



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY

**FÁZOVÉ ZMĚNY ZVUKOVÉHO SIGNÁLU A JEJICH VLIV NA
SLUCHOVÝ VJEM**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Autor Práce: Jan Smékal

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze, dne:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Dr. Ing. Liboru Husníkovi za poskytnutí rad a odborné literatury. Dále chci poděkovat všem, kteří se zúčastnili poslechových testů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smékal** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466079**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fázové změny zvukového signálu a jejich vliv na vjem

Název bakalářské práce anglicky:

Phase Changes of Sound Signal and their Influence on Perception

Pokyny pro vypracování:

Připravte signály reálné i syntetické pro poslechový test, který bude zjišťovat vliv různých typů fázových změn na sluchový vjem. Proveďte tento test s dostatečným počtem respondentů, tento test statisticky vyhodnoťte a formulujte závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Syrový, V.: Hudební akustika, AMU 2013
- [2] Štěpánková, I.: Fázové změny zvukových signálů a jejich právě rozpoznatelný rozdíl. Diplomová práce FEL ČVUT 2018.
- [3] Guilford, J.P.: Psychometric Methods, McGraw-Hill Book, 1954

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem změn ve fázovém spektru signálu na jeho sluchový vjem. Pro zjištění, zda mají tyto změny postřehnutelný vliv na sluchový vjem, byl uskutečněn poslechový test skládající se ze tří částí. První část se zabývá tím, jak velké musejí být přírůstky ve fázovém spektru, aby se dala postřehnout změna ve sluchovém vjemu. Druhá část se zabývá tím, zda existuje minimální počet harmonických, ze kterých se signál skládá, aby se u něj dala pozorovat změna fáze. Třetí část zkoumá, zda různé změny ve fázovém spektru způsobí různé sluchové vjemy. Jako měřicí metody byly použity: Nastavování zvukových podnětů a Metoda párového srovnávání.

Klíčová slova

Fáze, poslechové testy, metoda párového srovnávání, Nastavování zvukových podnětů

Abstract

This project deals with effect of phase changes on auditory perception. To find out if these changes have effect on auditory perception, listening test was realized with three parts. First part examines how big increase in phase spectrum must be for people to notice change in auditory perception. Second part examines if there is minimal number of harmonics that signal is composed of that so that we can observe changes in auditory perception. Third part examines if different changes in phase spectrum creates different changes in auditory perception. Listening test was realized as pair comparison method and a method of average error.

Key words

Phase, listening test, pair comparison method, method of average error

Obsah

Seznam obrázků	I
Seznam Tabulek	II
Úvod.....	1
1. Teoretický úvod	2
1.1 Podstata zvuku.....	2
1.2 Amplitudové a fázové spektrum	2
1.3 Lidské ucho	3
1.3.1 Vnější ucho	4
1.3.2 Střední ucho	4
1.3.3 Vnitřní ucho	4
1.4 Metody psychoakustických testů	4
1.4.1 Metoda párového srovnání.....	6
1.4.2 Nastavování zvukových podnětů	6
1.5 Dvouvýběrový t test	7
2. Příprava signálů pro poslechové testy.....	8
2.1 První část	8
2.2 Druhá část.....	14
2.3 Třetí část.....	16
3. Program pro poslechové testy	18
3.1 Jednotlivé části programu.....	18
3.1.1 Dotazník	18
3.1.2 První test	19
3.1.3 Druhý test.....	20
3.1.4 Třetí test	21
4. Průběh poslechového testu.....	22
5. Vyhodnocení výsledků.....	23
5.1 Výsledky prvního testu.....	23
5.1.1 Vyhodnocení testů t testem.....	25
5.2 Výsledky druhého testu	27
5.2.1 Vyhodnocení testů t testem.....	29

5.3	Výsledky třetího testu.....	29
5.3.1	Ověření spolehlivosti testovaných osob.....	32
6.	Závěr	34
	Zdroje.....	35

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Ukázka převodu signálu z časové do frekvenční oblasti.....	3
Obrázek 1.2 Zpracování sluchové vjemu, převzato z [2].....	3
Obrázek 2.1 Amplitudové a fázové spektrum Cella	9
Obrázek 2.2 Amplitudové a fázové spektrum Klarinetu	9
Obrázek 2.3 Amplitudové a fázové spektrum Flétny.....	10
Obrázek 2.4 Amplitudové a fázové spektrum houslí	10
Obrázek 2.5 Amplitudové a fázové spektrum piana	11
Obrázek 2.6 Amplitudové a fázové spektrum saxofonu	11
Obrázek 2.7 Amplitudové a fázové spektrum trumpetu	12
Obrázek 2.8 Amplitudové a fázové spektrum varhan	12
Obrázek 2.9 Amplitudové spektrum syntetického signálu	13
Obrázek 2.10 Amplitudové spektrum Signálu5 a dvě varianty jeho fázového spektra	15
Obrázek 3.1 Před-testový dotazník	18
Obrázek 3.2 Dotazník pro první test	19
Obrázek 3.3 Dotazník pro druhý test	20
Obrázek 3.4 Dotazník pro třetí test	21
Obrázek 5.1 Průměrné fázové přírůstky potřebné pro vnímání rozdílnosti ve sluchovém vjemu pro všechny měřené nástroje s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti	24
Obrázek 5.2 Průměrné počty harmonických potřebné k pozorování změny ve sluchovém vjemu s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti	28
Obrázek 5.3 Průměrné rozdíly naměřené v jednotlivých párech s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti	32

Seznam Tabulek

Tabulka 1.1 Přehled psychoakustických měřicích metod, převzato z [6].....	5
Tabulka 2.1 Varianty signálů, s různými fázovými přírůstky, pro signály v prvním testu	14
Tabulka 2.2 Frekvence prvních harmonických složek	14
Tabulka 2.3 Přehled změn ve fázovém spektru jednotlivých signálů	16
Tabulka 2.4 Složení párů pro poslechový test	17
Tabulka 5.1 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro první test.....	23
Tabulka 5.2 Zobrazení základních statistických ukazatelů pro první test.....	24
Tabulka 5.3 Vypočítané hodnoty t pro jednotlivé páry signálů.....	26
Tabulka 5.4 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro druhý test.....	27
Tabulka 5.5 Základní statistické ukazatele pro druhý test	28
Tabulka 5.6 Vypočítané parametry t pro jednotlivé páry signálů	29
Tabulka 5.7 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro třetí test	30
Tabulka 5.8 Základní statistické údaje pro třetí test	31
Tabulka 5.9 Odpovědi testovaných osob na páry složené ze stejných signálů	33
Tabulka 5.10 Základní statistické údaje pro páry složené ze stejných signálů	33

Úvod

V roce 1843 formuloval George Simon Ohm tzv. základní psychoakustický zákon [1]. Zde označil lidské ucho za spektrální analyzátor, který rozkládá periodické signály na řadu sinusových tónů. U těchto tónů vyhodnocuje frekvenci a amplitudu. Podle Ohma však lidské ucho nevnímá fázi jednotlivých tónů. Na Ohmovu práci navázal H. von Helmholtz, který na jejím základě vybudoval svou teorii slyšení. Ani Helmholtz však nebral v potaz vliv fáze jednotlivých harmonických složek.

V dnešní době, kdy se zlepšili možnosti syntézy a úpravy akustických signálů, vznikly nové studie, které se vlivem změny fáze zabývají. Např. M.-V. Laitinen, S. Disch a V. Pulkki v [3] za pomoci poslechových testů zjistili, že lidské ucho není tzv. fázově hluché. V tomto projektu bude zvolen stejný přístup. Budou tedy zhotoveny poslechové testy pro reálné a syntetické signály u kterých budou aplikovány jiné změny, než které byly použity v [3], ve fázovém spektru. Změny se budou spíše snažit zjistit minimální případy, kdy je lidské ucho schopné zjistit přítomnost změny fáze, a rozdíl ve sluchovém vjemu pro různé úpravy fázového spektra.

1. Teoretický úvod

1.1 Podstata zvuku

Pro pochopení významu změn fáze u jednotlivých frekvenčních složek zvukového signálu je třeba chápat, co přesně představuje pojem zvuk. Jedná se o speciální případ kmitavého pohybu pružného prostředí, tzv. mechanické vlnění. V takovémto prostředí jsou sousední částice svázané vazebními silami. Dojde-li k rozkmitání takovéto částice, budou se následkem vazebních sil rozkmitávat i částice sousední. Tento proces se opakuje, což má za následek šíření původního rozruchu prostředím. Vlastnosti šíření vlnění, jako je rychlost, útlum apod., jsou ovlivněny vlnovým vlastnostmi prostředí, ve kterém ke kmitání dochází. Hlavní veličinou vlnění je vzdálenost, kterou vlna urazí za jednu periodu. Této veličině se říká vlnová délka, která je popsána vztahem 1.1

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

vlna se šíří konstantní rychlostí c , která závisí na prostředí. Frekvence f závisí na frekvenci kmitů. Vlnová délka se udává v metrech.

Takovéto kmitání o dostatečné amplitudě a frekvenci může ve sluchovém ústrojí vyvolat sluchový vjem. Důležitá veličina pro popis intenzity tohoto vjemu je akustický tlak. Jedná se o proměnou tlakovou složku superponovanou na statický tlak dané kapaliny nebo plynu. Např. při šíření ve vzduchu se bude tato složka superponovat na barometrický tlak.[2]

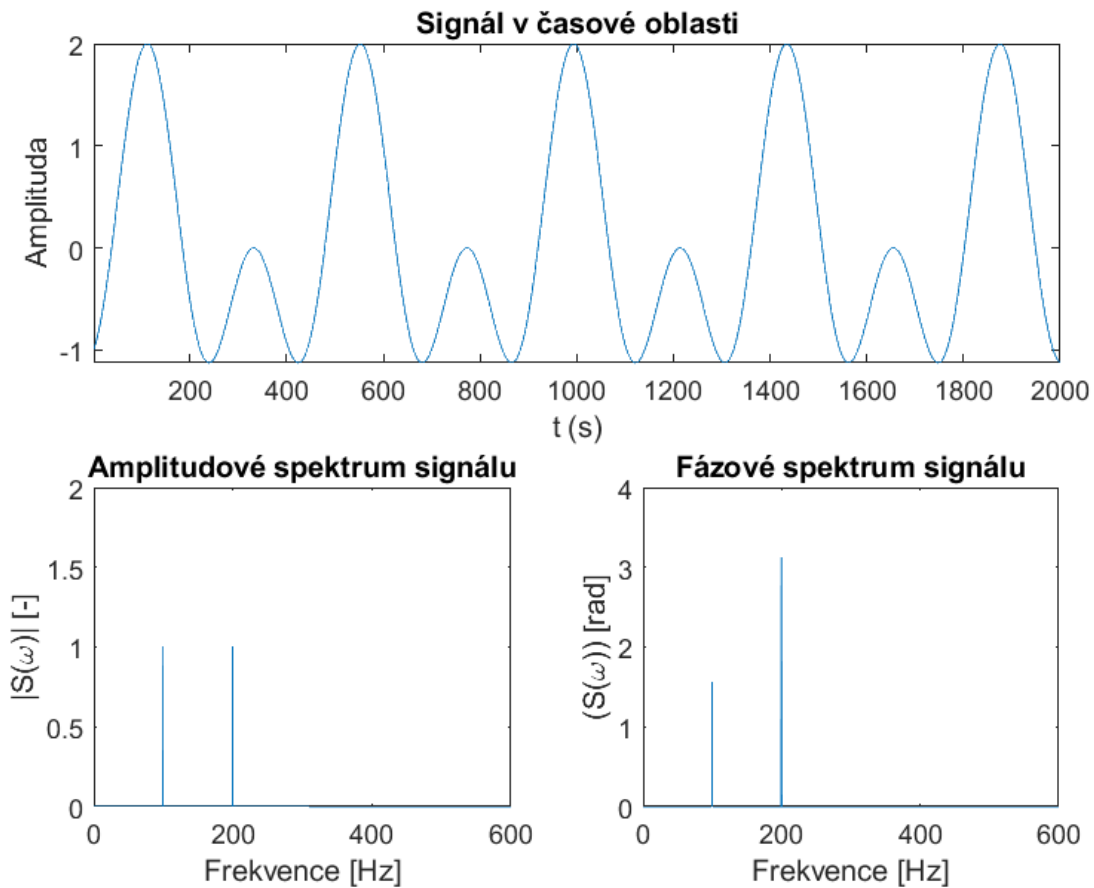
1.2 Amplitudové a fázové spektrum

K tomu, aby bylo možné upravit fázové spektrum zvukového signálu je třeba ho převést z časové oblasti do frekvenční oblasti. V této oblasti rozložíme zkoumaný signál na jednoduché harmonické signály. Tento krok je důležitý pro uskutečnění této práce. Pro tento přechod se používá matematický aparát zvaný Fourierova transformace. Jedná se o algoritmus, který počítá Fourierův obraz daného signálu. Výsledný obraz signálu ve frekvenčním spektru se dá vyjádřit pomocí vzorce 1.1

$$S(\omega) = |S(\omega)| \cdot e^{j\arg(S(\omega))} \quad (1.2)$$

$|S(\omega)|$ ve vzorci 1.1 představuje amplitudové spektrum signálu. Člen $\arg(S(\omega))$ zase popisuje fázové spektrum. Na obrázku 1.1 je ukázán takový přechod pro signál složený ze dvou

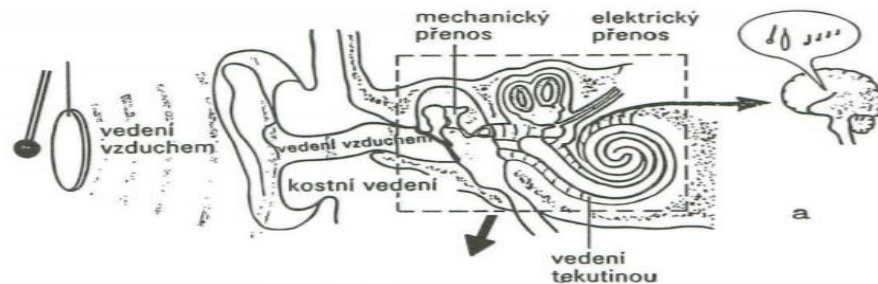
sinusových signálů o různé frekvenci.



