^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 30,6^\circ$	$\pm 41,4^\circ$	$\pm 54^\circ$

## 8.2.2 EXPERIMENT 8

Změna fázového spektra signálů použitých v experimentu 8 spočívala v útlumu určitého intervalu frekvencí lineární funkcí. Velikosti modifikovaných částí fázových spekter jsou stejné jako v případě experimentu 7:

- Nízké frekvence: 100 – 200 Hz
- Střední frekvence: 500 – 1000 Hz
- Vysoké frekvence: 5000 – 10000 Hz

Každý modifikovaný signál obsahoval fázové změny pouze v jednom frekvenčním pásmu. Tato frekvenční pásma fázového spektra byla filtrována klesající lineární funkcí. Úroveň jednotlivých změn se lišila ve strmosti lineární funkce. Jednotlivé upravené signály se tak lišily ve velikosti útlumu fázového spektra. Princip těchto fázových úprav s útlumem 50% je znázorněn na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 Příklad fázové modifikace pro experiment 8 - útlum fázového spektra lineární funkcí.

V následujících tabulkách jsou uvedeny jednotlivé hodnoty útlumu pro zvolené testované signály.

Tabulka 8.10 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, nízké frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	kastanety_1d	kastanety_2d	kastanety_3d	kastanety_4d	kastanety_5d
Útlum [%]	95	96	97	98	99

Tabulka 8.11 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, střední frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	kastanety_1e	kastanety_2e	kastanety_3e	kastanety_4e	kastanety_5e
Útlum [%]	8	18	28	38	48

Tabulka 8.12 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - kastaněty, vysoké frekvence.

Kastaněty, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	kastanety_1f	kastanety_2f	kastanety_3f	kastanety_4f	kastanety_5f
Útlum [%]	1	2	3	4	5

## Popová hudba

Tabulka 8.13 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, nízké frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	pop_1d	pop_2d	pop_3d	pop_4d	pop_5d
Útlum [%]	16	36	56	76	96

Tabulka 8.14 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, střední frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	pop_1e	pop_2e	pop_3e	pop_4e	pop_5e
Útlum [%]	2	12	22	32	42

Tabulka 8.15 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - popová hudba, vysoké frekvence.

Popová hudba, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	pop_1f	pop_2f	pop_3f	pop_4f	pop_5f
Útlum [%]	2	12	22	32	42

## Vážná hudba

Tabulka 8.16 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, nízké frekvence.

Vážná hudba, modifikovaný interval 100 – 200 Hz					
Název signálu	klasika_1d	klasika_2d	klasika_3d	klasika_4d	klasika_5d
Útlum [%]	12	30	48	66	84

Tabulka 8.17 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, střední frekvence.

Vážná hudba, modifikovaný interval 500 – 1000 Hz					
Název signálu	klasika_1f	klasika_2f	klasika_3f	klasika_4f	klasika_5f
Útlum [%]	1	10	19	28	37

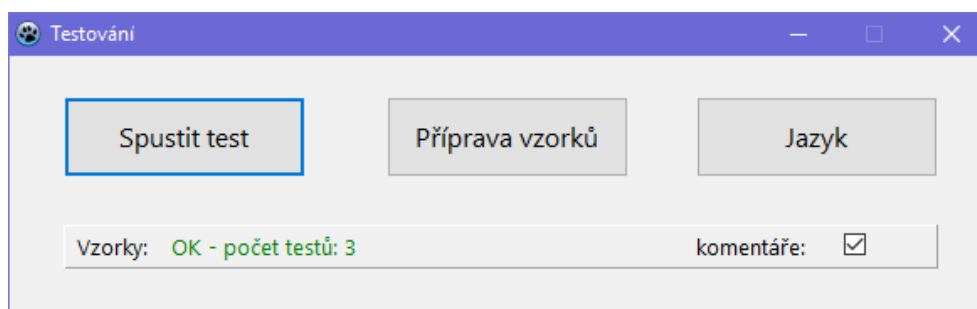
Tabulka 8.18 Hodnoty útlumu fázových spekter v experimentu 8 - vážná hudba, vysoké frekvence.

Vážná hudba, modifikovaný interval 5000 – 10000 Hz					
Název signálu	klasika_1c	klasika_2c	klasika_3c	klasika_4c	klasika_5c
Útlum [%]	1	6	11	16	21

### 8.3 PROGRAM PRO TEST

Pro psychoakustický experiment, který slouží k nalezení hodnoty JND fázových změn byla zvolena metoda konstantních podnětů. Princip této metody je popsán v kapitole 4.3. Pro testování byl proto vytvořen program, který umožňoval porovnávat mezi sebou dva zvukové vzorky a výsledky testů ukládat do tabulek. Posluchači si v jednotlivých testech přehrávali dva zvukové vzorky a jejich úkolem bylo rozhodnout, zda je mezi nimi slyšitelný rozdíl. Program umožňuje vložit až 10 sad zvukových souborů, které ze kterým vytvoří psychoakustický test na základě metody konstantních podnětů. V každé sadě zvukových souborů je zvolen referenční vzorek, se kterým budou ostatní vzorky porovnávány. Dále je možné určit počet opakování jednotlivých testů. Z důvodu předejití únavy testujících osob nejsou po sobě testovány dvojice vzorků stejného typu. Naopak program volí pořadí dvojice vzorků tak, aby stejné typy vzorků od sebe byly co nejdále.

