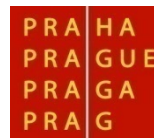




STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA SDĚLOVACÍ TECHNIKY

110 00 Praha 1, Panská 856/3,

☎ 221 002 111, 📠 221 002 666, www.panska.cz, e-mail: sekretariat@panska.cz



HUDEBNÍ AKUSTIKA

MATURITNÍ PRÁCE ZE ZKUŠEBNÍHO PŘEDMĚTU
aplikovaná informatika

Autor:

Tomáš Balihar, Adam Auersvald

Studijní obor:

26-46-M/001

Obrazová a zvuková technika

Školní rok:

2010/2011

Třída: 4. D

Anotace

Práce je zaměřená na analýzu zvuku a následné porovnání jednoho tónu zahraného pěti různými nástroji pomocí provedení Fourierovy analýzy. V práci jsou též popsány a vysvětleny důležité fyzikální jevy a základní pojmy se zvukem jako takovým spojené.

Annotation

This work named „Music acoustics“ was made like long-term leaving exam work. Work is focused on the analysis and following comparison of one tone played by five different instruments. In the work there are also described and explained important physical phenomena and basic terms with sound itself connected.

1. Úvod

Naše práce se řadí do tématu hudební akustika. Budeme se tedy především zajímat o hudební nástroje a hlavně o jejich tóny. V teoretické části bude vysvětleno vše podstatné, co do tohoto tématu spadá. Z počátku bude rozdělena akustika, dále bude popsáno, co je to zvuk a budou vysvětleny jeho vlastnosti. V teoretické části si také samozřejmě musíme detailně rozdělit hudební nástroje do jednotlivých skupin, rozebrat Fourierovu transformaci a popsat, jak funguje lidský orgán sluchu ucho, které je pro porovnání tónů velmi podstatné.

Dnešní svět by se bez hudby neobešel. Každý poslouchá svůj oblíbený žánr a poslechne si, co se mu líbí. Hudba se stále rozvíjí ve všech směrech, za poslední léta, že se ale, dle našeho názoru rozvíjí zvláště ta moderní, v níž je použito mnoho digitálních prvků, (např.: syntezátorů. Klasickou hudbu hranou na nejstarších hudebních nástrojích poslouchá stále méně lidí. Přitom naučit se hrát na hudební nástroj není vůbec jednoduché, dokonce musí mít daný člověk hodně talentu a hudební sluch. To je právě ten rozdíl od většiny dnešních umělců, kteří spíše dlouhé hodiny sedí ve zvukovém studiu a právě s pomocí digitální techniky tvoří hudbu.

Poté většina lidí třeba ani neví, jak znějí staré klasické nástroje, na kterých vlastně začínala tvorba hudebního světa. Setkali jsme se také s hodně lidmi, kteří nepoznají housle od violy. My jsme si dali za úkol vytvořit práci, která by měla zájemcům o dané téma rozšířit obzory, jak jednotlivé nástroje vypadají, znějí a hlavně, v čem se liší. Ukázka bude prezentována na jednotlivých tónech 5 různých nástrojů stejné skupiny. Jako prostředek jsme zvolili výukový software Mathematica od společnosti Wolfram, neboť je studentům naší školy dostupný, má jasnou a jednoduchou syntaxi, takže ho mnoho studentů může začít využívat, pokud tak neučinili.

Práce je nám velmi blízká, jelikož hudbu, jako každý z nás, posloucháme rádi a z fyzikálního hlediska je hudba velmi zajímavá. Pevně věříme, že se nám podaří ukázat a objasnit věci, které nám dosud nebyly známy, a že si lidé po přečtení naší práce dále nebudou plést hudební nástroje mezi sebou.

2. Teoretická část

2.1 Základní pojmy

Tato práce se z velké většiny věnuje hudební akustice, která zkoumá zvuky a jejich vzájemné skládání se zřetelem na potřeby hudby, proto nejdříve objasníme základní pojmy a vlastnosti zvuku.

2.1.1 Akustika a její dělení

Akustika, nauka o zvuku, spadá mezi jedny z nejstarších odvětví fyziky. Zabývá se slyšitelným vlněním hmotného prostředí, které se ve fyzice, ale i v běžném životě, nazývá zvuk. Přesná definice dle Úvodu do hudební akustiky pro hudebníky zní: *Akustika je obor zabývající se fyzikálními ději, jsou-li spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šíření a vnímání zvuku sluchem.*

Akustiku je možné dále dělit na podoby podle toho, jakými vlastnostmi zvuku se zabývá.

- Fyzikální akustika - věnuje se způsobu vzniku a šíření zvuku, jeho odrazem od různých materiálů a pohlcování v různých materiálech.
- Hudební akustika - zabývá se zvuky a jejich různými kombinacemi s ohledem na potřeby hudby a zpěvu.
- Stavební akustika - zkoumá dobré a nerušené podmínky poslouchatelnosti hudby a řeči v obytných místnostech a sálech a zároveň možnosti eliminovat nežádoucího šíření hluku z jednoho prostoru do druhého.
- Fyziologická akustika - se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním uchem.
- Elektroakustika - věda zabývající se šířením zvuku, jeho záznamem a jeho reprodukci s využitím elektrického proudu.