Obrázek 1.1 Ukázka převodu signálu z časové do frekvenční oblasti

1.3 Lidské ucho

Zvuková signál vyvolaný mechanickým vlněním se v lidském uchu postupně zpracovává v různých podobách. Od kmitavého pohybu částic ve vzduchu ve vnějším uchu až po elektrochemické děje ve smyslových buňkách, které se nacházejí ve vnitřním uchu.



Obrázek 1.2 Zpracování sluchové vjemu, převzato z [2]

1.3.1 Vnější ucho

Vnější ucho je tvořeno boltcem a zvukovodem zakončeným blanou bubínku. Jednotlivým záhybům boltce je připisován význam pro lokalizaci zvuku v horizontálním a vertikálním směru. Důležitým úkolem zvukovodu je ochrana dalších částí ucha před poškozením. Při běžném způsobu poslechu si lze zvukovod představit jako válcovou trubici, která je na jednom konci uzavřena, s rezonančním módem v rozsahu 2800 až 3400 Hz. Tato rezonance je důležitá pro srozumitelnost řeči [2].

1.3.2 Střední ucho

Hlavní součástí středního ucha jsou kladívko, kovadlinka a třmínek. Tyto kůstky jsou od vnitřního ucha odděleny oválným a okrouhlým okénkem. Tento řetěz kůstek slouží k převodu kmitů z vnějšího vzdušného prostředí do kapaliny vnitřního ucha. A tvoří tak pákový mechanismus. Kmity bubínku o malé síle a velké výchylce se přemění na kmity oválného okénka o velké síle a malé výchylce. Tyto kmity jsou schopny uvést do pohybu kapalinu za oválným okénkem. Mechanický systém středního ucha zabraňuje velkým ztrátám, které by vznikaly při přímém přechodu zvukového vlnění ze vzduchu do kapaliny.

Další funkcí středního ucha je funkce ochranná. Pro přenos zvuku středním uchem se užívají dva drobné svaly. Bubínkový, který vtahuje bubínek dovnitř, a třmínkový, který ovlivňuje pohyblivost třmínku. Oba tyto svaly se ovládají reflexivně a stahují se při silných zvukových podnětech o hladině kole 70 dB. Tento reflex není okamžitý a jeho latence se pohybuje kolem 10 až 150 ms. Tento reflex slouží k ochraně vnitřního ucha [2].

1.3.3 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho se skládá z ústrojí rovnováhy a z kostěného kanálku ve tvaru hlemýždě (kochlea). Hlemýžď je rozdělen po délce na dvě patra kochleární přepážkou. Na této přepážce se nalézá vlastní smyslový orgán – Cortiho ústrojí. Horní patro začíná oválným okénkem, jehož blanka je spojena s ploténkou třmínku. Dolní patro začíná blankou okrouhlého okénka. Cortiho ústrojí je umístěno v kanálku, který je od spodního patra oddělen bazilární membránou, na níž se nachází smyslové vláskové buňky. Od horního patra je kanálek oddělen Reissnerovou membránou. Prostor horního i spodního patra je vyplněn kapalinou perilymfou. Tlakový rozruch od středního ucha má za následek podráždění vláskových buněk, které prostřednictvím cca 30 000 vláken sluchového nervu předávají zvukovou informaci do mozku.

1.4 Metody psychoakustických testů

Pro možnosti zjištění vlivu změn fáze na sluchový vjem je třeba uskutečnit poslechové testy. V této kapitole si uvedeme stručný metod psychometrických metod, které se v praxi nejčastěji užívají. Pro tento účel uijeme klasifikaci psychofyzických a škálovacích metod vypracovanou Joyem Paulem Guilfordem [5].

Guilfordovo třídění měřících metod je založeno na dvou klasifikačních principech. První princip je hlavní cíl experimentátora. Druhým princip je typ použitého postupu měření. Postupy měření vyjmenovává Guilford dva

-**direktní metody**, založené na přímém pozorování měřených podnětů.

-**indirektní metody**, založené na pravděpodobnosti.

V následující tabulce jsou uvedeny nejpoužívanější psychometrické metody a jejich rozdělení podle toho, ke kterému postupu měření se řadí [5].

Tabulka 1.1 Přehled psychoakustických měřících metod, převzato z [6]

Hlavní cíl	Direktní metody	Indirektní metody
Určování ekvivalence podnětů	Metoda nastavování Metoda minimálních změn	Metoda konstantních rozdílů Metoda párového srovnávání
Určování pořadí podnětů	Metoda seřazování do pořadí Metoda Následných kategorií Metoda posuzování na subjektivních posuzovacích škálách	Metoda párového srovnávání Metoda rozvinutí dat
Určování rovnosti intervalů	Metoda právě postřehnutelných rozdílů Metoda stejných vzdáleností Metoda zdánlivě stejných intervalů	Metoda párového srovnávání Metoda seřazování do podnětů Metoda tradického srovnávání Metoda čtveřic Metoda následných kategorií Metoda podobných reakcí Metoda vyvážených hodnot
Určování poměrů	Metoda dělení na části Metoda násobných podnětů Metoda konstantního součtu	Metoda srovnávání poměrů

Pro účely této práce byly zvoleny následující měřící metody: Metoda nastavování a Metoda párového srovnávání. Tyto dvě metody jsou popsány v následujících kapitolách.

1.4.1 Metoda párového srovnání

Tato metoda se řadí k nejstarším psychologickým měřicím metodám. Fechner se o ní zmiňuje již v roce 1860. Metoda párového srovnání je jedna z nejpropracovanějších psychometrických metod. Jednou z výhod této metody je její široká použitelnost pro škálování nejrůznějších podnětů. Její nevýhodou je, že při větším počtu vzorků je velmi časově náročná [6].

Podstata metody spočívá v tom, že testovaná osoba posuzuje všechny páry, které se dají vytvořit ze všech zkoumaných podnětů. Při sestavování párů je možné použít dvě varianty. Buď variantu, kdy záleží na pořadí prvků v páru nebo variantu, kdy na pořadí nezáleží. V této práci je použita druhá varianta, kvůli menší časové náročnosti. Počet všech párů, které lze ze souboru vytvořit je dán vztahem

$$C = \frac{n(n-1)}{2}, \quad (1.3)$$

kde C je počet párů a n je počet vzorků. Na tomto vzorci je vidět, že při větším počtu podnětů vznikne velmi velký počet párů.

Mezi chyby, které mohou ovlivnit tuto metodu patří zejména:

- únava pokusných osob
- stupeň zasvěcení pokusných osob
- tzv. Fechnerovy chyby místa a času.

Problém únavy se snížit dá například tím, že si testovaná osoba udělá krátkou přestávku v průběhu testu. Také je nutné zvolit rozumnou délku testu. Tím se také zamezí možnostem, že by se pokusná osoba přestala o test zajímat a odpovědi by vyplňovala náhodně. Důležité jsou též kvalitní instrukce pro testování, aby nedošlo k pomatení pokusných osob [6].

Fechnerova chyba místa je důsledek toho, že jeden ze dvou podnětů v předkládaných párech leží vždy vlevo tzn., že by se jeden zvukový podnět přehrával jako první ve všech párech, ve kterých se vyskytuje. To by mohlo způsobit to, že při malých rozdílech v páru bude pokusná osoba preferovat první vzorek před druhým v důsledku své časové polohy. Tento problém se dá redukovat tím, že zajistíme, aby se každý podnět vyskytoval v párech na první pozici stejně jako na druhé [6].

Fechnerova chyba času je způsobena tím, že určitý podnět, jehož účinky stále působí na pokusnou osobu, je jí ihned prezentován v následujícím páru. Tato chyba se dá omezit tím, že při sestavování páru se vždy mezi dva páry obsahující stejný podnět vloží alespoň jeden pár s odlišnými podněty [6].

1.4.2 Nastavování zvukových podnětů

Termín metoda nastavování se v psychologické a psychoakustické literatuře používá v několika významech. Guilford používá tento termín jako synonymní označení pro metodu průměrné chyby, Tato metoda je použita v této práci a také se jedná o jednu ze základních a nejstarších metod psychofyziky. Při měření touto metodou se pokusné osobě předkládají vždy dva

podněty, standartní podnět a podnět variabilní. Velikost obou podnětů z hlediska předem definované proměnné se na začátku znatelně liší. Pokusné osobě je umožněno plynule nastavovat velikost variabilního podnětu tak dlouho, až se jí dva předkládané podněty zdají stejné. Následně se odečte nastavená hodnota a test se několikrát opakuje pro získání hodnot ke zprůměrování [6].

1.5 Dvouvýběrový t test

V této práci se pro určení významnosti rozdílů mezi průměrnými naměřenými hodnotami jednotlivých signálů používá Dvouvýběrový t test. Jedná se o statistický test pro testování hypotéz o střední hodnotě z rozdělení, z něhož jsme získali náhodný výběr. Při dvouvýběrovém testu předpokládáme, že máme dva náhodně výběry [6]. Výběr (X_1, X_2, \dots, X_n) z $N(\mu_1, \sigma^2)$ o m stupních volnosti a (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) z $N(\mu_2, \sigma^2)$ o n stupních volnosti. Naše testovaná hypotéza v tomto případě je $H_0: \mu_1 = \mu_2$. Tedy hypotéza, že průměrné hodnoty jednotlivých hodnocení signálů jsou stejné. Abychom mohli tuto hypotézu vyvrátit nebo potvrdit potřebujeme spočítat tzv. hodnotu t . Tato hodnota se spočítá podle následujícího vzorce:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{(m-1)S_X^2 + (n-1)S_Y^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}} \quad (1.4)$$

Vypočítaná hodnota t se poté porovnává s tabulkovou hodnotou t pro studentovo rozdělení. Pokud je vypočítaná hodnota t větší než tabulková, tak se hypotéza na zvolené hladině významnosti zamítá. V tomto testu je hladina významnosti $\alpha=0,95$.

2. Příprava signálů pro poslechové testy

Signály pro tento projekt byly vytvořeny v prostředí MATLAB. Test se sestává ze tří částí.

- První část se zabývá tím, jaký maximální náhodný přírůstek ve fázovém spektru budou testované osoby považovat za sluchově nepostřehnutelný a zda se tento přírůstek liší u různých zvukových signálů.

- Druhý test je zaměřený na to, z kolika harmonických složek se musí signál skládat, aby u něj fázové změny vyvolaly změny ve sluchovém vjemu.

- Třetí test se zabývá tím, zda různé úpravy fázového spektra budou posluchačům připadat stejně, nebo zda se od sebe budou lišit.