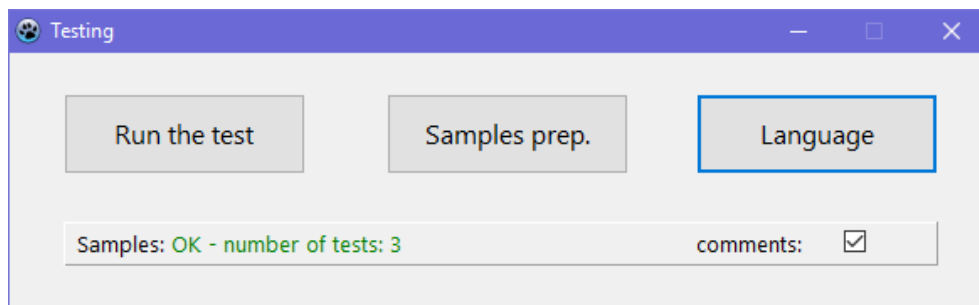
Hlavní okno programu je znázorněno na obrázku 8.2. Z tohoto okna lze spustit testování, přípravu vzorků a změnit jazyk programu. Po spuštění programu je načteno z textových souborů nastavení jazyka a předvolba ukládání komentářů. Program si toto nastavení při jeho změně ukládá a při novém spuštění. Během spuštění se současně kontroluje dostupnost vzorků pro testování. V případě jejich nenalezení program nepovolí spustit testování. Počet testů nebo případná výstraha je zobrazena ve spodní části hlavního okna programu. V dolní části okna je dále zobrazen stav vzorků a volba záznamu komentáře. Pomocí zaškrtnutí políčka „komentář“ je možné zvolit ukládání komentářů k rozdílu mezi vzorky. V případě nezaškrtnutí políčka se během testu okno pro záznam komentáře uživateli nezobrazí a zaznamenávat se budou pouze odpovědi ano/ne.



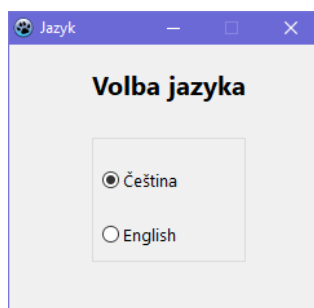
Obrázek 8.2 Hlavní okno programu.

## Jazyk

Kliknutím na tlačítko „Jazyk“ je možné přepnout celé rozhraní programu do angličtiny.



Obrázek 8.3 Hlavní okno – anglická verze.



Obrázek 8.4 Volba jazyka.

## Příprava vzorků

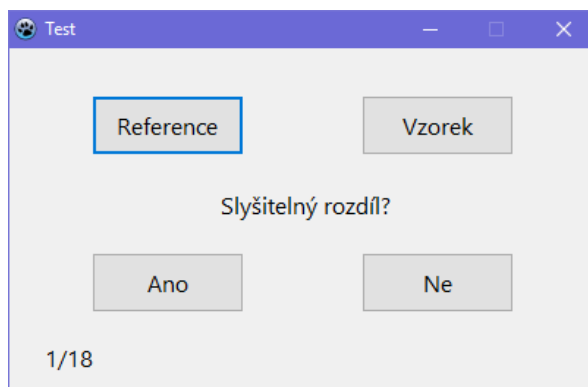
Funkce Příprava vzorků slouží k přípravě jednotlivých testů a jejich nastavení. Program podporuje tvorbu maximálně 10 testů. Před vkládáním souborů uživatel pomocí posuvníku zvolí požadovaný počet testů. Vzorky lze následně vkládat hromadně metodou „drag and drop“ (táhní a pusť) do jednotlivých testů a následně vybírat z rozevíracích nabídek referenční vzorky. Před vytvořením nových testovacích dat se vždy vymažou data stará. Uživatel je na tuto skutečnost upozorněn výstrahou a má možnost předchozí vzorky a výsledky testů ručně zálohovat. Po kliknutí na tlačítko „Dokončit“ se kontroluje vyplnění všech potřebných údajů a v případě jejich úplnosti se přikročí k vlastní tvorbě kombinací pro testování. Program podle počtu vzorků a počtu opakování automaticky vytvoří soubory CSV s číslem testu a rozřazením vzorků do tabulek. Současně se také vytvoří soubory pro uložení komentářů, pokud je tato možnost zaškrtnuta v hlavním okně programu. Počet připravených testů je zobrazený v hlavním okně programu a je kontrolován při každém spuštění.

## Testování

Při testování je uživateli zobrazeno okno se čtyřmi tlačítky. Pomocí tlačítek „Reference“ a „Vzorek“ spouští uživatel přehrávání referenčního a testovaného vzorku. Tlačítka „Ano“ a „Ne“ hodnotí uživatel rozdíl mezi jednotlivými vzorky. V levém dolním rohu je zobrazeno číslo aktuální dvojice vzorku. Počet všech dvojic vzorků je zobrazen za lomítkem. Po kliknutí na tlačítko „Spustit test“ program načte data ze souborů CSV, připraví se pro zápis výsledků a otevře okno pro uživatele. Program v závislosti na průběhu testu náhodně vybírá k přehrávání vzorky z předpřipravených testovacích dat. Uživatel může referenční i testovaný vzorek přehrávat opakovaně. Po kliknutí na tlačítko „Ano“ nebo „Ne“ se odpověď запиše do paměti a zobrazí se piktogram nad stisknutým tlačítkem pro lepší zpětnou vazbu uživateli. V případě kliknutí na tlačítko „Ano“ a zaškrtnuté možnosti přidání komentáře se zobrazí okno s textovým polem pro popsání rozdílu mezi vzorky. I v



tomto okně si může uživatel testované vzorky opět přehrát. Po kliknutí na tlačítko „Uložit a pokračovat“ se komentář uloží a pokračuje se v další části testu. Vzorky z jednotlivých testů a jsou postupně předkládány uživateli k hodnocení. Systém výběru vzorků je takový, že se nikdy neopakují dvakrát za sebou vzorky ze stejného testu. Počet vzorků i počet opakování se může v jednotlivých testech lišit. Program je na tuto situaci připraven už metodou výběru vzorků. Po skončení testování se výsledky uloží do souborů CSV a uživateli je zobrazeno oznámení o ukončení testu spolu s dobou trvání testu. V případě spuštění dalšího testování program připojuje výsledky do již vytvořených souborů CSV.



Obrázek 8.5 Testovací okno.

## 8.4 POSLECHOVÝ TEST

Připravený psychoakustický experiment byl proveden na katedře radioelektroniky v audiologické komoře, která zajišťuje izolaci od okolního hluku. Experimentu se zúčastnilo 10 osob s výjimkou autorky. Každé testující osobě byl nejprve vysvětlen princip testování. Následně byl testující vyzván, aby si vyzkoušel zkušební test. V případě nutnosti bylo testujícím dovoleno testování přerušit a odreagovat se.