Akustika se dále věnuje vzniku, vlastnostem a účinku mechanického vlnění s velmi vysokou frekvencí pro ($f > 16$ kHz), tj. ultrazvuku, který je slyšitelný pouze pro některé živočichy (netopýr, pes, delfín, ...), a vlnění s velmi nízkou frekvencí ($f < 16$ Hz), tj. infrazvuku, který slyší např.: sloni. Na infrazvuk ani ultrazvuk lidské ucho citlivé není, přesto tato vlnění člověku mohou uškodit. Ultrazvuk se dále používá při lékařském vyšetření, pomocí sonaru ultrazvuk zjišťuje polohu a vzdálenost různých těles a i v technické praxi (např. při rybaření pro zkoumání dna), dále se ultrazvukem čistí filmové materiály ve filmové technice.

2.1. Hudební nástroje

Vzhledem k tomu, že budeme porovnávat zvuky různých hudebních nástrojů, je nutné tyto nástroje lépe rozebrat.

Obecně je hudební nástroj zařízení k vydávání tónů a zvuků používaných v hudbě. V dnešní době je hudební nástroj prakticky cokoliv, co vydává nějaký zvuk. Nástroje lze třídit podle různých vlastností, např.: podle:

- principu vytváření zvuku;
- materiálu, ze kterého byl daný hudební nástroj vyroben;
- způsobu použití (jak se vlastně na nástroj hraje).

Hudební nástroje lze dělit podle Hornbostelovy a Sachsovy systematiky hudebních nástrojů. Je to nejpoužívanější systém na třídění hudebních nástrojů, který byl zveřejněn roku 1914 a znamenal zásadní změnu v názorech, jak hudební nástroje třídit. Především se tato systematika zabývá hlavně tím, jak daný hudební nástroj zvuk vytvoří nebo jak je hudební nástroj zkonstruován.

Tento systém vytvořili muzikologové Erich Moritz von Hornbostel (1877-1935) a Curt Sachs (1881-1959). Původně to měla být systematika určená k třídění nástrojů z celého světa uložených například v muzejních sbírkách, ale zachovala se do dneška. Označování nástrojů vychází z Deweyova desetinného systému, což je systém třídění knih a dalších archiválií podle tématu vynalezený Melvilem Deweyem v roce 1876. Systém prodělal dvacet dva revizí a úprav. Vždy jednou za 7 let, naposledy v roce 2004.

Každý typ hudebního nástroje je vlastně charakterizován číselným kódem. První číslo označuje hlavní skupinu nástroje podle fyzikální podstaty tvoření tónu. Následující čísla označují podskupinu podle způsobu hry na tento nástroj a základních principů jeho stavby. Čísla oddělená tečkou nástroj blíže specifikují.

První dvě úrovně třídění ukazuje tabulka:

Název:	Číselná klasifikace	Popis
Idofony	1	Materiál nástroje vydává tón díky své pružnosti
Úderové	11	Nástroj je rozechvíván úderem
Trsací	12	Nástroj je rozechvíván vychýlením kmitající části
Třecí	13	Kmity jsou vybudovány třením
Vzduchové	14	Nástroj je rozezvučen proudem vzduchu

Membranofony	2	Zvuk je vyluzován membránou
Úderové	21	Membrána je rozechvívána úderem
Trsací	22	Kmity jsou vybuzovány trsáním
Třecí	23	Kmity jsou vybuzovány třením
Chordofony	3	Zvuk vzniká kmitáním struny
Jednoduché	31	Základem je struna a její upevnění
Složené	32	Nedílnou součástí je rezonátor
Aerofony	4	Zvuk vznikne kmitáním vzduchu nebo jiného plynu
Volné	41	Kmitající vzduch není ohraničen nástrojem
Uzavřené	42	Kmitající vzduch je ohraničen nástrojem
Elektrofony	5	Zvuk je vytvářen elektronicky
Elektroakustické	51	Zvuk vzniká mechanicky a elektricky je zesilován
Elektronické	52	Zvuk je vytvářen čistě elektronicky
Hydrofony	6	Zvuk vzniká kmitáním vody nebo jiné kapaliny

Nástroje jsou rozděleny do 5 skupin:

- **Idiofony** – jsou to hudební nástroje, které vydávají zvuky a tóny chvěním do nich samotných. Zde nenajdeme žádnou membránu, struny nebo vzduchové sloupce. Většina bicích nástrojů, které nemají membránu, patří právě do této skupiny. Tyto nástroje jsou velmi staré a lidé na ně hráli už v pravěku. Česky nazýváme tyto nástroje jako samozvучné. Patří sem například zvon na obr. 11, gong a trianql na obr. 12.
- **Membranofony** – jsou to hudební nástroje, u kterých vydává zvuk napjatá membrána. Všechny typy bubnů patří právě do této skupiny. Jako například typický buben na obr. 13.
- **Chordofony** – jsou to hudební nástroje, u kterých je zdrojem zvuku chvějící se struna, napnutá mezi dvěma body. Chordofony se dále dělí na:
 - smyčcové – housle, viola, violoncello a kontrabas;
 - drnkací – kytara, citera, harfa a loutna;
 - kolové (či třecí) – niněra;
 - klávesové – klavír, klavichord a cembalo;
 - úderné – cimbál a santur.



Obr. 13 Buben

- **Chordofony** – jsou to hudební nástroje, u kterých je zdrojem zvuku chvějící se struna, napnutá mezi dvěma body. Chordofony se dále dělí na:
 - smyčcové – housle, viola, violoncello a kontrabas;
 - drnkací – kytara, citera, harfa a loutna;
 - kolové (či třecí) – niněra;
 - klávesové – klavír, klavichord a cembalo;
 - úderné – cimbál a santur.
- **Aerofony** - vzduchozvučné nástroje, u nichž zvuk vzniká kmitáním sloupce vzduchu. Do této skupiny patří všechny druhy fléten (zobcová, příčná, panova), dále pak hoboje, klarinet na obr. 16 a saxofon na obr. 17.