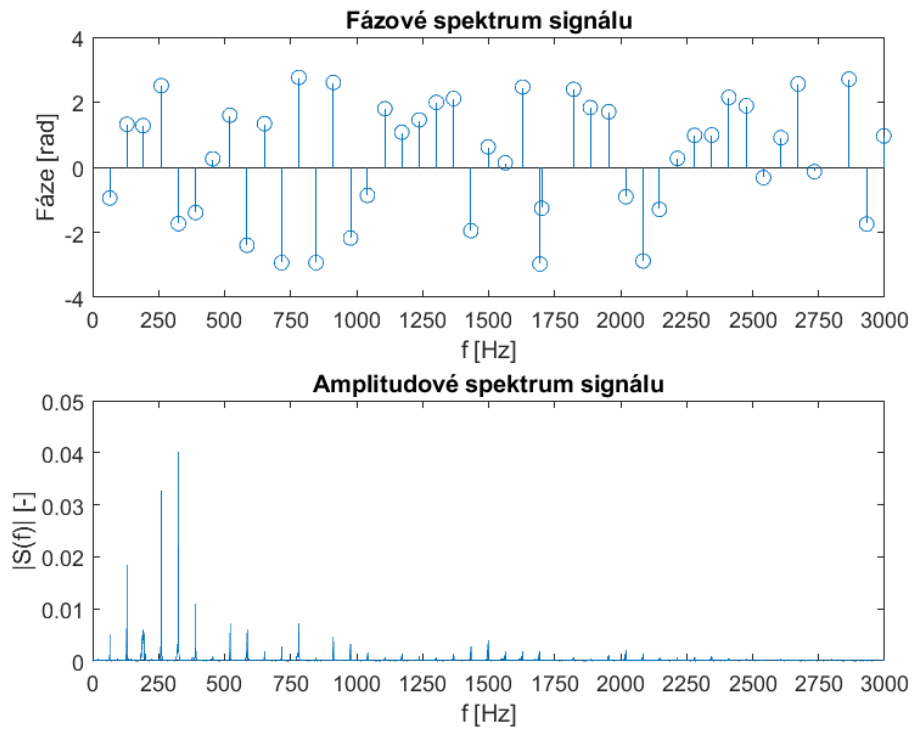
První dva test budou prováděny metodou nastavování a třetí test bude uskutečněn metodou párového srovnávání. V následujících kapitolách bude podrobný popis vytváření jednotlivých signálů a také vizuální ukázky jejich spekter.

2.1 První část

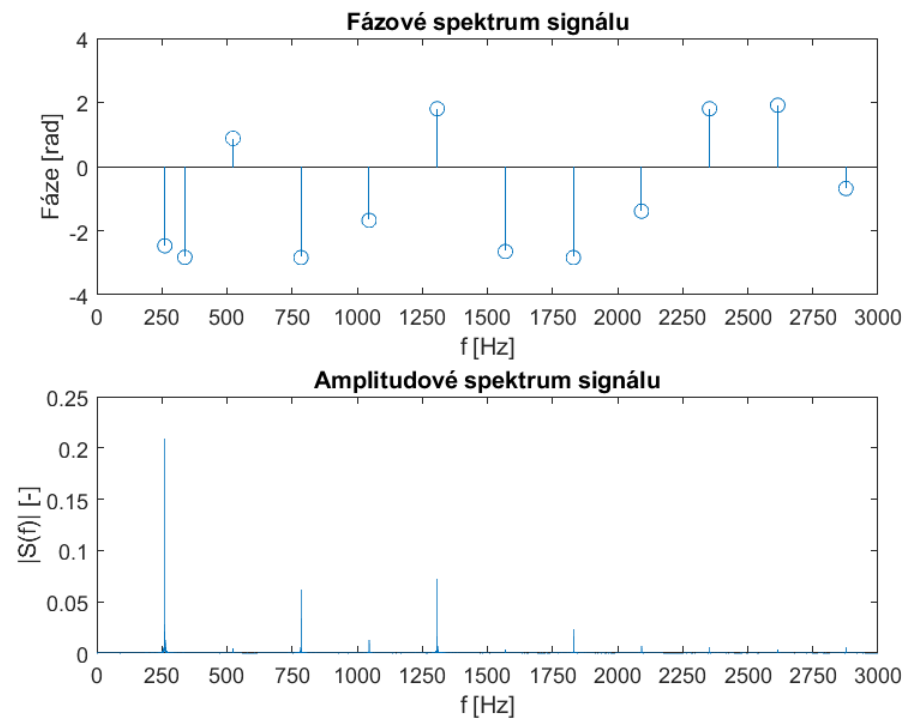
Signály v této části se skládají z 8 reálných signálů získaných ze stránky www.freesound.org a jednoho syntetického signálu vytvořeného v prostředí Matlab. Jako reálné signály byly náhodně zvoleny tyto hudební nástroje :

- Cello
- Klarinet
- Flétna
- Housle
- Piano
- Saxofon
- Trumpeta
- Varhany

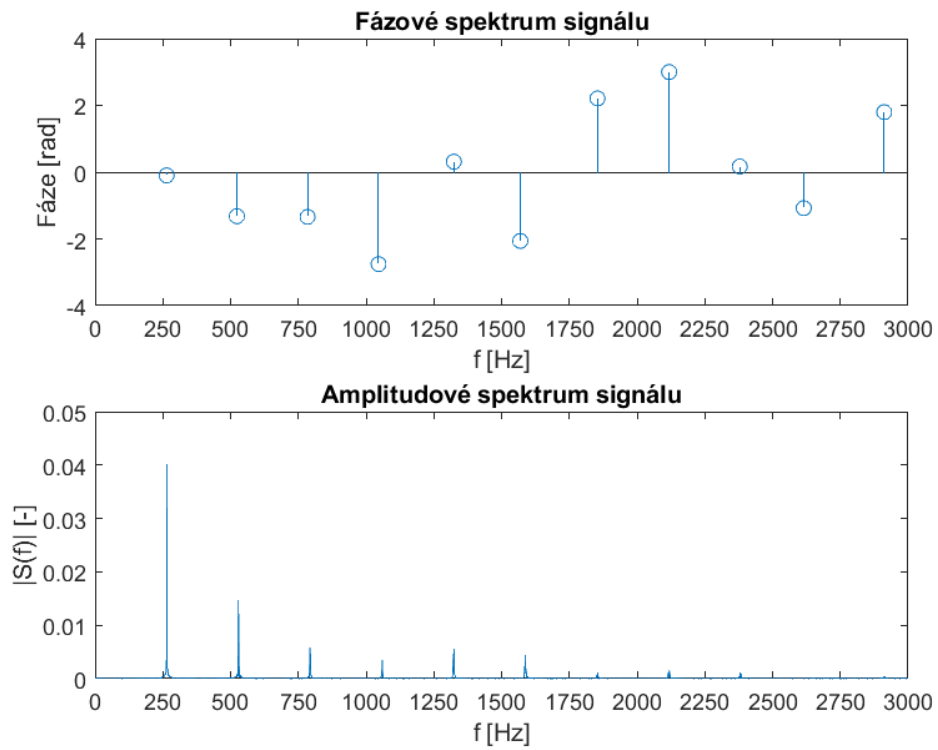
Byly zvoleny takové tóny těchto nástrojů, aby se harmonické složky vyskytovaly v minimálně podobných částech frekvenčního spektra. Na následujících obrázcích budou amplitudová a fázová spektra těchto nástrojů zobrazena.



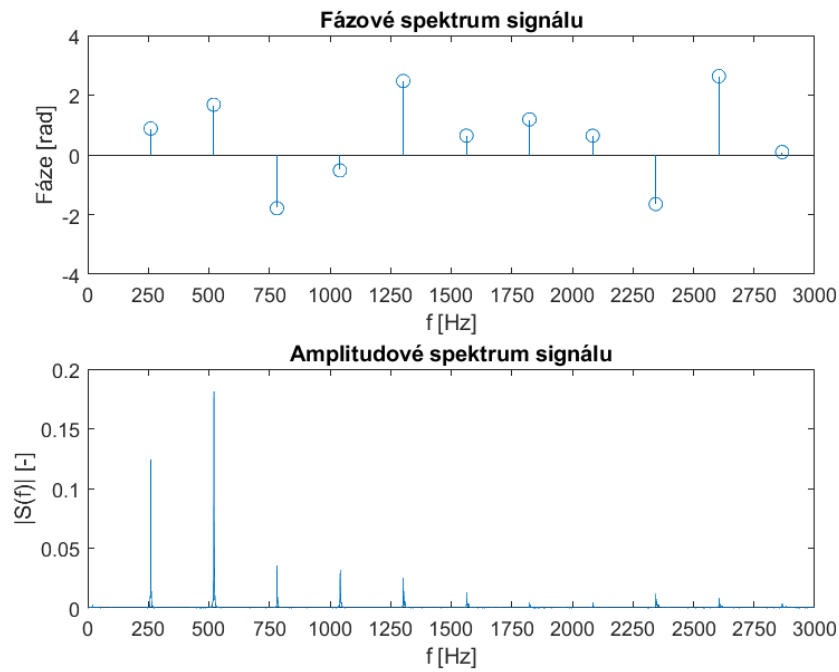
Obrázek 2.1 Amplitudové a fázové spektrum Cella



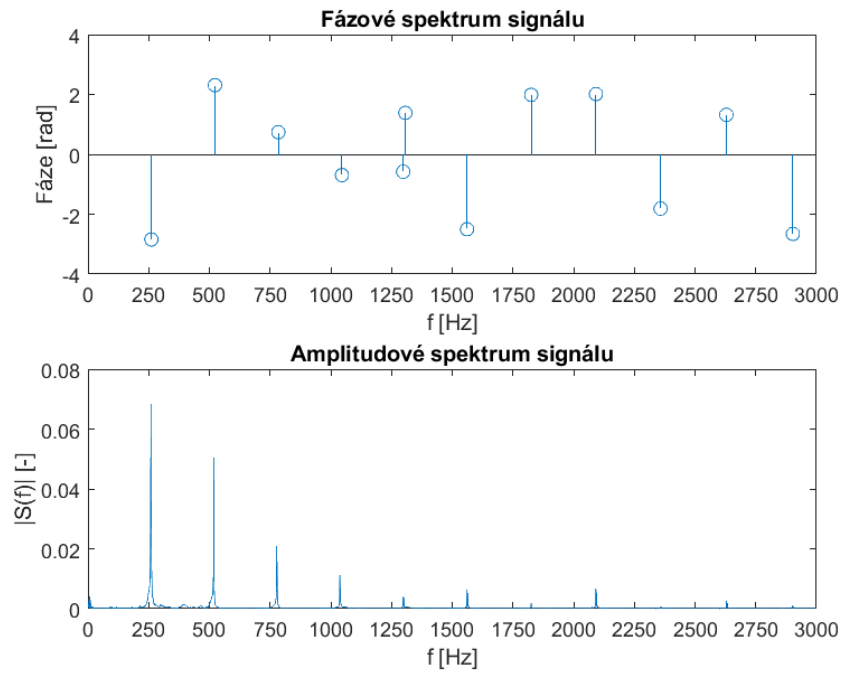
Obrázek 2.2 Amplitudové a fázové spektrum Klarinetu



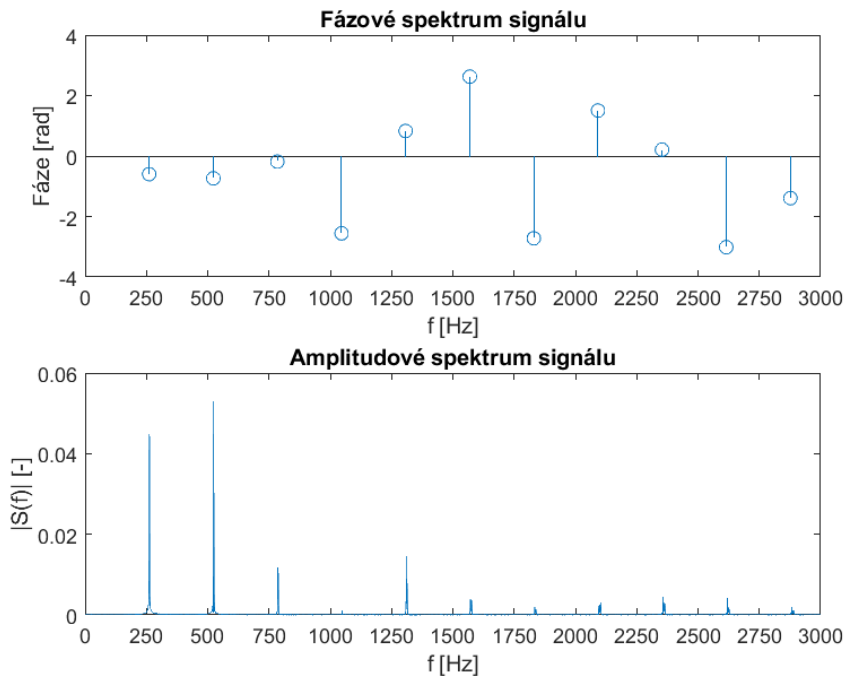
Obrázek 2.3 Amplitudové a fázové spektrum Flétny