Pro testování bylo použité grafické rozhraní znázorněné na obrázku 8.4. Účastníci experimentu rozhodovali, zda existuje slyšitelný rozdíl mezi referenčním a modifikovaným signálem. Testující mohli libovolně a opakovaně přehrávat referenční nebo modifikovaný signál, dokud si nebyli jisti svým hodnocením. Vzhledem k tomu závisela celková doba testu na rychlosti hodnocení. Celková doba testu nikdy nepřesáhla 15 minut, průměrný průběh testu trval přibližně 10 minut. Před zahájením testu byly všechny testované osoby požádány o vyplnění krátkého formuláře, který obsahoval otázky týkající se věku, pohlaví a zkušeností s psychoakustickými testy. Všichni zúčastnění v psychoakustickém experimentu měli předchozí zkušenosti s poslechovými testy. Z celkového počtu 10 osob se experimentu zúčastnilo 8 mužů a 2 ženy ve věku 23 až 30 let.

Při psychoakustickém experimentu v audiologické komoře byly použity tyto typy přístrojů:

- zvuková karta RME Fireface UC
- sluchátka AKG K1000

Stejně jako v první části experimentu byla i v této části vynechána korekce fázové odezvy sluchátek. Opět všechny testující osoby používali při experimentu stejná sluchátka a při každém testování tak byly vytvořeny stejné podmínky.



## 9. VYHODNOCENÍ DRUHÉ ČÁSTI PSYCHOAKUSTICKÉHO EXPERIMENTU

Cílem druhé části experimentu bylo nalezení právě rozpoznatelného rozdílu fázových změn. Psychoakustické testy byly sestaveny na základě metody konstantních podnětů. Pro určení hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu byla zvolena metoda sčítání. Právě rozpoznatelný rozdíl v tomto experimentu představuje nejmenší velikost fázových změn signálu, která vyvolá rozdílný vjem v porovnání s originálním signálem. Pro testování byly zvoleny tři typy hudebních ukázek – kastaněty, popová hudba a vážná hudba. Pro každý typ ukázky byly provedeny dva druhy fázových změn:

- Experiment 7 – Fázový posuv daného intervalu frekvenčních složek
- Experiment 8 – Útlum části fázového spektra lineární funkcí

V obou experimentech byly fázové změny každého typu signálu provedeny ve třech frekvenčních pásmech:

- Nízké frekvence: 100 – 200 Hz
- Střední frekvence: 500 – 1000 Hz
- Vysoké frekvence: 5000 – 10000 Hz

Celkem tak byly určeny v rámci jednoho experimentu tři hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu pro každý signál. Výsledky testů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 9.1 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 7

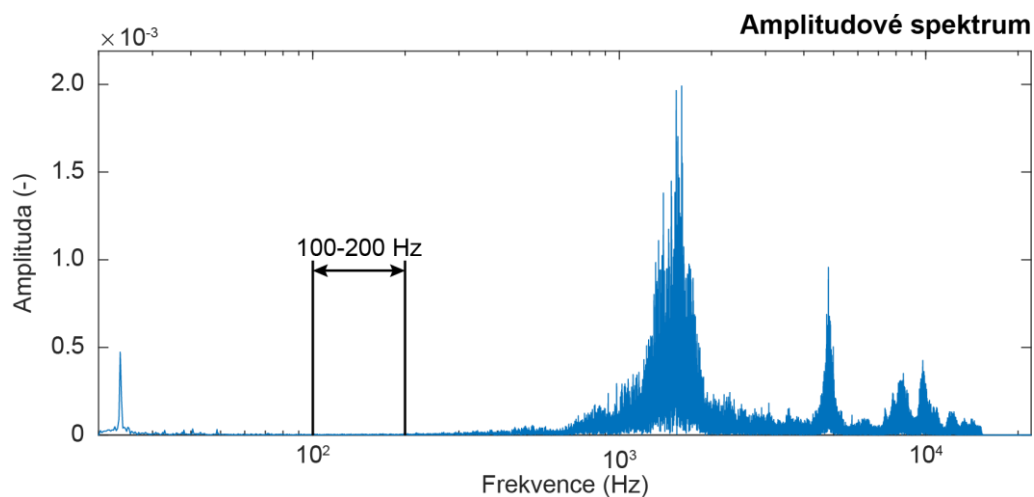
Fázové úpravy aplikované na signály použité v experimentu 7 spočívají v přiřazení náhodné hodnoty fázového posuvu z určitého intervalu frekvenčním složkám v pásmu délky jedné oktávy. Hledanou hodnotu JND představuje velikost tohoto intervalu. V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřená data a konkrétní zjištěné hodnoty JND.

### 9.1.1 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.1 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 – 200 Hz				
	kastanety_1a	kastanety_2a	kastanety_3a	kastanety_4a	kastanety_5a
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	1	0	1	0
8	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
$\Sigma R$	0	1	0	2	2
$\Sigma R/n=p$	0	0,1	0	0,2	0,2

Z těchto získaných hodnot uvedených v tabulce 9.1 není možné právě rozpoznatelný rozdíl určit, protože v téměř všech případech označili testující osoby fázově modifikované signály za shodné s referenčním signálem. To je způsobeno tím, že signál typu kastaněty obsahuje především vysokofrekvenční složky (viz. amplitudové spektrum na obrázku 9.1).



Obrázek 9.1 Amplitudové spektrum signálu kastaněty.