V pozdější době, jak se rozvíjela technika a pronikala i do svých hudebních nástrojů, byly přidány další skupiny:

- **Elektrofony** – jsou všechny nástroje, jehož zvuk je vytvářen elektronicky. V původní klasifikaci Hornbostela a Sachse z roku 1914 ještě nebyly elektrofony obsaženy. Mezi elektrofony řadíme nástroje, které musejí zvuk zesilovat nebo jakkoliv pozměňovat. Elektrofony se dále dělí dle tabulky.

Elektromechanické nástroje lze rozdělit podle typu snímání mechanických kmitů. Snímače mohou být elektromagnetické, elektrostatické, piezoelektrické či optické. Elektronické nástroje se dělí na analogové (pracující se spojitými změnami

elektrických veličin), digitální (pracující se signály v číslicové podobě) a hybridní (kombinující oba principy). Dle způsobu generování zvuku lze elektronické nástroje rozdělit ještě na syntetizéry: Jejich hlavní činnost je přetváření již připravených signálů. Druhá skupina obsahuje samplem, jejichž základem je reprodukce zaznamenaných signálů. Nejznámější elektromechanický nástroj je elektrická kytara. Na obr. 18 a mezi elektrické nástroje patří digitální piano na obr. 19.



Obr. 18 Elektrická kytara



Obr. 19 Digitální piano

2.2.1 Kontrabas

V praktické části naší práce budeme některé nástroje blíže zkoumat, proto je nutné o nich vědět základní informace.

Kontrabas je strunný smyčcový nástroj se strunami laděnými v čistých kvartách: E_1 , A_1 , D , G (na rozdíl od většiny moderních smyčcových nástrojů, které jsou laděny v kvintách). Má široké využití v klasické hudbě - je nedílnou součástí symfonických i komorních orchestrů a mnoha smyčcových komorních souborů. Velice důležitou roli hraje i v dalších hudebních stylech: jazz, blues, folk. Kontrabas můžeme slyšet také v rock and rollu.

Dodnes panuje nejednotnost, zda kontrabas patří do houslové, nebo violové rodiny smyčcových nástrojů (violová rodina je odvozena od středověkého nástroje *viola da gamba*, moderní viola patří do houslové rodiny). Kontrabas má velmi podobnou stavbu jako viola *da gamba* (například horní část je výrazně užší než u houslí) a stejně jako ona je laděn v kvartách (housle a příbuzné nástroje jsou laděny v kvintách). Oproti violě *da gamba* ale nemá na hmatníku pražce, má méně strun a jeho výřezy na horní desce jsou více podobné houslovým.

Kontrabas zní vždy o oktávu níže, než je uveden v notovém zápisu. Nejčastěji je vyráběn se čtyřmi strunami v kvartovém ladění E_1, A_1, D, G . Pro symfonické účely se používají také pětistrunné kontrabasy s přidanou nejnižší strunou C_1 (kontra C), některé německé varianty mají místo struny C_1 strunu H_2 (subkontra H).

Při sólové hře je kontrabas často laděn o dva půltóny výše (tzv. sólové ladění): Fis_1, H_1, E, A , což mu dodá jasnější a brilantnější zvuk. Oproti standardnímu orchestrálnímu ladění se však změní tah strun natolik, že je nutné použít jinou sadu strun. Někteří (zvláště jazzoví) basisté používají kvintové ladění C_1, G_1, D, A , čili o oktávu níže než u violoncella, což má za následek vyšší hlasitost (struny vibrují v přirozenějších intervalech s menšími vyššími harmonickými frekvencemi a snáze se navzájem rozezvučí).

Mnohé kontrabasy mají nejnižší strunu laděnou na kontra C (místo kontra E). Toho se může dosáhnout buď prodloužením hmatníku na obr. 20 nebo speciálním mechanickým zařízením vedle hmatníku. Je to velice výhodné zejména pro orchestrální hru, protože violoncellový part je velice často zdvojeován s kontrabasovým (přičemž kontrabasy hrají o oktávu níže) a kontrabasy takto získají stejný tónový rozsah jako violoncella.

Hráč hrající na kontrabas může buď sedět na speciální stoličce nebo stát. Při hře ve stoje hráč podepírá nástroj levou nohou a nikoliv levou rukou, což mu dovoluje daleko větší volnost při hraní. V případě, že hráč sedí na stoličce, levou nohou se opírá o stoličku a pravou nohou o zem. Podobně jako u violoncella je kontrabas zakončen vysouvatelným bodcem zakončeným gumovou špičkou zabraňující sklouznutí špičky po podlaze.

Herní techniky jsou v podstatě stejné jako u ostatních smyčcových nástrojů, stejně jako u violoncella se používá palcová technika, kdy jsou tóny hrány i palcem levé ruky. V jazzu se navíc používá tzv. slapování, což je forma pizzicata, které se zahraje tak, aby se struna dotkla hmatníku (tím se docílí perkusivního „bouchnutí“ struny). Na kontrabas je obecně těžší zahrát rychlé a technicky náročné pasáže než např. na housle, protože basové struny jsou silnější a vzdálenost mezi tóny na hmatníku je větší.