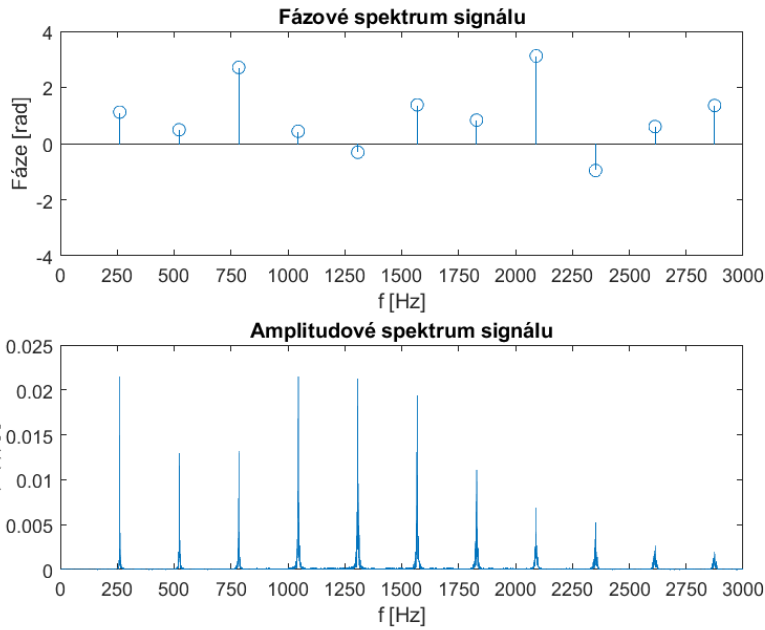
Obrázek 2.4 Amplitudové a fázové spektrum houslí



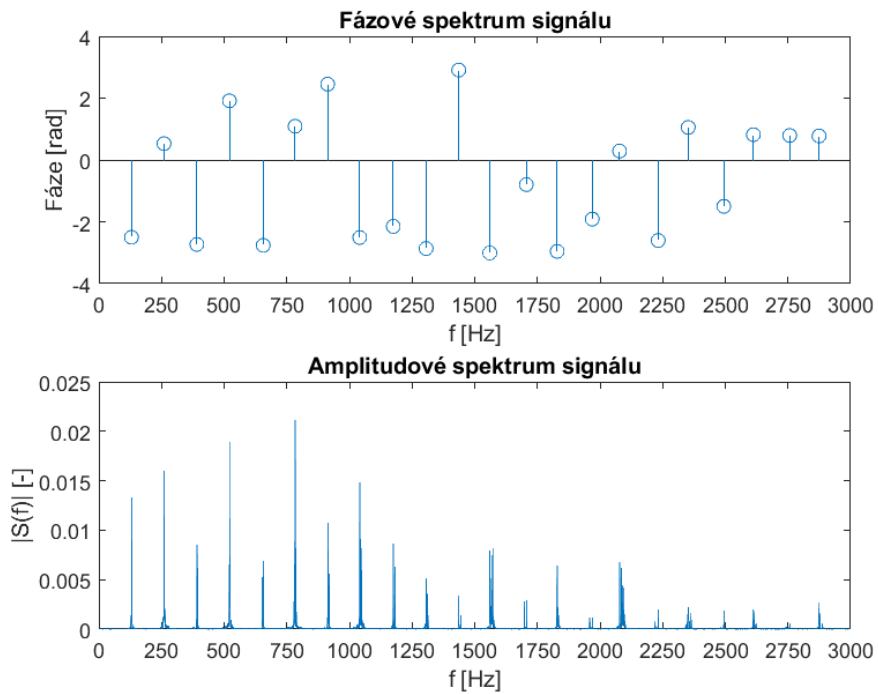
Obrázek 2.5 Amplitudové a fázové spektrum piana



Obrázek 2.6 Amplitudové a fázové spektrum saxofonu



Obrázek 2.7 Amplitudové a fázové spektrum trumpety



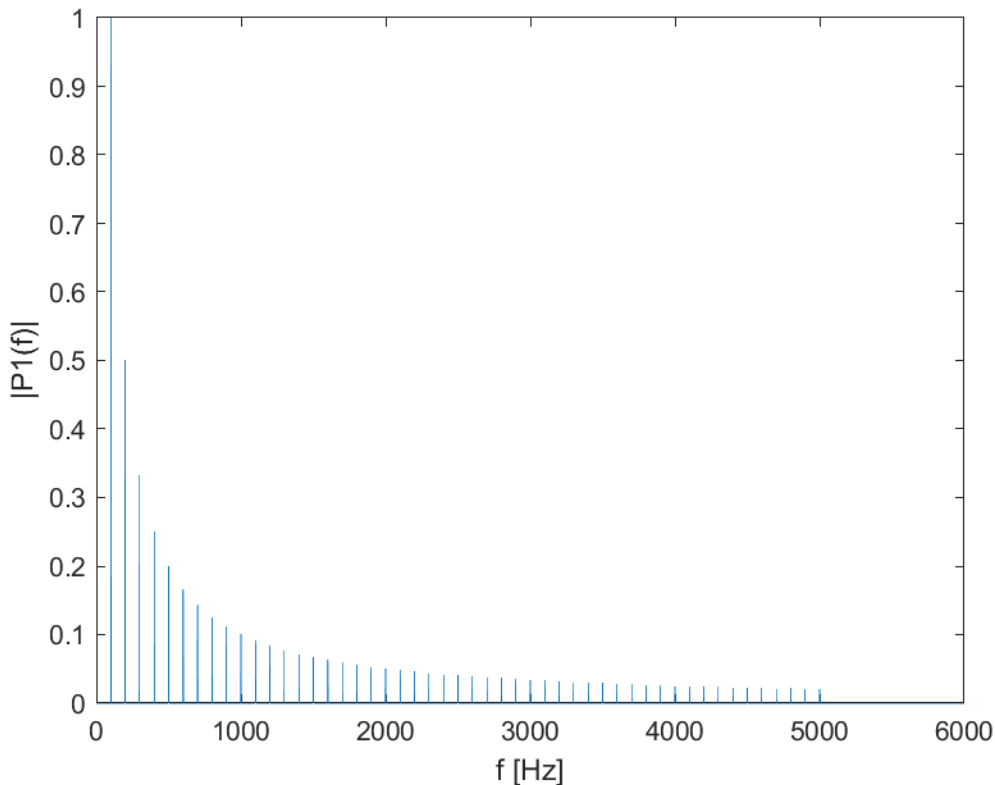
Obrázek 2.8 Amplitudové a fázové spektrum varhan

$|S(f)|$ představuje amplitudu signálu a f frekvenci harmonických složek

Syntetický signál byl přidán proto, aby se ukázalo, zda bude mít podobné výsledky jako reálné signály, nebo zda se od nich bude nějak výrazně lišit. Syntetický signál byl vytvořen tak, aby se jeho amplitudové spektrum podobalo spektrům reálných signálů. Byl tedy použit následující vzorec

$$y(t) = \sum_{c=1}^N \sin(2 \cdot \pi \cdot c \cdot f_0 \cdot t + \varphi_c) / c \quad (2.1)$$

Kde f_0 představuje základní frekvenci. N představuje počet frekvenčních složek výsledného signálu. V tomto případě byla základní frekvence zvolena 100 Hz a N bylo zvoleno 50 a φ_c je v tomto případě 0 pro všechny frekvence. To znamená, že harmonické syntetického signálu začínají na 100 Hz a končí na 5000 Hz. Jeho fázové spektrum je na počátku nulové. Průběh amplitudového spektra je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 2.9 Amplitudové spektrum syntetického signálu

Podstatou tohoto testu bylo zjištění, jaký maximální náhodný přírůstek fáze budou testované osoby považovat za sluchově nepostřehnutelný. Úprava ve stylu náhodných přírůstků k fázovému spektru se dá představit tak, jako bychom signály filtrovaly přes filtr s nulovým útlumem v amplitudovém spektru, ale s náhodným fázovým spektrem. Kvůli tomu bylo vytvořeno 30 variací každého signálu. Počet 30 variací byl zvolen, aby pokusné osoby měly dostatečný počet možností na výběr, ale zároveň jich nebylo příliš mnoho. Tyto variace se lišily pouze ve fázových spektrech. Rozdíly mezi jednotlivými variacemi byly zajištěny postupnými přírůstky $\pm \frac{\pi}{30}$. To bylo

zajištěno tak, že v programu Matlab byl vytvořen vektor náhodných čísel, s normálním rozdělením, v různých rozmezích, který byl postupně přičítán k původnímu fázovému spektru jednotlivých signálů. Postup s náhodnými přírůstky byl zvolen, jelikož ve [4] se tato změna ve fázovém spektru jeví jako velmi vnímatelná. Rozmezí vektoru s náhodnými čísly je popsán v následující tabulce.

Tabulka 2.1 Varianty signálů, s různými fázovými přírůstky, pro signály v prvním testu

Varianta	Rand(...)	Varianta	Rand(...)	Varianta	Rand(...)	Varianta	Rand(...)	Varianta	Rand(...)
1	$(-\pi, +\pi)$	8	$(-\frac{23}{30}\pi, +\frac{23}{30}\pi)$	15	$(-\frac{16}{30}\pi, +\frac{16}{30}\pi)$	22	$(-\frac{9}{30}\pi, +\frac{9}{30}\pi)$	29	$(-\frac{2}{30}\pi, +\frac{6}{30}\pi)$
2	$(-\frac{29}{30}\pi, +\frac{29}{30}\pi)$	9	$(-\frac{22}{30}\pi, +\frac{22}{30}\pi)$	16	$(-\frac{15}{30}\pi, +\frac{15}{30}\pi)$	23	$(-\frac{8}{30}\pi, +\frac{8}{30}\pi)$	30	$(-\frac{1}{30}\pi, +\frac{1}{30}\pi)$
3	$(-\frac{28}{30}\pi, +\frac{28}{30}\pi)$	10	$(-\frac{21}{30}\pi, +\frac{21}{30}\pi)$	17	$(-\frac{14}{30}\pi, +\frac{14}{30}\pi)$	24	$(-\frac{7}{30}\pi, +\frac{7}{30}\pi)$		
4	$(-\frac{27}{30}\pi, +\frac{27}{30}\pi)$	11	$(-\frac{20}{30}\pi, +\frac{20}{30}\pi)$	18	$(-\frac{13}{30}\pi, +\frac{13}{30}\pi)$	25	$(-\frac{6}{30}\pi, +\frac{6}{30}\pi)$		
5	$(-\frac{26}{30}\pi, +\frac{26}{30}\pi)$	12	$(-\frac{19}{30}\pi, +\frac{19}{30}\pi)$	19	$(-\frac{12}{30}\pi, +\frac{12}{30}\pi)$	26	$(-\frac{5}{30}\pi, +\frac{5}{30}\pi)$		
6	$(-\frac{25}{30}\pi, +\frac{25}{30}\pi)$	13	$(-\frac{18}{30}\pi, +\frac{18}{30}\pi)$	20	$(-\frac{11}{30}\pi, +\frac{11}{30}\pi)$	27	$(-\frac{4}{30}\pi, +\frac{4}{30}\pi)$		
7	$(-\frac{24}{30}\pi, +\frac{24}{30}\pi)$	14	$(-\frac{17}{30}\pi, +\frac{17}{30}\pi)$	21	$(-\frac{10}{30}\pi, +\frac{10}{30}\pi)$	28	$(-\frac{3}{30}\pi, +\frac{3}{30}\pi)$		

Takto vytvořené variace signálů budou testované osoby porovnávat s původním signálem. Jejich úkolem bude najít poslední variaci signálu jejíž sluchový vjem bude shodný s původním signálem. Pro tuto část bude použita metoda nastavování popsaná v kapitole 1.4.2. To znamená, že testovaná osoba si bude moci sama nastavit, která varianta se jí bude aktuálně přehrávat a tuto variantu bude porovnávat s neupravenou verzí daného signálu.