### 9.1.2 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.2 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 – 1000 Hz				
	kastanety_1b	kastanety_2b	kastanety_3b	kastanety_4b	kastanety_5b
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	1
3	0	1	0	1	1
4	0	0	0	0	1
5	0	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0
7	0	0	1	1	1
8	0	0	0	1	1
9	0	1	1	0	1
10	0	0	0	1	1
$\Sigma R$	0	2	3	4	9
$\Sigma R/n=p$	0	0,2	0,3	0,4	0,9

Tabulka 9.3 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - kastaněty, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
30,6	0,9	0,1	1,8	0,1
23,4	0,4	0,6	0,9	0,7
18	0,3	0,7	0,5	1,4
12,6	0,2	0,8	0,2	2,2
5,4	0	1	0	3,2
$\Sigma$	1,8	3,2	3,4	7,6

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 23^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 10^\circ$

## 9.1.3 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.4 Naměřené hodnoty experimentu 7 - kastaněty, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	kastanety_1c	kastanety_2c	kastanety_3c	kastanety_4c	kastanety_5c
1	0	0	0	1	1
2	0	0	0	1	1
3	1	0	0	1	1
4	0	0	0	1	1
5	0	0	0	1	1
6	0	0	1	1	1
7	0	1	0	0	1
8	0	0	0	1	1
9	0	1	1	0	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	1	2	3	8	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,2	0,3	0,8	1

Tabulka 9.5 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - kastaněty, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
9	1	0	2,4	0
7,2	0,8	0,2	1,4	0,2
5,4	0,3	0,7	0,6	0,9
3,6	0,2	0,8	0,3	1,7
1,8	0,1	0,9	0,1	2,6
$\Sigma$	2,4	2,6	4,8	5,4

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 6^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 2^\circ$

### 9.1.4 POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.6 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 –200 Hz				
	pop_1a	pop_2a	pop_3a	pop_4a	pop_5a
1	0	0	1	0	1
2	0	1	0	1	1
3	0	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1
5	0	0	1	1	1
6	0	1	0	1	1
7	0	0	0	1	1
8	0	0	1	1	1
9	0	0	1	1	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	0	3	6	9	10
$\Sigma R/n=p$	0	0,3	0,6	0,9	1

Tabulka 9.7 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, nízké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
291,6	1	0	2,8	0
225	0,9	0,1	1,8	0,1
158,4	0,6	0,4	0,9	0,5
90	0,3	0,7	0,3	1,2
23,4	0	1	0	2,2
$\Sigma$	2,8	2,2	5,8	4

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 138^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 65^\circ$

## 9.1.5 POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.8 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 –1000 Hz				
	pop_1b	pop_2b	pop_3b	pop_4b	pop_5b
1	0	0	1	1	1
2	0	0	0	1	1
3	0	1	0	1	1
4	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	1
6	0	0	0	1	1
7	0	1	1	0	1
8	0	0	0	0	1
9	0	0	1	1	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	0	2	5	7	10
$\Sigma R/n=p$	0	0,2	0,5	0,7	1

Tabulka 9.9 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
30,6	1	0	2,4	0
23,4	0,7	0,3	1,4	0,3
18	0,5	0,5	0,7	0,8
12,6	0,2	0,8	0,2	1,6
5,4	0	1	0	2,6
$\Sigma$	2,4	2,6	4,7	5,3

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 19^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 8^\circ$



### 9.1.6 POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.10 Naměřené hodnoty experimentu 7 - popová hudba, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	pop_1c	pop_2c	pop_3c	pop_4c	pop_5c
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	1	1
3	0	0	0	0	1
4	0	0	1	1	1
5	1	0	1	1	1
6	0	1	0	1	1
7	0	1	1	0	1
8	0	0	0	1	1
9	0	1	0	1	1
10	0	0	0	1	1
$\Sigma R$	1	3	4	8	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,3	0,4	0,8	1

Tabulka 9.11 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - popová hudba, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
30,6	1	0	2,6	0
23,4	0,8	0,2	1,6	0,2
18	0,4	0,6	0,8	0,8
12,6	0,3	0,7	0,4	1,5
5,4	0,1	0,9	0,1	2,4
$\Sigma$	2,6	2,4	5,5	4,9

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 17^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 9^\circ$

## 9.1.7 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.12 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 –200 Hz				
	klasika_1a	klasika_2a	klasika_3a	klasika_4a	klasika_5a
1	0	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1
3	0	1	1	1	1
4	0	0	1	0	1
5	1	0	0	1	1
6	0	0	1	1	1
7	0	0	0	1	1
8	0	1	1	1	1
9	0	1	1	1	1
10	0	0	1	0	1
$\Sigma R$	1	4	7	7	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,4	0,7	0,7	1

Tabulka 9.13 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, nízké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
203,4	1	0	2,9	0
158,4	0,7	0,3	1,9	0,3
113,4	0,7	0,3	1,2	0,6
68,4	0,4	0,6	0,5	1,2
23,4	0,1	0,9	0,1	2,1
$\Sigma$	2,9	2,1	6,6	4,2

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 95^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 62^\circ$

### 9.1.8 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.14 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 –1000 Hz				
	klasika_1b	klasika_2b	klasika_3b	klasika_4b	klasika_5b
1	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	1
4	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	1
6	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	1
8	0	0	0	1	1
9	0	1	1	1	1
10	0	0	0	1	1
$\Sigma R$	0	2	4	7	10
$\Sigma R/n=p$	0	0,2	0,4	0,7	1

Tabulka 9.15 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
30,6	1	0	2,3	0
23,4	0,7	0,3	1,3	0,3
18	0,4	0,6	0,6	0,9
12,6	0,2	0,8	0,2	1,7
5,4	0	1	0	2,7
$\Sigma$	2,3	2,7	4,4	5,6

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 19^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 8^\circ$

## 9.1.9 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.16 Naměřené hodnoty experimentu 7 - vážná hudba, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	klasika_1c	klasika_2c	klasika_3c	klasika_4c	klasika_5c
1	0	0	1	1	1
2	0	0	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	0
6	0	1	1	1	1
7	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	1
9	0	0	1	1	1
10	0	0	0	0	1
$\Sigma R$	1	2	6	8	9
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,2	0,6	0,8	0,9

Tabulka 9.17 Výsledky experimentu 7 získané metodou sčítání - vážná hudba, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
54	0,9	0,1	2,6	0,1
41,4	0,8	0,2	1,7	0,3
30,6	0,6	0,4	0,9	0,7
18	0,2	0,8	0,3	1,5
5,4	0,1	0,9	0,1	2,4
$\Sigma$	2,6	2,4	5,6	5

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = \pm 28^\circ$
- Směrodatná odchylka  $s = 17^\circ$

### 9.1.10 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 7

Z dat získaných od vzorku 10 osob byly určeny hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu tří typů hudebních ukázek ve třech frekvenčních pásmech. V následující tabulce 9.18 jsou uvedeny všechny konkrétní výsledky.