Obr. 20 Kontrabas

2.3 Fourierova transformace

V naší práci je hlavní úkol porovnat jednotlivé tóny hudebních nástrojů. V praxi je výhodné (teoreticky i experimentálně) používat harmonických funkcí, jsou totiž snadno prakticky realizovatelné. Každou funkci jsme schopni vyjádřit jako součet či integraci harmonických funkcí, každá má ale jiný fázový posun a jinou amplitudu. Váhová frekvence nám vlastně udává, jaké frekvence je nutno použít, aby bylo pak možné z harmonických funkcí sestavit zpětně původní funkci. Tato váhová funkce (spektrum) bývá označována jako Fourierova transformace (dále jen FT).

Fourierova transformace je matematická metoda, kterou jsme schopni analyzovat periodické signály.

Jejím cílem je převést signály časové závislosti na závislost frekvenční.

Signál může být vyjádřen ve spojitém nebo diskrétním čase.

2.3.1 Definice Fourierovy transformace ve spojitém čase

Fourierova transformace $S(\omega)$ funkce $s(t)$ je definována integrálním vztahem:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt$$

Funkci $s(t)$ vypočteme z $S(\omega)$ inverzní Fourierovou transformací:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

2.3.2 Definice Fourierovy transformace v diskretním čase

Fourierova transformace $S(\Omega)$ posloupnosti $s(k)$ je definována vztahem:

$$S(\Omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k)e^{-i\Omega k}$$

Posloupnost $s(k)$ vypočteme z $S(\Omega)$ inverzní Fourierovou transformací:

$$s(k) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(\Omega)e^{i\Omega k} d\Omega$$

Tato transformace se označuje: DtFT, aby se tak odlišila od Fourierovy transformace spojitého signálu. Abychom nemuseli značením nijak odlišovat Fourierovu transformaci spojitého a diskretního signálu, zavedeme vztah mezi spojitým signálem a jeho spektrem:

$$S(\Omega) = \mathcal{F}[s(k)] \text{ a}$$

$$s(k) = \mathcal{F}^{-1}[S(\Omega)]$$

Spektrum diskretního signálu se od spektra spojitého signálu liší tím, že je periodické s periodou 2π .

Obecně je to vyjádření funkce v jiné bázi. Ve speciálním případě se uvažuje trigonometrická Fourierova transformace, která za hlavní složku pokládá funkce $\cos(kt)$ a $\sin(kt)$ nebo v komplexním tvaru $\exp(ikt)$, kde kt je celé číslo v případě Fourierovy řady nebo reálná proměnná v případě Fourierovy transformace.

Fourierovu transformaci lze ve více podobách. Definiční vzorec pro FT je vyjádřen pomocí integrálu, což není pro praktické použití příliš vhodný a to proto, že:

- analytické řešení vzorce existuje jen v omezeném počtu případů a je nutno jej hledat numericky;
- v případě počítačového zpracování nahraného signálu nemáme spojitou funkci, ale jen její hodnoty v diskretních vzorkovacích okamžicích.

Z tohoto důvodu existuje diskretní FT, která je již polynomem a jejími vstupy a výstupy jsou posloupnosti hodnot. Použití této metody je nutné v případě, když známe vzorky signálu a potřebujeme nalézt spektrum vzorků signálu, či je nutné nalézt signál ze vzorků spektra.

2.3.3 Ukázka Fourierovy transformace

Nejdříve si uvedeme příklad jednoduchého tónu. Matematický popis je snadný: $y = y_m \sin \omega t$, kde $\omega = 2\pi f$ a f je frekvence daného tónu.

Popis složeného tónu je prakticky stejný, ale obsahuje více členů, teoreticky jich může být nekonečně mnoho:

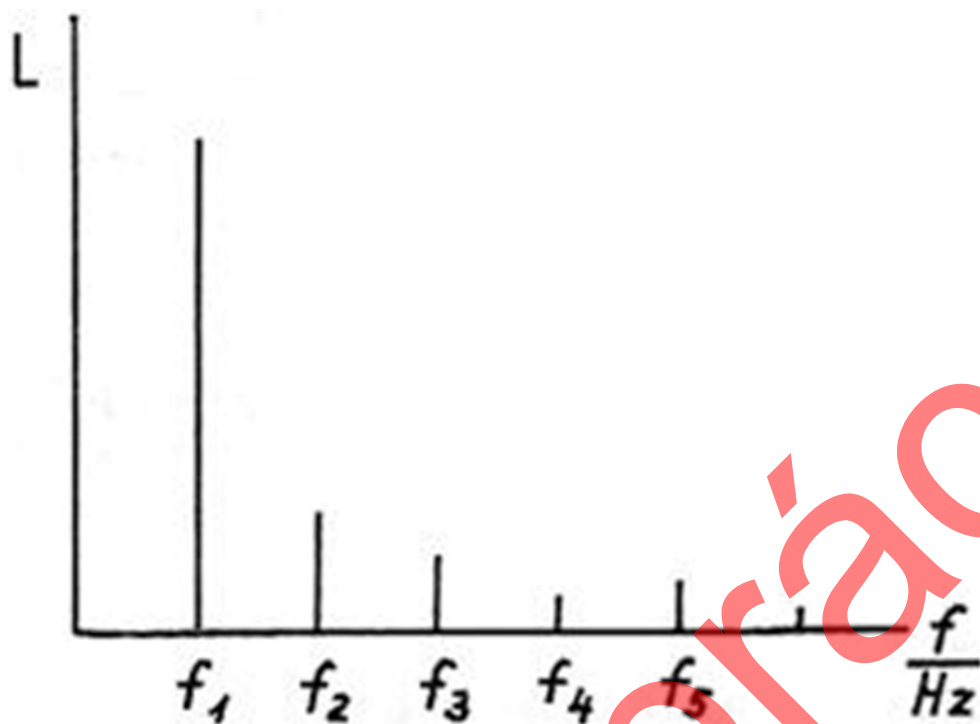
$y = y_{m1} \sin 2\pi f_1 t + y_{m2} \sin 2\pi f_2 t + y_{m3} \sin 2\pi f_3 t + \dots$. Složený tón je vlastně složen z mnoha tónů jednoduchých.