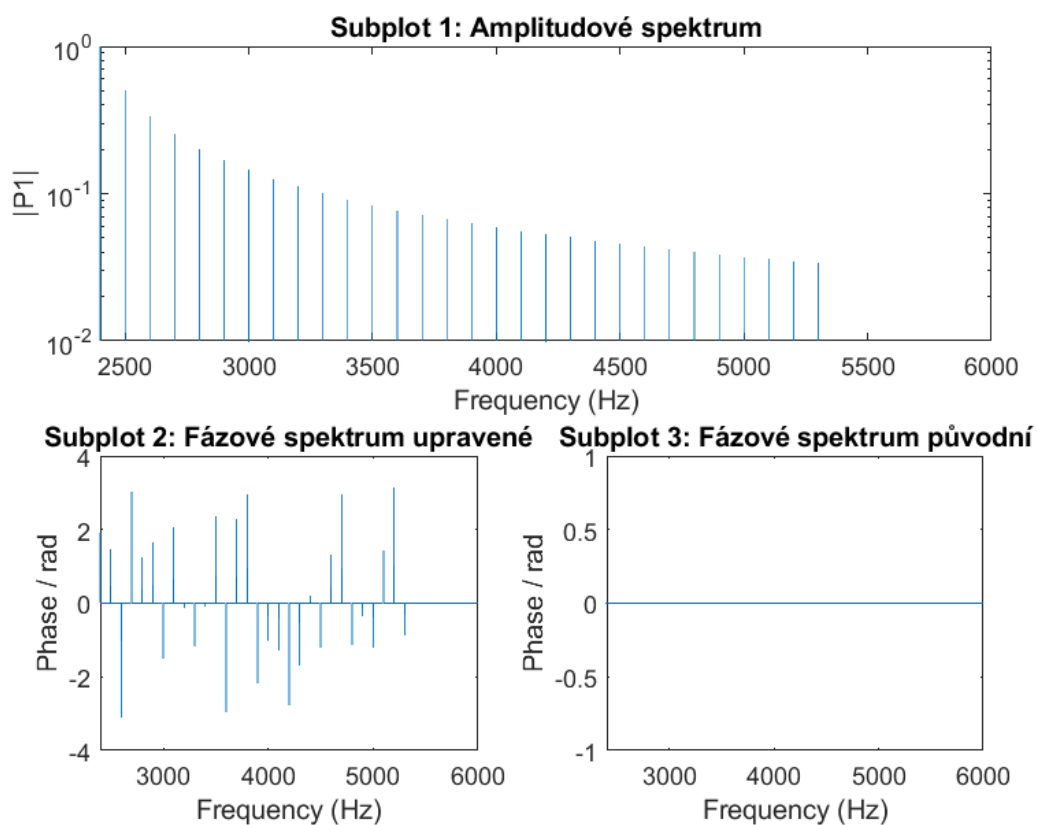
2.2 Druhá část

Druhá část má za úkol zjistit, z kolika harmonických složek se musí signál skládat, změny ve fázovém spektru vyvolaly změny ve sluchovém vjemu. Za účelem tohoto testování bylo v programu Matlab vytvořeno 5 syntetických signálů. Signály byly vytvořeny podle vzorce (2.1). Rozdíl mezi signály je ten, že každý má jinou frekvenci první harmonické. Frekvence byly voleny tak, aby mezi nimi byl dostatečný rozestup umožňující pozorovat vliv frekvence na počet harmonických potřebných ke vnímání změny sluchového vjemu při změnách fázového spektra. Zároveň byla frekvence volena tak, aby signály nezněly testovaným osobám příliš nepříjemně. Popis těchto frekvencí je ukázán v následující tabulce

Tabulka 2.2 Frekvence prvních harmonických složek

Signál	Frekvence první harmonické [Hz]
Signál1	100
Signál2	600
Signál3	1400
Signál4	2400
Signál5	3000

Jelikož bude test proveden metodou nastavování, popsanou v kapitole 1.4.2, tak si pokusná osoba si bude moci během testu nastavit, z kolika harmonických se má signál, který se jí přehrává, skládat. Minimální počet harmonických je 2 a maximální počet je 30. Frekvenční rozestup mezi harmonickými jednotlivých signálů je 100 Hz. Při testu se bude testované osobě vždy přehrávat pár signálů. První v signál bude mít nulovou fázi a druhý signál bude mít fázové spektrum znáhodněné v rozsahu $(-\pi, +\pi)$. Tento rozsah byl zvolen, jelikož ve [4] se ukazuje, že má tato velikost náhodného přírůstku ve fázovém spektru největší vliv na sluchový vjem. Testovaná osoba pak bude mít za úkol najít takový počet harmonických, při které si všimá postřehnutelného rozdílu ve znění signálu v páru. Ukázka amplitudového a fázového spektra signálu5 je na následujícím obrázku



Obrázek 2.10 Amplitudové spektrum Signálu5 a dvě varianty jeho fázového spektra

2.3 Třetí část

Třetí část se zabývá tím, zda jsou různé fázové změny provedené ve fázovém spektru signálů vnímány stejně. Signály v tomto testu jsou syntetické a všechny byly vytvořeny v prostředí Matlab, podle vzorce (2.1). Frekvence f_0 byla zvolena 100 Hz. Počet harmonických N byl zvolen 200. Fázové spektrum původního signálu je nulové. Změny provedeny na fázových spektrech jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2.3 Přehled změn ve fázovém spektru jednotlivých signálů

Signál	Změny fáze
Signál0	Nulová fáze
Signál1	Lineární nárůst fáze v celé šířce spektra od 0 do 2π
Signál2	Logaritmický nárůst od 0 do 2π
Signál3	Náhodné změny v rozsahu $(-\pi, \pi)$
Signál4	Fáze se měnila podle funkce sinus o frekvenci 200 Hz
Signál5	Fáze se měnila podle funkce sinus o frekvenci 2000 Hz
Signál6	Fáze se měnila podle funkce sinus o frekvenci 20 000 Hz

Tyto změny ve fázovém spektru, byly zvoleny tak, aby se od sebe navzájem velmi lišily a ukázaly, zda zcela odlišné změny ve fázovém spektru vyvolají jiný sluchový vjem nebo zda budou takto upravené signály znít vzájemně stejně. V následující tabulce je ukázáno složení jednotlivých párů pro poslechové testy

Tabulka 2.4 Složení párů pro poslechový test

pár	1. Signál	2. Signál
1	Signál1	Signál2
2	Signál3	Signál1
3	Signál1	Signál0
4	Signál4	Signál1
5	Signál1	Signál5
6	Signál6	Signál1
7	Signál2	Signál3
8	Signál0	Signál2
9	Signál2	Signál4
10	Signál5	Signál2
11	Signál2	Signál6
12	Signál3	Signál0
13	Signál4	Signál3

14	Signál3	Signál5
15	Signál6	Signál3
16	Signál0	Signál4
17	Signál5	Signál0
18	Signál0	Signál6
19	Signál4	Signál5
20	Signál6	Signál4
21	Signál5	Signál6
22	Signál1	Signál1
23	Signál2	Signál2
24	Signál3	Signál3
25	Signál0	Signál0
26	Signál4	Signál4
27	Signál5	Signál5
28	Signál6	Signál6

Páry budou testovaným osobám předkládány v tomto pořadí:

1 24 8 22 13 25 23 19 3 7 20 5 9 12 26 10 18 15 16 27 11 17 2 21 4 28 14 6

Důvodem toho seřazení je, aby se minimalizovali Fechnerovy chyby popsány v kapitole **1.5.1**

Rozdíly budou testované osoby hodnotit na škále od 1 do 5. Přičemž pro ně budou popsány tyto body na škále:

0-stejně 2,5-podobné 5-různé

Tato škála byla zvolena, jelikož splňuje základní požadavky pro tento test. Je důležité, aby testovaná osoba mohla označit rozdíly v jednotlivých párech a zároveň měla možnost do jisté míry tyto rozdíly ohodnotit.

3. Program pro poslechové testy

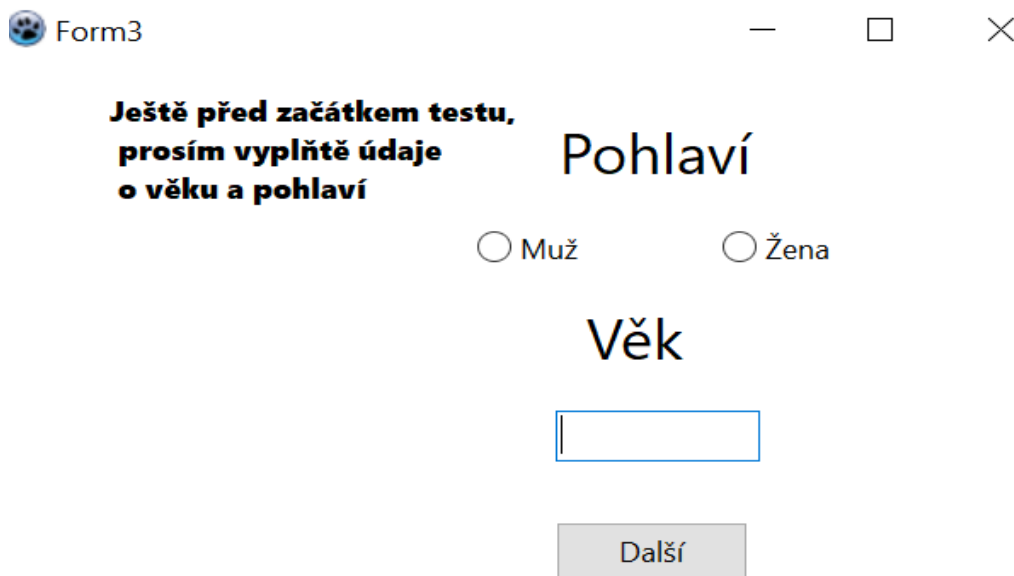
Za účelem provedení poslechových testů byl zhotoven program ve vývojovém prostředí Lazarus. Účelem programu je, aby bylo testovaným osobám umožněno si poslechnout jednotlivé ukázky zvukových signálů a ohodnotit. Tyto hodnocení musí být dále uloženy do souboru, který může testující osoba vyhodnotit. Program také zaznamená věk a pohlaví testované osoby před zahájením samotného psychoakustického testu.

3.1 Jednotlivé části programu

V této kapitole budou ukázaný jednotlivé části testovacího programu, tak jak jsou předkládány testované osobě. Vyčet těchto částí je následující:

- Dotazník
- První test
- Druhý test
- Třetí test
- Závěrečná obrazovka

3.1.1 Dotazník



Form3

**Ještě před začátkem testu,
prosím vyplňte údaje
o věku a pohlaví**

Pohlaví

Muž Žena

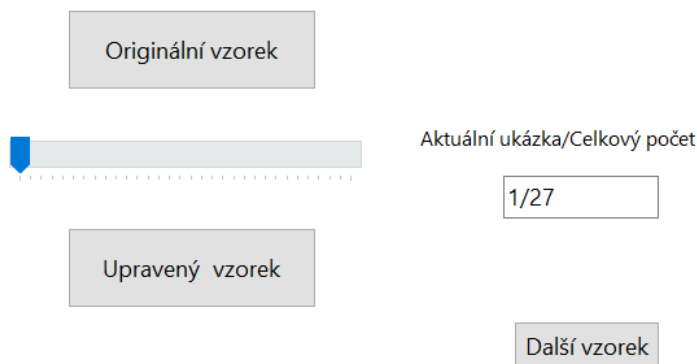
Věk

Další

Obrázek 3.1 Před-testový dotazník

Stránka s dotazníkem slouží k zaznamenání věku a pohlaví jednotlivých testovaných osob. Test není možno zahájit bez vyplnění jednotlivých polí. Stiskem tlačítka další se spustí první část poslechového testu.

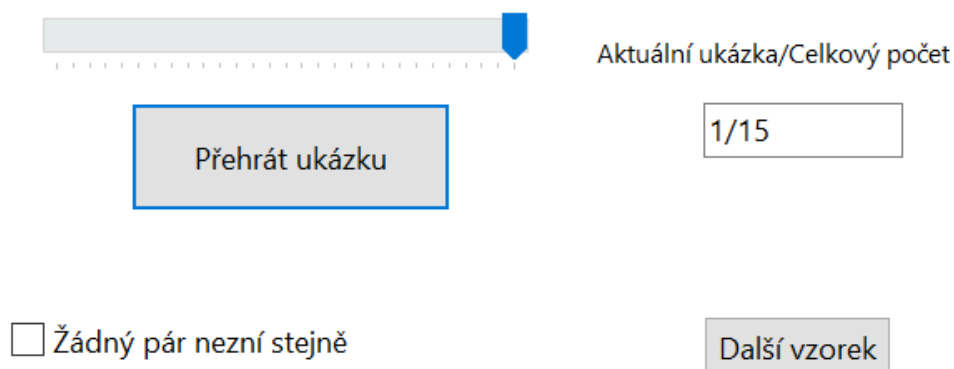
3.1.2 První test



Obrázek 3.2 Dotazník pro první test

Signály, které se vyskytují v prvním testu jsou popsány v kapitole **2.1**. Test je prováděn metodou nastavování podnětů. Tzn., že testovaná osoba si sama nastavuje, který signál je jí přehráván. Tento proces probíhá tak, že si nejdříve testovaná osoba nastaví pozici na posuvníku. Tlačítko „Originální vzorek“ slouží k přehrávání zvukového s původním fázovým spektrem. Tlačítko „Upravený vzorek“ přehraje signál s upravenou fází. Nejdříve je ovšem testované osobě doporučeno, aby si přehrála signály s posuvníkem ve výchozí pozici. To zajistí to, že se přehraje signál s největší fázovou odchylkou a testovaná osoba si udělá obrázek o největším možném rozdílu signálů. Poté co testovaná osoba najde první pozici na posuvníku, kde se jí zdají testované signály stejné. Klikne na tlačítko další vzorek. To nahraje další zvukový signál. V okénku napravo od posuvníku si může testovaná osoba prohlédnout v jakém stádiu prvního testu se nachází. Signálů předkládaných k hodnocení, jelikož každý signál je předložen k testování celkem 3. První běh testu tedy od čísla 1 do čísla 9 je postupný. Při dalších 2 bězích testu se pořadí vzorků znáhodní.