Tabulka 9.18 Výsledky experimentu 7.

Typ hudby	Modifikované pásmo fázového spektra [Hz]	JND [°] Fázový posun
kastaněty	100 - 200	nelze určit
	500 - 1000	±23
	5000 - 10000	±6
popová hudba	100 - 200	±138
	500 - 1000	±19
	5000 - 10000	±17
vážná hudba	100 - 200	±95
	500 - 1000	±19
	5000 - 10000	±28

Z tohoto experimentu vyplývá, že v případě fázové modifikace vysokých frekvencí je JND hodnota v řádu jednotek až dvou desítek stupňů. JND fázových změn na středních frekvencích vychází v řádu dvou desítek stupňů. Při fázové modifikaci nízkých frekvencí odpovídá JND hodnotám v řádu jedné stovky stupňů. Tyto hodnoty JND bylo možné určit pouze pro signály obsahující popovou a vážnou hudbu. Pro signál typu kastaněty nebylo možné hodnotu JND určit, protože ve většině případech testující osoby označili fázově modifikované signály za shodné s referenčním signálem. To je způsobeno tím, že signál typu kastaněty obsahuje především vysokofrekvenční složky.

## 9.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU 8

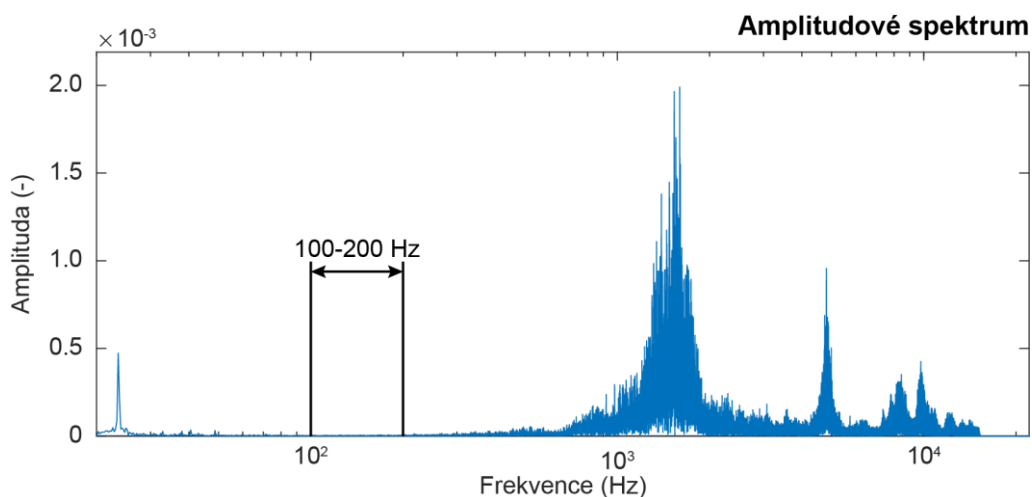
Změna fázového spektra signálů použitých v experimentu 8 spočívala v útlumu určitého frekvenčního intervalu lineární funkcí. Modifikovaná byla část fázového spektra o šířce jedné oktávy. Hledanou hodnotu JND představuje hodnota útlumu. V následujících tabulkách jsou uvedena naměřená data a konkrétní zjištěné hodnoty JND.

### 9.2.1 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.19 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 – 200 Hz				
	kastanety_1d	kastanety_2d	kastanety_3d	kastanety_4d	kastanety_5d
1	0	1	1	1	1
2	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	1
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
$\Sigma R$	1	2	2	1	3
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3

Z těchto získaných hodnot uvedených v tabulce 9.19 není možné právě rozpoznatelný rozdíl určit, protože v téměř všech případech označili testující osoby fázově modifikované signály za shodné s referenčním signálem. To je způsobeno tím, že signál typu kastaněty obsahuje především vysokofrekvenční složky. Tuto vlastnost signálu dokazuje jeho amplitudové spektrum, které je znázorněno na obrázku 9.2.



Obrázek 9.2 Amplitudové spektrum signálu kastaněty.

## 9.2.2 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.20 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 – 1000 Hz				
	kastanety_1e	kastanety_2e	kastanety_3e	kastanety_4e	kastanety_5e
1	0	1	1	1	1
2	0	0	0	1	1
3	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	1
7	0	0	0	1	1
8	0	0	1	1	1
9	0	0	1	1	1
10	0	0	1	0	1
$\Sigma R$	1	4	7	9	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,4	0,7	0,9	1

Tabulka 9.21 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - kastaněty, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
48	1	0	3,1	0
38	0,9	0,1	2,1	0,1
28	0,7	0,3	1,2	0,4
18	0,4	0,6	0,5	1
8	0,1	0,9	0,1	1,9
$\Sigma$	3,1	1,9	7	3,4

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 22 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 11 \%$

## 9.2.3 KASTANĚTY – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.22 Naměřené hodnoty experimentu 8 - kastaněty, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	kastanety_1f	kastanety_2f	kastanety_3f	kastanety_4f	kastanety_5f
1	0	1	1	1	1
2	0	0	0	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	1
7	0	0	0	1	1
8	0	1	1	1	1
9	0	1	1	1	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	2	6	7	10	10
$\Sigma R/n=p$	0,2	0,6	0,7	1	1

Tabulka 9.23 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - kastaněty, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
5	1	0	3,5	0
4	1	0	2,5	0
3	0,7	0,3	1,5	0,3
2	0,6	0,4	0,8	0,7
1	0,2	0,8	0,2	1,5
$\Sigma$	3,5	1,5	8,5	2,5

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 2 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 1 \%$



## 9.2.4 POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.24 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 –200 Hz				
	pop_1d	pop_2d	pop_3d	pop_4d	pop_5d
1	0	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1
3	0	1	0	0	1
4	0	0	0	0	1
5	1	0	0	1	0
6	0	0	0	1	1
7	0	1	0	1	1
8	0	0	1	0	1
9	0	0	0	0	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	1	3	4	6	9
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,3	0,4	0,6	0,9