V dané rovnici se vyskytuje mnoho členů obsahující frekvenci f_1 , která je frekvence základní a určuje výšku složeného tónu, frekvence f_2, f_3, \dots jsou frekvence, které nazýváme vyšší harmonické. Lidské ucho nedokáže rozpoznat jednotlivé tóny, z kterých se složený tón skládá. Vnímá ho jako jeden tón, jenž má specifické zabarvení (barvu). Ta je určena právě vyššími harmonickými frekvencemi.

Základní frekvence je vždy nejnižší a vyšší harmonické postupně rostou. Základní tón má ale většinou nejvyšší amplitudu (resp. hlasitost). Tón se základní frekvencí je tedy nejdominantnější, a proto určuje právě tento tón se základní frekvencí výšku celého složeného tónu.

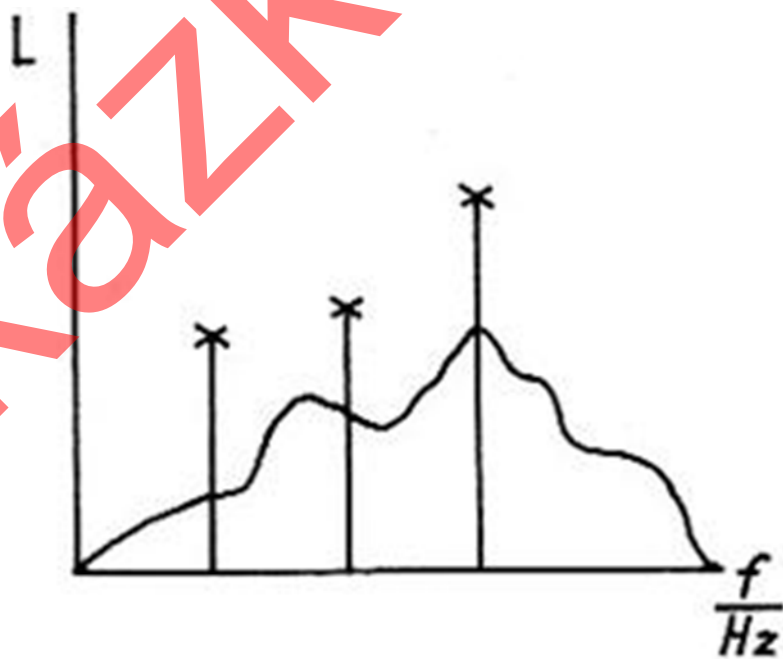
Tyto jmenované vlastnosti si ukážeme na obrázcích. Na obr. 26, je znázorněno frekvenční spektrum složeného tónu.

Spektrum není spojité – jasně vidíme, že na obrázku jsou zobrazeny pouze frekvence, které jsou násobkem frekvence základní



Obr. 26 Nespojité spektrum

Spektrum šumu (zobrazené na obr. 27) obsahuje frekvence z určitého intervalu

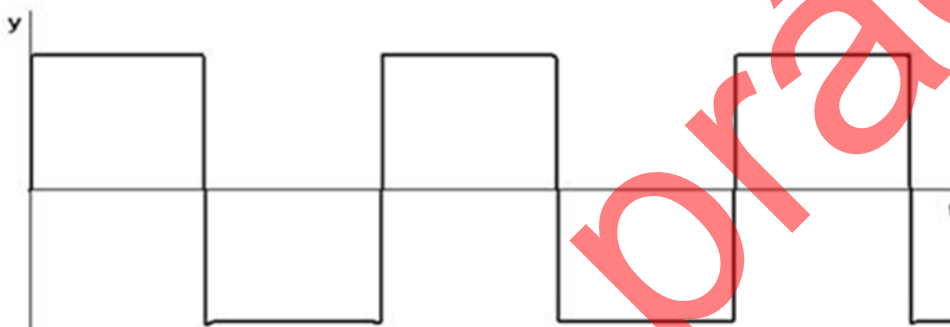


Obr. 27 Šum

Pomocí funkce dané předpisem

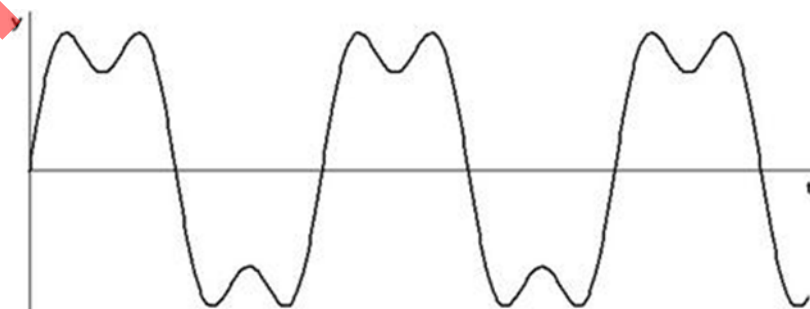
$y = y_{m1} \sin 2\pi f_1 t + y_{m2} \sin 2\pi f_2 t + y_{m3} \sin 2\pi f_3 t + \dots$, kde f_1, f_2, \dots a y_{m1}, y_{m2}, \dots mají význam popsany výše, jsme schopni získat vhodnou volbou těchto parametrů různé průběhy signálu – např. průběh ve tvaru obdélníku (viz obr. 28).