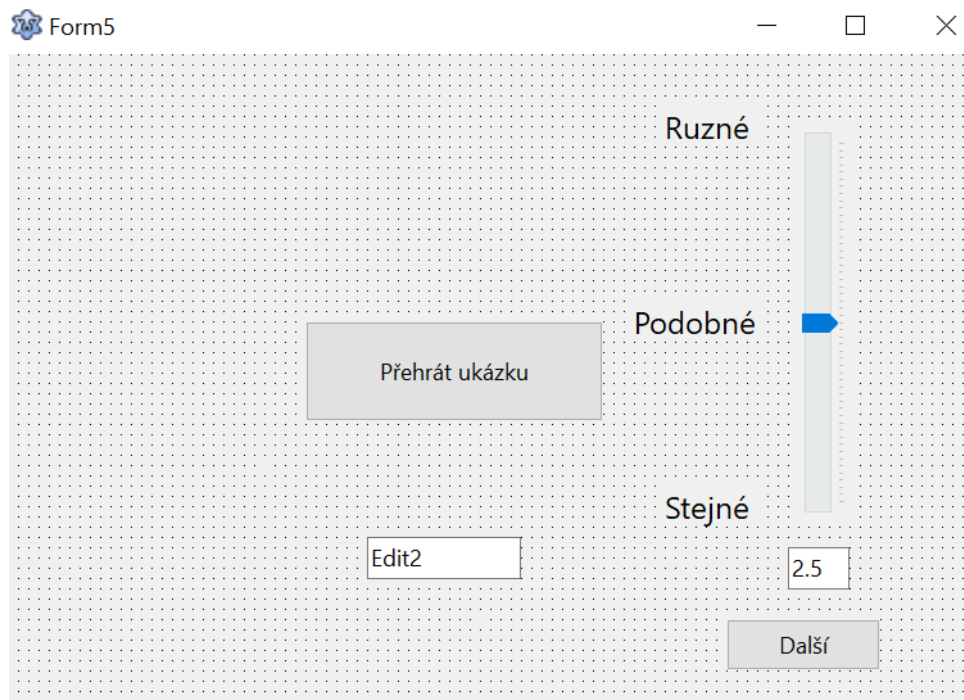
3.1.3 Druhý test



Obrázek 3.3 Dotazník pro druhý test

Signály použité v druhém poslechovém testu jsou popsány v kapitole **2.2**. Stejně, jako při prvním testu, tak i zde je použita metoda nastavování. Pokusná osoba si tedy i zde sama nastavuje, jaký pár signálů se jí přehraje. K tomu slouží posuvník. Tlačítko „Přehrát ukázkou“ slouží k přehrání páru zvukových signálů. Nejdříve se přehraje signál s nulovou fází, poté následuje sekunda ticha, a pak se přehraje signál s upravenou fází. Úkolem v této části je najít poslední polohu, kdy se testované osobě zdá předložený pár signálů stejný. Pokud se testované osobě nezdá žádný z předložených párů stejný, tak zaškrtně políčko „Žádný pár nezní stejně“. Stejně jako u prvního testu vidí testovaná osoba, na kterém páru se zrovna nachází. Opět se zde každý signál posuzuje třikrát.

3.1.4 Třetí test



Obrázek 3.4 Dotazník pro třetí test

Na rozdíl od prvních dvou testů, je ve třetím testu použita metoda párového srovnávání. Popis vytváření signálů pro tento test je uveden v kapitole 2.3. Celkový počet signálů použitý v této části je, i se započítání signálu s nulovou fází, celkem sedm. To znamená 21 párů. Pro zjištění důvěryhodnosti hodnocení testované osoby bylo ještě vytvořeno dalších sedm párů. Tyto dodatečné páry se skládají ze stejných signálů. Celkový počet párů, které bude muset testovaná osoba hodnotit je tedy 28. Pořadí, v jakém se páry předkládají bylo zvoleno tak, aby se eliminovaly **Fechnerovy chyby** (Kapitola 1.5.1). Testovaná osoba si nejdříve pomocí tlačítka „Přehrát ukázkou“ Přehraje pár zvukových signálů, které od sebe odděluje 1 sekundová pauza. Následně ohodnotí odlišnost předloženého páru na posuvníku po pravé straně. Škála posuvníku je v rozmezí od 0 do 5, přičemž hodnocení 0 znamená, že signály jsou stejné a hodnocení 5 znamená, že signály jsou různé. V rámečku pod tlačítkem „Přehrát ukázkou“ se bude testované osobě ukazovat, kolikátý pár hodnotí. V tomto případě bude testovaná osoba hodnotit každý pár pouze jednou, jelikož opakování testu by ještě zvýšilo už tak vysokou časovou náročnost testu.

4. Průběh poslechového testu

Kvůli podmínkám, které nastaly vlivem pandemie viru COVID-19, nebylo možné uspořádat Poslechové testy s větším počtem účastníku na jednom místě. Testy tedy probíhaly tak, že 16 zúčastněným osobám byl test poslán domů. Tato skutečnost se s velkou pravděpodobností projevila na výsledcích jednotlivých testů. Kvůli různým zařízením a sluchátkám, která byly použity pro poslech testovaných signálů.

5. Vyhodnocení výsledků

Na následujících stránkách bude provedeno statistické vyhodnocení jednotlivých pokusů. K následnému zhodnocení statistických rozdílů mezi jednotlivými testy bude pak použit studentův t test popsán v kapitole 1.6

5.1 Výsledky prvního testu

V následující tabulce jsou zprůměrovaná hodnocení jednotlivých testovaných osob. Hodnocení představuje násobek náhodného přírůstku $\pm \frac{\pi}{30}$ ve fázovém spektru, který označily testované osoby za Sluchově nepostřehnutelný

Tabulka 5.1 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro první test

	Cello	Klarinet	Flétna	Housle	Piano	Saxofon	Trumpeta	Varhany	Syntetický signál
Posluchač 1	2,33	4,67	15,33	14,33	0,00	5,00	10,00	12,33	1,00
Posluchač 2	4,33	4,33	5,00	3,00	3,00	3,67	4,33	19,00	4,33
Posluchač 3	7,67	14,67	14,67	2,33	0,33	5,67	2,67	22,33	6,00
Posluchač 4	5,67	18,50	18,67	11,67	1,33	13,67	8,33	31,00	10,67
Posluchač 5	0,67	1,33	2,00	1,00	0,00	3,67	1,67	7,67	0,00
Posluchač 6	16,33	19,67	23,00	10,00	0,00	16,00	2,00	31,00	0,00
Posluchač 7	0,00	1,67	2,00	2,00	0,00	1,00	3,67	0,00	1,67
Posluchač 8	5,00	7,67	7,67	5,67	0,67	2,00	2,33	15,33	4,33
Posluchač 9	26,33	19,67	20,00	16,00	10,67	13,67	10,67	31,00	4,00
Posluchač 10	1,33	1,67	1,00	1,33	0,00	1,00	0,00	14,67	0,67
Posluchač 11	10,67	7,00	14,67	6,67	2,67	10,33	6,67	30,67	6,67
Posluchač 12	16,67	23,33	19,33	16,00	0,67	13,67	9,33	24,33	6,00
Posluchač 13	8,00	23,00	21,67	15,67	1,00	13,67	9,67	24,33	7,67
Posluchač 14	13,67	23,33	16,00	16,00	0,67	13,67	9,33	24,00	7,00

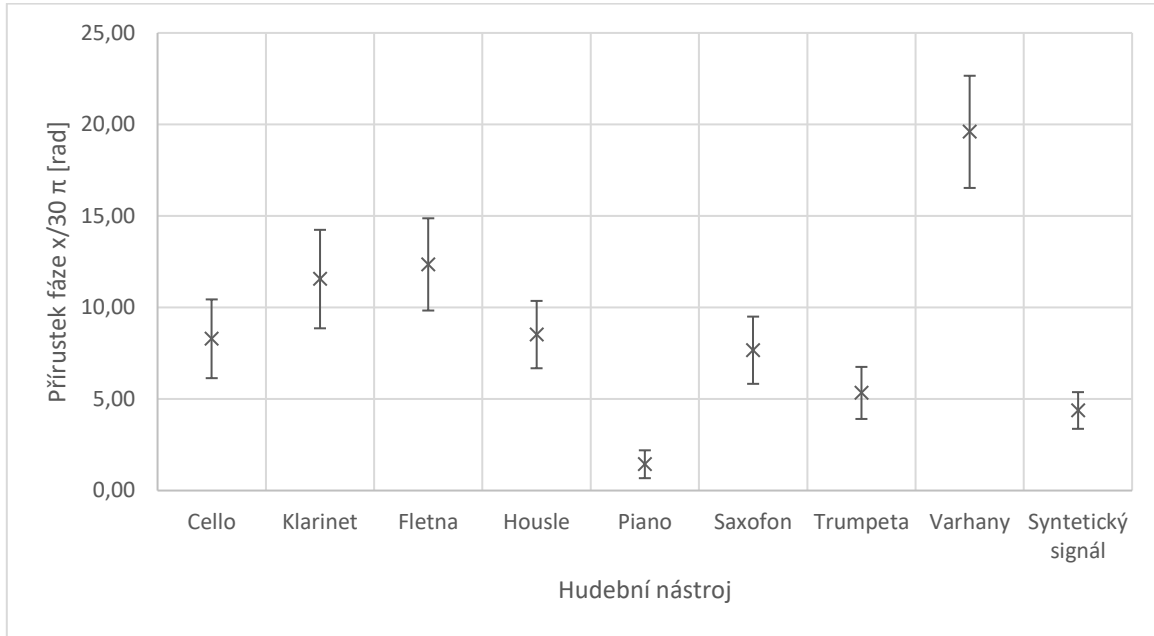
Posluchač 15	5,67	7,67	7,67	5,67	0,67	2,67	2,33	15,33	4,33
Posluchač 16	8,33	9,00	9,00	9,00	1,33	3,33	2,33	14,33	5,67

Z výsledků všech testovaných osob v prvním test jsou v následující tabulce vypočítané základní statistické ukazatele

Tabulka 5.2 Zobrazení základních statistických ukazatelů pro první test

	Cello	Klarinet	Flétna	Housle	Piano
Průměr	8,29	11,55	12,35	8,52	1,44
σ^2	57,79	90,46	79,31	42,29	7,25
σ	7,60	9,51	8,91	6,50	2,69
interval spolehlivosti 95%	2,15	2,69	2,52	1,84	0,76
	Saxofon	Trumpeta	Varhany	Syntetický signál	
Průměr	7,67	5,33	19,60	4,38	
σ^2	42,14	25,26	117,35	12,57	
σ	6,49	5,03	10,83	3,55	
95% interval spolehlivosti	1,84	1,42	3,06	1,00	

Data z tabulky 5.2 jsou zobrazena na následujícím grafu.



Obrázek 5.1 Průměrné fázové přírůstky potřebné pro vnímání rozdílnosti ve sluchovém vjemu pro všechny měřené nástroje s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti

Z výsledků je vidět, že různé hudební nástroje se nejeví jako stejně odolné proti změnám ve fázovém spektru. V jednom případě, varhany a piano, je dokonce tento rozdíl větší, než $\pm \frac{3}{5} \pi$. Z pohledu na výsledky se ovšem nedá určit přesná spojitost, které ovlivní, jak moc jsou nástroje fázově odolné

5.1.1 Vyhodnocení testů t testem

Již na obr. 5.1 je vidět, že statistické rozdíly mezi některým hodnocenými nástroji budou nevýznamné. Pro ověření, které nástroje mají mezi sebou statisticky významné rozdíly použijeme dvouvýběrový t test. Testujeme zde hypotézu, že se střední hodnoty obou hudebních nástrojů v jednotlivých dvojicích rovnají. Pro hodnocení byla zvolena hladina významnosti 95 %. V tomto případě máme 48 stupňů volnosti. Z těchto dvou údajů určíme, pomocí tabulky pro studentovo rozdělení, hodnotu $T_{krit.}$. V našem případě je $T_{krit.}=1,99$. Tabulka následující tabulka zobrazuje vypočítané hodnoty t pro jednotlivé páry

Tabulka 5.3 Vypočítané hodnoty t pro jednotlivé páry signálů

Pár signálů	T	T_{krit}	
Cello-Klarinet	3,29	1,99	Rozdílné
Cello-Flétna	4,26	1,99	Rozdílné
Cello-Housle	0,28	1,99	Stejné
Cello--Piano	10,42	1,99	Rozdílné
Cello-Saxofon	0,77	1,99	Stejné
Cello-Trumpeta	3,98	1,99	Rozdílné
Cello-Varhany	10,48	1,99	Rozdílné
Cello-Syntetický signál	5,73	1,99	Rozdílné
Klarinet-Flétna	0,75	1,99	Stejné
Klarinet-Housle	3,23	1,99	Rozdílné
Klarinet--Piano	12,55	1,99	Rozdílné
Klarinet-Saxofon	4,14	1,99	Rozdílné
Klarinet-Trumpeta	7,09	1,99	Rozdílné
Klarinet-Varhany	6,84	1,99	Rozdílné
Klarinet-Syntetický signál	8,67	1,99	Rozdílné
Flétna-Housle	4,26	1,99	Rozdílné
Flétna--Piano	14,39	1,99	Rozdílné
Flétna-Saxofon	5,22	1,99	Rozdílné
Flétna-Trumpeta	8,42	1,99	Rozdílné
Flétna-Varhany	6,33	1,99	Rozdílné
Flétna-Syntetický signál	10,21	1,99	Rozdílné
Housle--Piano	12,34	1,99	Rozdílné
Housle-Saxofon	1,14	1,99	Stejné
Housle-Trumpeta	4,76	1,99	Rozdílné
Housle-Varhany	10,75	1,99	Rozdílné
Housle-Syntetický signál	6,86	1,99	Rozdílné
Piano-Saxofon	10,87	1,99	Rozdílné
Piano-Trumpeta	8,38	1,99	Rozdílné
Piano-Varhany	19,95	1,99	Rozdílné
Piano-Syntetický signál	8,09	1,99	Rozdílné
Saxofon-Trumpeta	3,49	1,99	Rozdílné
Saxofon-Varhany	11,58	1,99	Rozdílné
Saxofon-Syntetický signál	5,46	1,99	Rozdílné
Trumpeta-Varhany	14,65	1,99	Rozdílné
Trumpeta-Syntetický signál	1,91	1,99	Stejné
Varhany-Syntetický signál	16,38	1,99	Rozdílné

Z porovnání hodnot T je vidět, že kromě 4 párů je u hudebních nástrojů statistický významný rozdíl v průměrné maximální hodnotě náhodného přírůstku k fázovému spektru, který ještě vyvolá stejný sluchový vjem jako signál s originálním fázovým spektrem.