Tabulka 9.25 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, nízké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
96	0,9	0,1	2,3	0,1
76	0,6	0,4	1,4	0,5
56	0,4	0,6	0,8	1,1
36	0,3	0,7	0,4	1,8
16	0,1	0,9	0,1	2,7
$\Sigma$	2,3	2,7	5	6,2

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 60 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 31 \%$

## 9.2.5 POPOVÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.26 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 –1000 Hz				
	pop_1e	pop_2e	pop_3e	pop_4e	pop_5e
1	0	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1
5	0	0	0	1	1
6	0	0	0	1	1
7	0	1	1	1	1
8	0	0	1	1	1
9	1	0	0	1	1
10	0	1	1	1	1
$\Sigma R$	1	5	6	10	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,5	0,6	1	1

Tabulka 9.27 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
42	1	0	3,2	0
32	1	0	2,2	0
22	0,6	0,4	1,2	0,4
12	0,5	0,5	0,6	0,9
2	0,1	0,9	0,1	1,8
$\Sigma$	3,2	1,8	7,3	3,1

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 16 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 11 \%$

### 9.2.6 POPOVÁ HUDBA– FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.28 Naměřené hodnoty experimentu 8 - popová hudba, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	pop_1f	pop_2f	pop_3f	pop_4f	pop_5f
1	0	0	1	1	1
2	0	1	0	1	1
3	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1
6	1	0	1	1	1
7	0	1	1	1	1
8	0	0	1	0	1
9	0	0	1	1	1
10	0	0	0	1	1
$\Sigma R$	1	5	8	9	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,5	0,8	0,9	1

Tabulka 9.29 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - popová hudba, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
42	1	0	3,3	0
32	0,9	0,1	2,3	0,1
22	0,8	0,2	1,4	0,3
12	0,5	0,5	0,6	0,8
2	0,1	0,9	0,1	1,7
$\Sigma$	3,3	1,7	7,7	2,9

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 14 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 11 \%$

## 9.2.7 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA NÍZKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.30 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, nízké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 100 –200 Hz				
	klasika_1d	klasika_2d	klasika_3d	klasika_4d	klasika_5d
1	0	1	1	1	1
2	0	0	1	0	1
3	0	1	0	1	1
4	0	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1
6	0	1	0	1	1
7	0	0	1	1	1
8	1	1	1	0	1
9	0	0	0	0	1
10	0	0	1	1	1
$\Sigma R$	1	5	6	7	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,5	0,6	0,7	1

Tabulka 9.31 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - vážná hudba, nízké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
84	1	0	2,9	0
66	0,7	0,3	1,9	0,3
48	0,6	0,4	1,2	0,7
30	0,5	0,5	0,6	1,2
12	0,1	0,9	0,1	2,1
$\Sigma$	2,9	2,1	6,7	4,3

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 41 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 26\%$

### 9.2.8 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA STŘEDNÍCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.32 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, střední frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 500 –1000 Hz				
	klasika_1f	klasika_2f	klasika_3f	klasika_4f	klasika_5f
1	0	0	1	1	1
2	0	0	1	1	1
3	0	1	1	1	1
4	0	1	0	1	1
5	0	0	0	1	1
6	1	1	0	1	1
7	0	1	1	1	1
8	0	1	1	1	1
9	0	0	0	1	1
10	0	1	1	1	1
$\Sigma R$	1	6	6	10	10
$\Sigma R/n=p$	0,1	0,6	0,6	1	1

Tabulka 9.33 Výsledky experimentu 8 získané metodou sčítání - vážná hudba, střední frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
37	1	0	3,3	0
28	1	0	2,3	0
19	0,6	0,4	1,3	0,4
10	0,6	0,4	0,7	0,8
1	0,1	0,9	0,1	1,7
$\Sigma$	3,3	1,7	7,7	2,9

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 12 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 10 \%$

## 9.2.9 VÁŽNÁ HUDBA – FÁZOVÉ ZMĚNY NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tabulka 9.34 Naměřené hodnoty experimentu 8 - vážná hudba, vysoké frekvence.

Posluchač	Frekvenční interval 5000 –10000 Hz				
	klasika_1e	klasika_2e	klasika_3e	klasika_4e	klasika_5e
1	0	1	1	1	1
2	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	1
4	0	0	1	1	1
5	0	1	0	1	1
6	0	1	1	1	1
7	0	0	1	1	1
8	0	1	1	1	1
9	0	1	1	1	1
10	0	1	1	1	1
$\Sigma R$	0	6	8	10	10
$\Sigma R/n=p$	0	0,6	0,8	1	1

Tabulka 9.35 Zpracování dat experimentu 8 metodou sčítání – vážná hudba, vysoké frekvence.

S	p	q	$p_c$	$q_c$
21	1	0	3,4	0
16	1	0	2,4	0
11	0,8	0,2	1,4	0,2
6	0,6	0,4	0,6	0,6
1	0	1	0	1,6
$\Sigma$	3,4	1,6	7,8	2,4

Po zpracování naměřených dat metodou sčítání byla určena tato hodnota právě rozpoznatelného rozdílu:

- Právě rozpoznatelný rozdíl  $S_{0,5} = 7 \%$
- Směrodatná odchylka  $s = 4 \%$

### 9.2.10 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 8

Z dat získaných od vzorku 10 osob byly určeny hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu tří typů hudebních ukázek ve třech frekvenčních pásmech. V následující tabulce 9.18 jsou uvedeny všechny konkrétní výsledky JND vyjádřených v procentuální hodnotě útlumu fázového spektra lineární funkcí.

Tabulka 9.36 Výsledky experimentu 8.