$y = y_{m1} \sin(2\pi f t) + y_{m2} \sin(2\pi \cdot 3ft) + \dots + y_{mn} \sin(2\pi \cdot (2n - 1)ft)$, Graf na obr. 28 není v praxi realizovatelný, je to pouze teoretický průběh. K němu se můžeme přiblížit tak, že ve výše uvedeném vztahu budeme uvažovat jen liché násobky základní frekvence.

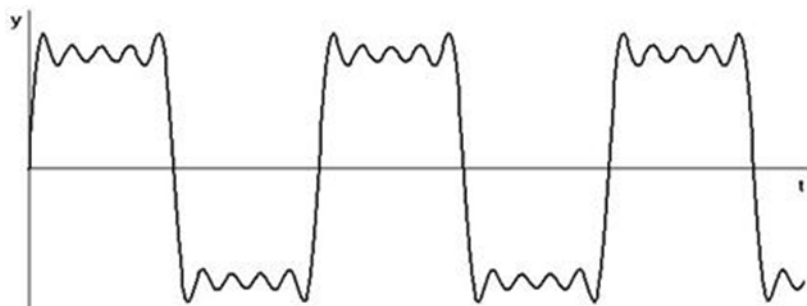


Obr. 28

Vezme – li v úvahu první dva členy, získáme graf zobrazený na obr. 29. Pokud vezmeme v úvahu prvních pět členů, dostaneme graf zobrazený na obr. 30. Tímto způsobem (tj. vhodnou volbou vyšších harmonických frekvencí a započtením vhodného počtu členů do celkového součtu) lze získat průběh libovolného periodického signálu pouze s využitím funkce sinus. A to je pro výrobu i další zpracování takového signálu velmi podstatné, neboť s funkcí sinus se velmi dobře pracuje matematicky a sinusový průběh např. napětí lze relativně snadno realizovatelný v praxi.



Obr. 29



Obr. 30

Jestliže chceme výpočet koeficientů Y_{mi} pro $i = 1, 2, 3, \dots, n$; musíme použít Fourierovu analýzu, jejímž použitím lze zapsat libovolnou periodickou funkci ve tvaru:

$$y = y_{m1} \sin 2\pi f_1 t + y_{m2} \sin 2\pi f_2 t + y_{m3} \sin 2\pi f_3 t + \dots$$

2.3.4 Definice diskrétní Fourierovy transformace

Přímá diskrétní Fourierova transformace má tvar:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-in k 2\pi / N}, n = 0, \dots, N-1$$

Zpětná (inverzní) diskrétní Fourierova transformace lze popsat vztahem:

$$d(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D(n) e^{in k 2\pi / N}, k = 0, \dots, N-1$$

Diskrétní Fourierova transformace našla velké uplatnění ve výpočetní technice. Podle definice však potřebujeme k výpočtu N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů.

Proto je, tento typ FT velice zdouhavý na výpočet, tak se hledá jednodušší a hlavně rychlejší algoritmus, který by snížil dobu výpočtu. Tento nový algoritmus, založený na exponenciálních diskrétních funkcích, nazýváme rychlá Fourierova

transformace, která vyžaduje jen $\frac{N}{2 \log_2(N)}$ komplexních součinů a $\frac{N}{\log_2(N)}$ komplexních součtů. Díky tomuto algoritmu se stala diskrétní Fourierova transformace nejrozšířenějším prostředkem pro numerický výpočet Fourierovy

transformace. Tento algoritmus je obsažen v mnoha matematických programech (Mathematica, Maple, Mathcad, Octave a další).

3. Praktická část

3.1. Analýza zvuků

V této části práce se budeme zabývat analýzou pěti stejných tónů vycházejících z pěti různých hudebních nástrojů. Použité hudební nástroje se nazývají nástroje smyčcové, jejichž princip jsme již podrobně objasnili v teoretické části naší práce. Smyčcové nástroje, se kterými budeme dále pracovat, jsou:

1. housle
2. violoncello
3. kytara
4. viola
5. kontrabas

U všech těchto nástrojů budeme pracovat se stejnou strunou s označením A , která po rozechvění vydává tón a . Jelikož je v naší práci hlavním úkolem analyzovat a následně porovnat již zmíněné tóny hudebních nástrojů, zakládá se celá praktická část na principu Fourierovi transformace, jež je detailně zmapován v teoretické části. Každý tón, který jsme nahráli v hudební škole v Benešově, nejprve v programu Sony soundforge upravíme tak, abychom měli jeho vzorek obsahující jen několik period původního zvuku. Nahráný zvuk má délku několik sekund, což znamená pro následně použitou Fourierovu transformaci zbytečnou zátěž počítače. Zvuk získaný úpravou v programu Sony soundforge je při běžném přehrání neidentifikovatelný, ale pro naše účely vhodný. Sestříhli jsme to tak, aby obsahoval skutečně jen pár period. A i to při vzorkovací frekvenci 44100 Hz znamená několik stovek dat (a kdy i několik stovek průchodů cykly v rychlé Fourierově transformaci).