5.2 Výsledky druhého testu

V následující tabulce jsou zprůměrovaná hodnocení jednotlivých testovaných osob. Výsledky představují z kolika harmonických se musel signál skládat, aby změna ve fázovém spektru měla vliv na sluchový vjem

Tabulka 5.4 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro druhý test

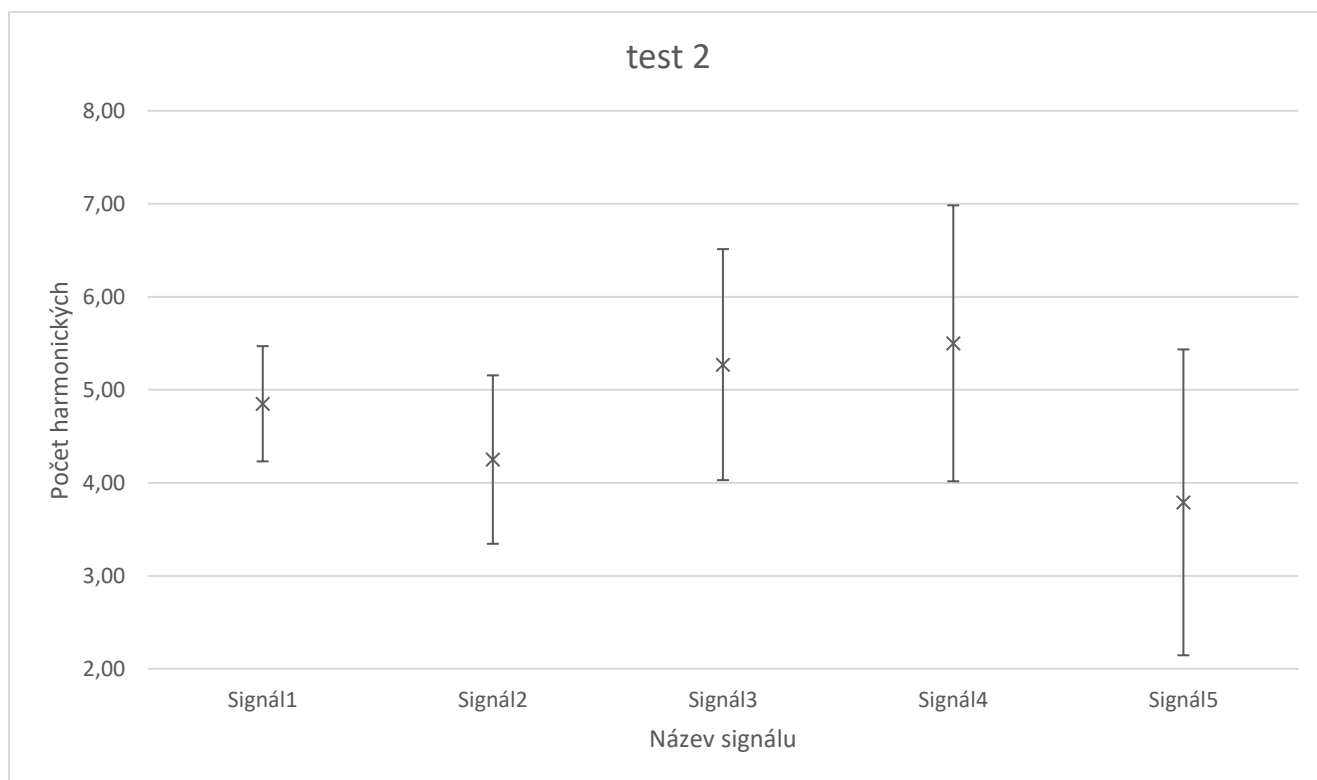
	Signál1	Signál2	Signál3	Signál4	Signál5
Posluchač 1	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Posluchač 2	4,00	2,00	3,67	3,00	3,00
Posluchač 3	10,67	1,67	4,00	3,33	3,00
Posluchač 4	7,33	10,33	3,67	7,33	6,00
Posluchač 5	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Posluchač 6	2,67	2,00	3,67	4,00	3,67
Posluchač 7	2,00	7,33	4,00	3,33	3,00
Posluchač 8	4,67	2,00	6,00	4,00	4,00
Posluchač 9	10,33	5,33	6,00	4,00	6,00
Posluchač 10	2,33	6,00	3,67	3,33	2,67
Posluchač 11	2,00	5,00	3,67	4,67	4,67
Posluchač 12	9,67	11,33	10,00	6,33	13,33
Posluchač 13	6,33	11,33	11,00	9,00	11,00
Posluchač 14	6,33	13,67	11,33	7,67	10,00
Posluchač 15	4,67	2,00	6,00	4,00	4,00
Posluchač 16	5,33	2,33	8,33	6,00	3,67

Z výsledků všech testovaných osob v prvním test jsou v následující tabulce vypočítané základní statistické ukazatele

Tabulka 5.5 Základní statistické ukazatele pro druhý test

	Signál1	Signál2	Signál3	Signál4	Signál5
Průměr	4,85	4,25	5,27	5,50	3,79
σ^2	4,85	10,25	19,27	27,5	33,79
σ	2,2	3,2	4,39	5,24	5,81
95% interval spolehlivosti	0,62	0,91	1,24	1,48	1,64

V následujícím grafu jsou zobrazena data z tabulky 5.5



Obrázek 5.2 Průměrné počty harmonických potřebné k pozorování změny ve sluchovém vjemu s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti

5.2.1 Vyhodnocení testů t testem

V následující tabulce je zobrazeno, stejně jako u prvního testu, porovnání T_{krit} s T vypočítaným pro jednotlivé páry. Stejně jako v předchozím případě je zde $T_{krit}=1,99$.

Tabulka 5.6 Vypočítané parametry t pro jednotlivé páry signálů

Pár signálů	T	T_{krit}	
Signál1- Signál2	1,91	1,99	Stejné
Signál1- Signál3	1,04	1,99	Stejné
Signál1- Signál4	1,39	1,99	Stejné
Signál1- Signál5	2,10	1,99	Rozdílné
Signál2- Signál3	2,30	1,99	Rozdílné
Signál2- Signál4	2,50	1,99	Rozdílné
Signál2- Signál5	0,85	1,99	Stejné
Signál3- Signál4	0,41	1,99	Stejné
Signál3- Signál5	2,49	1,99	Rozdílné
Signál4- Signál5	2,68	1,99	Rozdílné

Vy výsledcích druhého testu je vidět, že průměrný počet harmonických potřebný ke zaznamenání změny fáze se pro signál1 (frekvence první harmonické 100 Hz), signál3 (frekvence první harmonické 1400 Hz) a signál4 (frekvence první harmonické 2000 Hz) pohybuje kolem 5. Ze statistické hlediska se ukazuje, že tyto 3 signály mezi sebou nemají významné rozdíly v průměrných hodnotách. Průměrný počet harmonických pro signál2 (frekvence první harmonické 600 Hz) a signál5 (frekvence první harmonické 3000 Hz) se spíše blíží číslu 4. Z grafu je vidět, že se nedá říct, že počet harmonických klesá s frekvencí. Pokles v počtu harmonických se dal pozorovat pouze pro signál2 a signál5. Dá se tedy říct, že počet harmonických potřebných pro zaregistrování změn ve fázovém spektru se mění s frekvencí. Nedá se ovšem přesně říct, podle jaké závislosti.

5.3 Výsledky třetího testu

V následující tabulce je ukázáno hodnocení párů jednotlivými testovanými osobami. Pro připomenutí hodnotí se na škále od 0 do 5. Přičemž hodnocení nula znamená, že signály jsou stejné a hodnocení 5 znamená, že signály jsou různé.

Tabulka 5.7 Zobrazení odpovědí testovaných osob pro třetí test

	Pár 1	Pár 2	Pár 3	Pár 4	Pár 5	Pár 6	Pár 7	Pár 8
Posluchač 1	4,40	4,40	0,60	0,20	4,40	4,70	5,00	3,80
Posluchač 2	2	2,5	0	0	1	2	2,5	2
Posluchač 3	3,3	5	0,9	1,1	5	5	5	3,7
Posluchač 4	1,9	3,5	0	3	1,4	5	3,2	1,8
Posluchač 5	5	5	0	0	5	5	5	5
Posluchač 6	4,2	5	1,1	0,1	5	5	5	5
Posluchač 7	5	5	1,5	1,6	5	5	5	3,8
Posluchač 8	5	4,5	0	0	5	5	5	5
Posluchač 9	5	5	0,5	1,7	4,6	5	5	4,4
Posluchač 10	5	5	0	0	5	5	5	5
Posluchač 11	3,4	3,8	2,5	1	4,8	4,6	4,5	3,1
Posluchač 12	3	4,5	1,2	2	5	3,7	4	4,2
Posluchač 13	3,9	3	2	3	4,3	5	5	2
Posluchač 14	4	3,9	0,7	2,7	4	4,5	5	3,9
Posluchač 15	5	4,5	0	2,4	5	5	4	5
Posluchač 16	4	3,9	2	0	4,6	4,6	5	4,5
	Pár 9	Pár 10	Pár 11	Pár 12	Pár 13	Pár 14	Pár 15	Pár 16
Posluchač 1	4,4	4,4	0,6	0,2	4,4	4,7	5	3,8
Posluchač 2	2	2,5	0	0	1	2	2,5	2
Posluchač 3	3,3	5	0,9	1,1	5	5	5	3,7
Posluchač 4	1,9	3,5	0	3	1,4	5	3,2	1,8
Posluchač 5	5	5	0	0	5	5	5	5
	Pár 9	Pár 10	Pár 11	Pár 12	Pár 13	Pár 14	Pár 15	Pár 16
Posluchač 6	4,2	5	1,1	0,1	5	5	5	5
Posluchač 7	5	5	1,5	1,6	5	5	5	3,8
Posluchač 8	5	4,5	0	0	5	5	5	5
Posluchač 9	5	5	0,5	1,7	4,6	5	5	4,4
Posluchač 10	5	5	0	0	5	5	5	5
Posluchač 11	3,4	3,8	2,5	1	4,8	4,6	4,5	3,1
Posluchač 12	3	4,5	1,2	2	5	3,7	4	4,2
Posluchač 13	3,9	3	2	3	4,3	5	5	2
Posluchač 14	4	3,9	0,7	2,7	4	4,5	5	3,9
Posluchač 15	5	4,5	0	2,4	5	5	4	5