Typ hudby	Modifikované pásmo fázového spektra [Hz]	JND [%] Útlum lineární funkcí
kastaněty	100 - 200	nelze určit
	500 - 1000	22
	5000 - 10000	2
popová hudba	100 - 200	60
	500 - 1000	16
	5000 - 10000	14
vážná hudba	100 - 200	41
	500 - 1000	12
	5000 - 10000	7

Ze získaných dat experimentu 8 byly v případě útlumu fázového spektra v pásmu vysokých frekvencí zjištěny hodnoty JND v oblasti jednotek až desítky procent. V případě útlumu fázového spektra v oblasti středních frekvencí byly zjištěny hodnoty JND v oblasti jedné až dvou desítek procent. Největších hodnot dosahovala hodnota JND při útlumu fázového spektra v pásmu nízkých frekvencí. V tomto případě bylo JND určeno v oblasti několika desítek procent. Pro hudební signál typu kastaněty nebylo možné určení hodnoty JND na nízkých frekvencích, protože ve většině případech testující osoby označili fázově modifikované signály za shodné s referenčním signálem. To je způsobeno tím, že signál typu kastaněty obsahuje především vysokofrekvenční složky.





## 10. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit, zda fázové změny hudebních signálů způsobují vnímatelný sluchový rozdíl a určit právě rozpoznatelný rozdíl dvou typů fázových změn. K dosažení těchto výsledků bylo připraveno několik dílčích psychoakustických experimentů, které obsahovaly fázově modifikované hudební signály.

V první části psychoakustického experimentu byly testovány dvě skupiny signálů – reálné a syntetické signály. Pro každou skupinu byly vytvořeny tři sady signálů. Celkem tak bylo připraveno šest dílčích experimentů, kterých se zúčastnilo 14 testujících osob. Druhá část psychoakustických experimentů byla vytvořena za účelem určení hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu dvou zvolených případů fázových změn hudebních signálů. Tyto experimenty byly provedeny na skupině 10 osob. Výsledky testů potvrdily tvrzení nedávných studií a prokázaly, že lidské ucho není takzvaně fázově hluché, a že změna fázového spektra signálu má významný vliv na sluchový vjem. Dále byly určeny hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu dvou fázových modifikací pro tři typy hudebních signálů a tři různá frekvenční pásma.

Experiment 1 byl proveden pro porovnání vlivu fázových a amplitudových změn. Výsledky toho dokazují, že v případě tohoto experimentu má znáhodnění fázového spektra signálu podstatně větší vliv na sluchový vjem než znáhodnění amplitudového spektra. Signál, jehož počáteční fáze jednotlivých harmonických složek je náhodná z intervalu od 0 do  $2\pi$ , byl testujícími na stupnici označen jako téměř maximálně odlišný od referenčního signálu, jehož všechny harmonické složky jsou ve fázi. Z výsledků ostatních testovaných signálů bylo zjištěno, že velikost vnímaného rozdílu roste se změnou amplitudového spektra.

Experiment 2 byl zaměřen na zkoumání vlivu fázového posunu jedné harmonické složky. Z přechodí studie bylo zjištěno, že zesílení amplitudy harmonické složky způsobuje stejný efekt jako v případě jejího fázového posunu. Dalším úkolem testu bylo proto nalézt hodnotu zesílení amplitudy harmonické složky s frekvencí 3 kHz, která způsobuje stejný efekt jako v případě maximálního fázového posunu téže harmonické složky o  $180^\circ$ . Výsledky ukazují, že signál s posunutou harmonickou složkou na frekvenci 3 kHz o  $180^\circ$  byl ohodnocen stejně odlišný od referenčního signálu jako signál, jehož všechny harmonické složky jsou ve fázi, ale amplituda harmonické složky s frekvencí 3 kHz je zesílena o 9 dB. Bylo tak prokázáno, že fázový posun jedné harmonické složky s frekvencí 3 kHz způsobuje stejně odlišný sluchový vjem jako přičtení další kosinové složky s frekvencí 3 kHz, jejíž hlasitost je zesílena o 9 dB.

Experimenty 4, 5 a 6 obsahovaly reálné zvukové signály s modifikovaným fázovým spektrem. V těchto případech byly části fázového spektra nahrazeny exponenciální funkcí. Jak je zřejmé ze získaných výsledků, největší rozdíl byl v každém experimentu zaznamenán mezi referenčním signálem a signály s modifikovanou částí fázového spektra v rozsahu 500 - 8000 Hz. Jednotlivé výsledky těchto tří experimentů se navzájem neliší. Příčinou tohoto výsledku je pravděpodobně fakt, že zvukové signály typu potlesk a řeč patří dle nedávných studií do skupiny takzvaně fázově citlivých signálů. Na druhé straně instrumentální hudba, která do této skupiny signálů nepatří, prokázala podobné výsledky jako tyto dva typy signálů.

V druhé části psychoakustického experimentu byly provedeny dva dílčí testy, jejichž cílem bylo nalezení hodnoty právě rozpoznatelného rozdílu (JND) fázových změn. Pro testování byly zvoleny tři typy hudebních ukávek – kastaněty, popová hudba a vážná hudba. Pro každý typ hudebního signálu byly provedeny dva druhy fázových změn ve třech frekvenčních pásmech. Experiment 7 navazuje na výsledky experimentu 3, které prokazují, že velikost vnímaného rozdílu roste spolu s úrovní fázových změn harmonických složek. V tomto experimentu byl proto proveden stejný typ fázové změny v různých úrovních na reálných hudebních signálech. Fázové úpravy spočívají v

přiřazení náhodné hodnoty fázového posuvu z určitého intervalu frekvenčním složkám v pásmu o délce jedné oktávy. Změna fázového spektra signálů použitých v experimentu 8 spočívá v útlumu určitého intervalu frekvencí lineární funkcí. Z výsledků uvedených v tabulce 10.1 vyplývá, že největší hodnota JND je v obou experimentech při změně fázového spektra v pásmu nízkých frekvencí. Naopak nejmenší hodnota JND rozdílu vychází pro fázové modifikace na vysokých frekvencích. V případě modifikace fázového spektra na vysokých frekvencích se jako nejvíce fázově citlivý signál projevuje hudební ukázka kastaněty.

Tabulka 10.1 Výsledky experimentu 7 a 8.