Výpočet rychlé Fourierovy transformace jsme realizovali v softwaru Mathematica, který též umožňuje nahráný zvuk v datové podobě načíst. Vypočtená a zobrazená frekvenční spektra jsme pak u všech nástrojů porovnali.

3.1.1 Housle

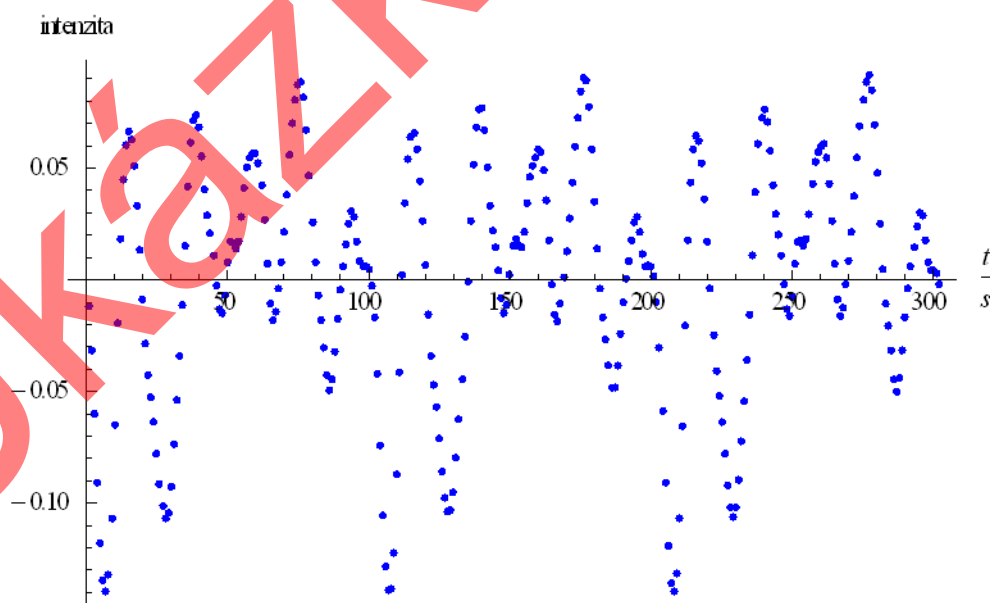
Prvním nástrojem, který budeme v naší práci analyzovat a následně porovnávat s již zmíněnými nástroji, jsou housle. Je to strunný smyčcový nástroj se

čtyřmi strunami laděnými v čistých kvintách: g , d^1 , a^1 , e^2 . Jsou nejmenší z rodiny houslových nástrojů, do které ještě mimo jiné patří viola a violoncello. Podrobnější informace o houslích jsou napsány v teoretické části.

Pomocí softwaru Mathematica a nahraného zdrojového tónu a^1 , jsme získali graf závislosti intenzity složeného tónu na čase. Průběh tónu zobrazený na obr. 31 udává charakter zvuku, na čemž se podílí fakt, že kromě frekvence základní, tyto zvuky dále obsahují i vyšší harmonické frekvence. Na základě nich jsme schopni jednotlivé zdroje zvuku (v našem případě strunné hudební nástroje) od sebe odlišit a vzájemně porovnávat. V grafu na obr. 31 jsou zobrazeny přesně tři periody průběhu zvuku. Z grafu závislosti intenzity na čase jsme schopni odečíst dobu trvání jedné periody. Jelikož je z grafu zřejmé, že časová osa označuje počet záznamů okamžité intenzity daného zvuku a ne přímo časy jejich záznamů, jsou každé dva po sobě jdoucí záznamy vzdáleny o $\frac{1}{44100}$ s. Při záznamu zvuku bylo totiž použito záznamové zařízení Edirol se vzorkovací frekvencí 44100 Hz. Periodu v sekundách tedy získáme tak, že počet

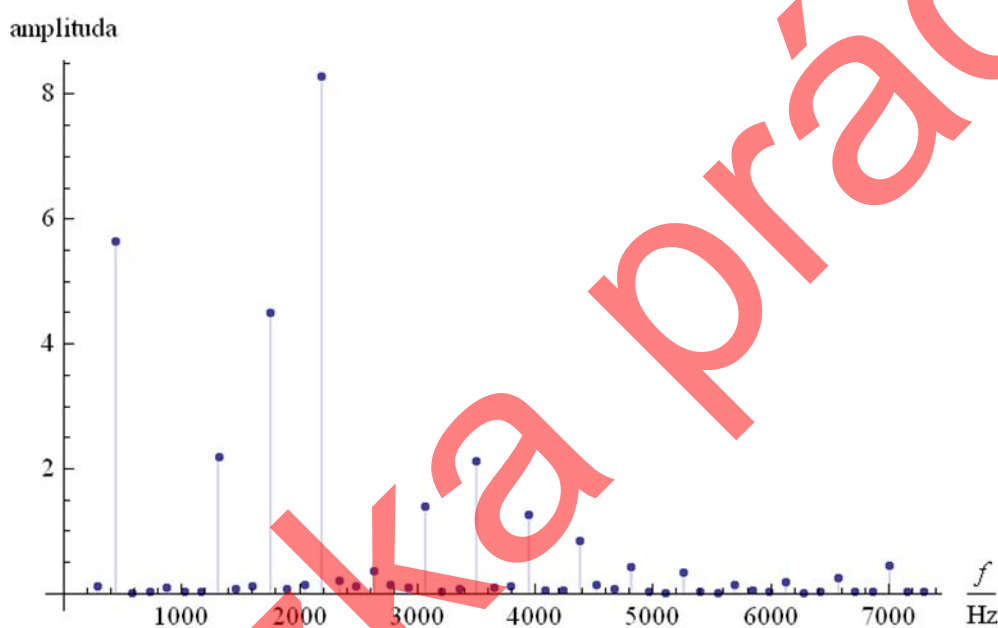
záznamů vynásobíme $\frac{1}{44100}$ s.