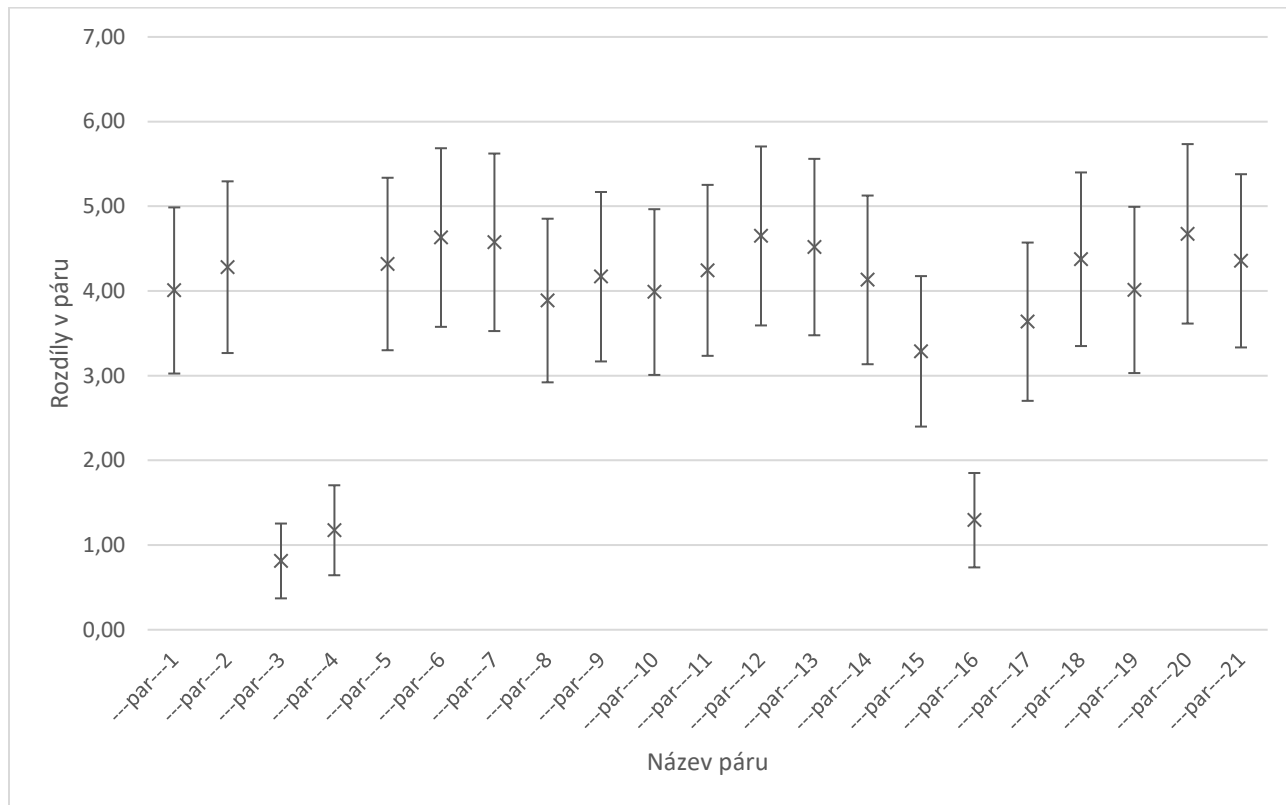
Posluchač 16	4	3,9	2	0	4,6	4,6	5	4,5
	Pár 17	Pár 18	Pár 19	Pár 20	Pár 21			
Posluchač 1	4,4	4,4	0,6	5	5			
Posluchač 2	2	2,5	0	2	2			
Posluchač 3	3,3	5	0,9	5	4			
Posluchač 4	1,9	3,5	0	4,4	4,5			
Posluchač 5	5	5	0	5	5			
Posluchač 6	4,2	5	1,1	5	5			
Posluchač 7	5	5	1,5	5	5			
Posluchač 8	5	4,5	0	5	5			
Posluchač 9	5	5	0,5	5	5			
Posluchač 10	5	5	0	5	5			
	Pár 17	Pár 18	Pár 19	Pár 20	Pár 21			
Posluchač 11	3,4	3,8	2,5	4,5	4,5			
Posluchač 12	3	4,5	1,2	5	2			
Posluchač 13	3,9	3	2	4,5	4			
Posluchač 14	4	3,9	0,7	5	3,7			
Posluchač 15	5	4,5	0	5	5			
Posluchač 16	4	3,9	2	4,4	5			

Z výsledků všech testovaných osob v prvním test jsou v následující tabulce vypočítané základní statistické ukazatele

Tabulka 5.8 Základní statistické údaje pro třetí test

	Pár 1	Pár 2	Pár 3	Pár 4	Pár 5	Pár 6	Pár 7	Pár 8	Pár 9
Průměr	4,01	4,28	0,81	1,18	4,32	4,63	4,58	3,89	4,17
σ^2	4,01	4,28	0,81	1,18	4,32	4,63	4,58	3,89	4,17
σ	2,00	2,07	0,90	1,08	2,08	2,15	2,14	1,97	2,04
95% interval spolehlivosti	0,98	1,01	0,44	0,53	1,02	1,05	1,05	0,97	1,00
	Pár 10	Pár 11	Pár 12	Pár 13	Pár 14	Pár 15	Pár 16	Pár 17	Pár 18
Průměr	3,99	4,24	4,65	4,52	4,13	3,29	1,29	3,64	4,38
σ^2	3,99	4,24	4,65	4,52	4,13	3,29	1,29	3,64	4,38
σ	2,00	2,06	2,16	2,13	2,03	1,81	1,14	1,91	2,09
95% interval spolehlivosti	0,98	1,01	1,06	1,04	1,00	0,89	0,56	0,93	1,02
	Pár 19	Pár 20	Pár 21						
Průměr	4,01	4,68	4,36						
σ^2	4,01	4,68	4,36						
Σ	2,00	2,16	2,09						
95% interval spolehlivosti	0,98	1,06	1,02						

Údaje z tabulky 5.8 jsou zobrazeny graficky v následujícím grafu



Obrázek 5.3 Průměrné rozdíly naměřené v jednotlivých párech s ukázaným 95% intervalem spolehlivosti

Výsledky třetího testu potvrzují tvrzení, že různé změny fázového spektra u signálů se stejným amplitudovým spektrem mají za následek různé sluchové vjemy. Dokonce je vidět, že rozdíly ve sluchovém vjemu mezi signály považovaly většinou testované osoby za různé. Jako podobné se jevily páry 3 (signál s nulovou fází-signál s lineárním nárustem fáze), 4 (signál se sinusovou fází o frekvenci 200 Hz - signál s lineárním nárustem fáze) a 16 (signál s nulovou fází - signál se sinusovou fází o frekvenci 200 Hz). Dá se tedy říct, že jako podobné se jeví signály s nulovou fází, fází, která má funkci sinus o nízké frekvenci a signál jehož fáze narůstá podle lineární funkce. Ukazuje se tedy, že jako nejméně odlišné se ve výsledcích jeví vzájemně pomalu probíhající změny ve fázovém spektru.

5.3.1 Ověření spolehlivosti testovaných osob

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3, bylo pro tento test vytvořeno dalších 7 párů, které se skládali ze 2 stejných signálů. Účelem těchto párů bylo ověřit důvěryhodnost testovaných osob. Výsledky hodnocení těchto párů jsou ukázány v následující tabulce

Tabulka 5.9 Odpovědi testovaných osob na páry složené ze stejných signálů

	Pár 22	Pár 23	Pár 24	Pár 25	Pár 26	Pár 27	Pár 28
Posluchač 1	0,2	1,5	2,5	0,3	1,7	0,4	0,2
Posluchač 2	0	0	0	0	0	0	0
Posluchač 3	1,1	1,9	0	0	0,6	0	0
Posluchač 4	0,5	0	0	0,2	1,2	0	0
Posluchač 5	0	0	0,1	0	0	0	0
Posluchač 6	0	0,4	0	1,4	0	0	0
Posluchač 7	0,3	1,6	0,4	0	1,1	0	0
Posluchač 8	0	0	0	0	0	0	0
Posluchač 9	0	0	1,5	0,4	0,6	0,6	2,2
Posluchač 10	0	0	0	0	0	0	0
Posluchač 11	0,1	0,4	0,6	0,2	0,2	0,3	0,1
Posluchač 12	0,3	0,1	0	0	0,6	0,9	0,6
Posluchač 13	0	0,3	0,8	0,4	0,1	0	0,4
Posluchač 14	0	0,1	0,2	0	0	0,5	0
Posluchač 15	0	0	0	0	0	0	0
Posluchač 16	0	0	0,5	0,5	1	0	0,5

Základní statistické údaje jsou zobrazeny v následující tabulce

Tabulka 5.10 Základní statistické údaje pro páry složené ze stejných signálů

	Pár 22	Pár 23	Pár 24	Pár 25	Pár 26	Pár 27	Pár 28
Průměr	0,16	0,39	0,41	0,21	0,44	0,17	0,25
σ^2	0,16	0,39	0,41	0,21	0,44	0,17	0,25
σ	0,40	0,63	0,64	0,46	0,67	0,41	0,50
interval spolehlivosti 95%	0,19	0,31	0,31	0,23	0,33	0,20	0,24

Již v tabulce 5.9 je vidět, že většina posluchačů, kromě posluchače 1 a 3, hodnotila rozdíly mezi stejnými signály buď jako velmi malé nebo nulové. V rámci možností se dá považovat důvěryhodnost posluchačů za přijatelnou.

6. Závěr

Úkolem této práce bylo zjistit, zda vliv různých fázových změn ovlivní poslechový vjem u posluchače. K tomuto úkolu byly pro práci sestaveny tři poslechové testy. Které se zabývaly různými účinky změn fáze u zvukových signálů. Výsledky testů se ale musejí brát s rezervou, jelikož testy neprobíhali na jednom místě a se stejnou sadou sluchátek.

První test se zabýval tím, jaký maximální náhodný přírůstek ve fázovém spektru nebude pro testované osoby sluchově postřehnutelný. Také se zde zkoumalo, zda různé zvukové signály budou mít tyto hranice odlišné. Výsledky tohoto testu ukazují, že se zde dosáhlo docela velkých rozdílů mezi jednotlivými nástroji. Jako nejméně fázově odolné se ukázalo piano, zde byly změny ve sluchovém vjemu pozorovány při náhodném přírůstku menším než $\pm \frac{1}{15}\pi$. Piano bylo následované syntetickým signálem, trumpetou, saxofonem, houslemi, cellem, klarinetem a flétnou. Vnímatelné náhodné přírůstky pro tyto signály se pohybovali v rozmezí od $\pm \frac{1}{6}\pi$ do $\pm \frac{2}{5}\pi$. Jako úplně fázově nejodolnější se jeví varhany, kde se změny u sluchového vjemu začali projevovat až u náhodného přírůstku k fázovému spektru $\pm \frac{2}{3}\pi$. Dá se tedy říct, že při stejných změnách ve fázovém spektru začneme rozdíly ve sluchovém vjemu pozorovat pro různé signály při různých hranicích přírůstku k fázovému spektru. Z výsledků ovšem není patrná závislost, která určuje, jak bude který nástroj fázově odolný.

Druhý test se zaměřil na to z kolika harmonických složek se musí signál skládat, aby se u něj daly pozorovat změny v sluchovém vjemu. Z výsledků plyne, že počet harmonických, který je potřeba k rozpoznání změn ve frekvenci se do frekvence 2400 Hz pohybuje kolem 5. Na nejvyšší frekvenci byl počet harmonických potřebný ke vnímání změny fáze, po zprůměrování odpovědí, 3,79. Tento test tady prokázal, že při různých frekvencích je třeba různých počet harmonických v signálu, aby se daly pozorovat změny ve sluchovém vjemu vyvolané změnou fázového spektra. Dále se ukazuje, že při vysokých frekvencích je tento počet menší než při nízkých frekvencích.

Třetí test zkoumal, zda budou mít různé změny ve fázovém spektru za následek různé změny ve sluchovém vjemu. Z výsledků plyne, že toto tvrzení se dá potvrdit. Na to, jak moc se od sebe jednotlivé signály lišily mělo největší vliv to, jak rychlé změny byly prováděny ve fázovém spektru. Za navzájem nejvíce podobné byly označovány signály se vzájemně pomalými změnami. Například, jako nejpodobnější se jevil signál s nulovou fází a signál, jehož fáze lineárně narůstá do π . Naopak signály s velkou vzájemnou rychlostí změn ve fázovém spektru, například pár s fázovým spektrem ve tvaru sinus o vysoké frekvenci a signál s lineárním nárůstem fáze, byly označovány za nejodlišnější.

Zdroje

- [1] G. S. Ohm, Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und Dähnlicher tonbildender Vorrichtungen, Ann. Phys. Und Chemie, 1843
- [2] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-.....80-7331-297- 8.
- [3] M.-V. Laitinen, S. Disch a V. Pulkki, „Sensitivity of Human Hearing to Changes in PhaseSpectrum“. JAES
- [4] I. Štěpánková, Fázové změny zvukových signálů a jejich právě rozpoznatelný rozdíl, FEL ČVUT v Praze, Diplomová práce.
- [5] GUILFORD, J. P. *Psychometric methods*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1954. McGraw-Hill series in psychology.
- [6] MELKA, A. *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-733- -043-0

Popis signálu použitých v této práci:

„Trumpet - C4“ by MTG of Freesound.org

„Flute - C4“ by MTG of Freesound.org

„Violin - C4“ by MTG of Freesound.org

„Sax Alto - C4“ by MTG of Freesound.org

„Cello - C2 - other“ by MTG of Freesound.org

overall quality of single note - clarinet - C4 by yano1 of Freesound.org

„Organ - loud - C4 (Rode_Pedal_25.wav)“ by Samulis of Freesound.org