Typ hudby	Modifikované pásmo fázového spektra [Hz]	JND [°] Náhodná fázový posun	JND [%] Útlum lineární funkcí
kastaněty	100 - 200	nelze určit	nelze určit
	500 - 1000	±23	22
	5000 - 10000	±6	2
popová hudba	100 - 200	±138	60
	500 - 1000	±19	16
	5000 - 10000	±17	14
vážná hudba	100 - 200	±95	41
	500 - 1000	±19	12
	5000 - 10000	±28	7

Pro experiment 7 ze získaných dat vyplývá, že v případě fázové modifikace vysokých frekvencí je JND hodnota v oblasti jednotek až dvou desítek stupňů. Lehce vyšší hodnoty v oblasti dvou desítek stupňů vychází pro JND fázových změn na středních frekvencích. Při modifikaci nízkých frekvencí jsou hodnoty JND pro signály obsahující popovou a vážnou hudbu určeny v oblasti jedné stovky stupňů.

Ze získaných dat experimentu 8 vychází pro útlum fázového spektra v pásmu vysokých frekvencí hodnoty JND v oblasti jednotek až desítky procent. V případě útlumu fázového spektra v oblasti středních frekvencí vychází hodnoty JND v řádu jedné až dvou desítek procent. Největších hodnot dosahuje hodnota JND při útlumu fázového spektra v pásmu nízkých frekvencí. V tomto případě je JND určeno v oblasti několika desítek procent.

Pro hudební signál typu kastaněty nebylo možné určit hodnoty JND na nízkých frekvencích, protože ve většině případech testující osoby označili fázově modifikované signály za shodné s referenčním signálem. To je způsobeno tím, že signál typu kastaněty obsahuje především vysokofrekvenční složky.

## LITERATURA

- [1] G. S. Ohm, Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen, *Ann. Phys. und Chemie*, 1843.
- [2] H. L. F. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Music, 1863.
- [3] B. C. J. Moore a B. R. Glasberg, „Difference Limens for Phase in Normal and Hearing-Impaired Subjects“, *J. Acoust. Soc. Am.*, sv. vol. 86, 1989.
- [4] R. Plomp a H. M. J. Steeneken, „Effect of Phase On the Timbre of Complex Tones“, *J. Acoust. Soc. Am.*, sv. vol. 46, p. 409, 1969.
- [5] M.-V. Laitinen, S. Disch a V. Pulkki, „Sensitivity of Human Hearing to Changes in Phase Spectrum“, *JAES*.
- [6] E. Zwicker a H. Fastl, *Psychoacoustics. Facts and models*, Berlin, 1990.
- [7] A. Melka, *Základy experimentální psychoakustiky*, Praha, 2005.
- [8] O. Lepa, *Psychoakustický Model lidského sluchu*, 2011.
- [9] V. Syrový, *Hudební akustika*.
- [10] O. Santala, *Perception and Auditory Modeling of Spatially Complex Sound Scenarios*, 2015.
- [11] L. Chittka a A. Brockmann, *A diagram of the anatomy of the human ear*, 2005.
- [12] L. S. Alvord a B. L. Farmer, *Anatomy and Orientation of the Human External Ear*, 1997.
- [13] F. Kolmer a J. Kyncl, *Prostorová akustika*, 1980.
- [14] A. R. Moller, *Hearing: Anatomy, Physiology and Disorders of the Auditory system*, Boston, 2006.
- [15] R. M. Warren, *Auditory Perception, An Analysis and Synthesis*, 2006.
- [16] P. Mowlaee, J. Kulmer, J. Stahl a F. Mayer, *Single Channel Phase-Aware Signal Processing in Speech Communication*, 2016.
- [17] R. D. Patterson, „Pulse Ribbon Model of Monaural“, *J. Acoust. Soc. Am.*, sv. vol. 82, 1987.
- [18] I. Štěpánková, *Metody subjektivních poslechových testů kvality přepisu zvukové stopy na filmu*, 2015.
- [19] J. P. Guilford, *Psychometric methods*, New York, 1936.
- [20] D. Kundur, *Magnitude and Phase*, Toronto.
- [21] G. Hotho, S. van de Par a J. Breebaart, „Multichannel Coding of Applause Signals“, *EURASIP J. Advances in Signal Processing*, 2008.
- [22] M.-V. Laitinen, F. Kuech, S. Disch a V. Pulkki, „Reproducing Applause-Type Signals with Directional Audio“, *J. Audio Eng. Soc.*, 2011.
- [23] Lazarus, „Lazarus Homepage“, [Online]. Available: <http://www.lazarus-ide.org/>.
- [24] Borland, „Object Pascal Language Guide“, 2002.
- [25] S. M. Dinham, *Exploring Statistics*, 1976.
- [26] L. Dohnal, *Analýza rozptylu*, 1999.
- [27] C. Spearman, „The method of "right and wrong cases" ("constant stimuli") without Gauss's formulae“, 1908.
- [28] F. Kadlec, *Zpracování akustických signálů*, 2002.

- [29] E. O. Brigham, *The Fast Fourier Transform and Its Application*, 1988.
- [30] D. C. Champeney, *Fourier Transforms And Their Physical Applications*, 1975.
- [31] A. Quinquis, *Digital Signal Processing Using MATLAB*, 2008.
- [32] O. Stuhlmann, *An Introduction to Biophysics*, New York, 1943.

## **PUBLIKACE AUTORKY**

### **Konference**

ŠTĚPÁNKOVÁ, I.

The Effect of Phase Spectrum on Auditory Perception.

In: Proceedings of the International Student Scientific Conference Poster – 21/2017. Poster 2017. Praha, 23.05.2017. Praha: Czech Technical University in Prague. 2017, s. 1-7. ISBN 978-80-01-06153-4.

### **Časopisecké publikace**

ŠTĚPÁNKOVÁ, I.

Sensitivity of Auditory Perception to Changes in Phase Spectrum.

Lékař a technika – Clinician and Technology.

(12/17 – přijato)



## **OBSAH DATOVÉ PŘÍLOHY**

- Práce v elektronické podobě (formát pdf)
- Programy vytvořené pro psychoakustické experimenty
- Skripty pro fázové modifikace signálů