$$T = 100 \frac{1}{44100} = 0,002 \text{ s}$$



Obr. 31 Průběh složeného tónu houslí

Jelikož z průběhu složeného tónu houslí nejsme schopni zjistit dost podstatných informací, abychom mohli tento zvuk analyzovat a porovnat s ostatními nástroji, používáme Fourierovi transformaci. Ta převede signál z oblasti časové závislosti (jak tomu bylo u průběhu složeného tónu) do oblasti frekvenční závislosti. Pomocí softwaru Mathematica krátkého notebooku získáme frekvenční spektrum daného tónu houslí (viz obr. 32). Jak jsme již zmínili, složený tón obsahuje frekvenci základní a vyšší harmonické frekvence a právě tyto frekvence jsou spolu se svými amplitudami vidět na (obr. 32). Na základě spektra na obr. 32 můžeme již daný tón dobře analyzovat.



Obr. 32 Frekvenční spektrum

Podstatné frekvence, které můžeme charakterizovat na základě frekvenčního spektra, jsou: $f_1 = 440 \text{ Hz}$, $f_2 = 1320 \text{ Hz}$, $f_3 = 1750 \text{ Hz}$, $f_4 = 2200 \text{ Hz}$, $f_5 = 3070 \text{ Hz}$, $f_6 = 3500 \text{ Hz}$, $f_7 = 3950 \text{ Hz}$, $f_8 = 4380 \text{ Hz}$. Frekvence $f_1 = 440 \text{ Hz}$ je frekvence základní udávající výšku složeného tónu, která je u všech námi porovnávaných nástrojů stejná. Zbývající frekvence se nazývají vyšší harmonické a nesou informaci o barvě zvuku. Nebudeme vypisovat všechny frekvence, které můžeme na grafu vidět. Většina z nich má prakticky nulovou amplitudu a nemají pro nás smysl, charakterizují pouze šum. Můžeme si všimnout, že housle hrají na nejvyšších frekvencích mezi porovnávanými nástroji a na velmi podobných frekvencích jako viola (viz dále). Dále je zde patrné, že housle, oproti všem analyzovaným nástrojům, dosahují nejnižších amplitud neboli nejnižší hlasitosti. V porovnání s violou a violoncellem není rozdíl tak veliký, ale oproti kontrbasu a kytáře je rozdíl mnohem větší. Tento fakt mohl ovšem ovlivnit i způsob nahrávání

daného zvuku. Zajímavé také je, že základní frekvence nemá nejvyšší amplitudu, ačkoliv tón o frekvenci 440 Hz slyšíme jasně. To je dáno tím, jak tyto tóny vnímá lidské ucho. Ucho je schopno si tóny o výše uvedených frekvencích spojit dohromady a některé z nich potlačit a jiné naopak zesílit na úkor jiných. Subjektivně (tj. uchem) tedy vnímáme jiné frekvenční spektrum, než jaké spektrum bylo objektivně (tedy přístroji) naměřené. V případě některých hudebních nástrojů (tj. při určité kombinaci vyšších harmonických frekvencí) tyto rozdíly vznikají.

4. Závěr

Práci jsme si rozdělili na dvě části. Zpracování první části věnované teorii nebylo tak obtížné. Vzhledem k velkému množství informací na internetu, v encyklopediích, všem znalostem ze školy, se teoretická část práce poměrně dařila. Během psaní této části jsme využili znalostí z fyziky a zvukové techniky a nesetkali jsme se s velkým problémem. Teoretická část je, myslíme si, velmi dobře zpracovaná. Neměly by v ní chybět žádné zásadní informace. Je v ní vysvětleno vše, co potřebujeme znát k vytvoření této práce.

U druhé části nebyl průběh tak jednoduchý. Zprvu jsme museli pomocí záznamového zařízení Ediol kvalitně nahrát jednotlivé tóny hudebních nástrojů. Takže první problém byl, sehnat hudební nástroje a člověka, jenž by byl ochotný nám tóny nahrát, jelikož bychom to sami nezvládli. Nakonec se povedlo a tak jsme mohli pokračovat. K rozboru tónů bylo potřeba v Mathematice napsat jednoduchý program; zde jsme se museli obrátit na pomoc k našemu vedoucímu práce, který nám velice pomohl a my mohli konečně začít podrobně jednotlivé tóny analyzovat a porovnávat. Dále žádný problém nenastal a naši práci jsme dokončili.

Myslíme si, že se nám podařilo vytvořit kvalitní práci, která může posloužit všem zájemcům o dané téma. Ať už jako výuková práce pro studenty, nebo jen zájemcům z širokého spektra lidí, kteří si potřebují objasnit termíny a fakty z tohoto tématu. Doufáme, že naše práce bude sloužit jako motivace současným, ale i budoucím studentům.

Dalším logickým rozšířením této práce by bylo zahrnout do analýzy i další nejen strunné nástroje a směřovat k sestavení celé databáze frekvenčních spekter jednotlivých hudebních nástrojů. Ale to může být téma pro naše pokračovatele.