



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

Nástroj pro pořizování dat pro wave table syntézu

Wave Table Synthesis Data Acquisition Tool

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Sporka Adam Ph.D.

Aleksandr Kartavykh

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kartavykh** Jméno: **Aleksandr** Osobní číslo: **440932**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nástroj pro pořizování dat pro wave table syntézu

Název bakalářské práce anglicky:

Wave Table Synthesis Data Acquisition Tool

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s technikami wave table syntézy zvukových signálů v kontextu hudební produkce. Seznamte se s existujícími standardy a formáty pro ukládání dat pro wave table syntezátory (banky zvukových vzorků). Realizuje prostředí pro pořizování a testování multiparametrických zvukových bank (např. výška tónu, hlasitost, barva, apod.) Pořídte alespoň jednu banku zvukových vzorků a demonstруйте její použití uvnitř testovací aplikace a některém ze standardních prostředí pro přehrávání zvukových bank (např. Native Instruments Kontakt).

Seznam doporučené literatury:

Rick Snoman (2013) Dance Music Manual. ISBN 9780415825641

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Adam Sporka, Ph.D., Katedra počítačové grafiky a interakce

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Adam Sporka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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

Čestné prohlášení

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.

Dne 25.5.2018 v Praze

.....

Podpis studenta

Abstrakt

Tato práce se zabývá pořizováním dat pro wavetable syntézu. Je zde popsána základní problematika a aplikované principy. Práce zkoumá techniky digitální syntézy zvukových signálů v kontextu hudební produkce. Na základě výsledků byl vytvořen experimentální systém v prostředí Matlab pro pořizování a testování dat pro wavetable syntézu. Výstupem systému jsou vzorky hudebních tónů o různé výšce, barvě nebo délce. Výsledné zvukové vzorky byly použity v prostředí Native Instruments Kontakt pracujícím na principu wavetable syntézy pro tvorbu multiparametrické banky zvukových vzorků, která byla následně upravena a otestována.

Klíčová slova: wavetable syntéza, hudba, zvuková banka, Matlab, Native Instruments Kontakt

Abstract

This thesis focuses on data acquisition for wavetable synthesis. It describes basic problematics and applied principles. The thesis concentrates on techniques of digital synthesis of audio signals in the context of musical production. Based on the results, an experimental system was created in the Matlab environment for the acquisition and testing of data for wavetable synthesis. Output of this system are samples of musical tones of different pitch, timbre or length. The resulting sound samples were used in Native Instruments Contact environment which uses the wavetable synthesis principle to create a multiparametric sound bank that was subsequently modified and tested.

Key words: wavetable synthesis, music, sound bank, Matlab, Native Instruments Kontakt

Seznam obrázků

Obrázek č.1 Znázornění průběhu signálu a) vzorkovaného, b) kvantovaného, c) digitálního [3]...8	
Obrázek č.2 ADSR obálka signálu [17].....14	14
Obrázek č.3 Ukázka syntaxe v textovém souboru.....19	19
Obrázek č.4 Pracovní prostředí Native Instruments Kontakt.....21	21
Obrázek č.5 Mapování.....21	21

Seznam tabulek

Tabulka č.1 Ukázka oktavy a frekvencí jednotlivých tónů [22].....17	17
Tabulka č.2 Ukázka části alikvotních tónů a jejich frekvencí [23].....17	17
Tabulka č.3 Rozložení alikvotních tónů a jejich zisk pro tři varianty barvy tónu.....20	20

Seznam použitých zkrátek

DSP Digital Signal Processing

DFT Discrete Fourier Transform

FIR Finite Impulse Response

IIR Infinite Impulse Response

DAC Digital-to-Analog Converter

MIDI Musical Instrument Digital Interface

FM Frequency Modulation

ADSR Attack Decay Sustain Release

EG Envelope Generator

LFO Low Frequency Oscillator

Obsah

1.	Úvod.....	7
2.	Zpracování digitálního signálu.....	8
2.1.	Doménová charakteristika.....	8
2.2.	Digitální syntezátor.....	10
2.3.	Wavetable syntéza.....	12
2.3.1.	Historický vývoj.....	12
2.3.2.	Princip aplikace v digitálních syntezátorech.....	13
2.4.	Hudební tón.....	16
3.	Realizace systému pro pořízení dat pro wavetable syntézu.....	18
3.1.	Základní informace.....	18
3.2.	Pořízení vzorků pro wavetable syntézu.....	18
3.3.	Vytvoření banky zvukových vzorků.....	20
3.4.	Shrnutí.....	22
4.	Závěr.....	23
	Citovaná literatura.....	24
	Přílohy.....	26
	Příloha A.....	26
	Příloha B.....	26

1. Úvod

Ve dnešní době se počítačové technologie velmi prudce rozvíjí. To, co před třicetí léty bylo dostupné jenom jedincům, teď skoro každý má v ruce a díky tomu se objevuje obrovské množství možností ve všech sférách života. Člověk se snaží digitalizovat všechno co vidí, a v souvislosti s tím takové téma jako zpracování digitálního signálu (Digital Signal Processing, dále jen DSP) nabývá dnes obrovské popularity, vždyť každý mobil má fotoaparát a na každý tablet se dá nainstalovat hudební syntezátor. Ovšem malo kdo chce na tom ztrácet velký objem paměti, proto se objevují různé techniky, které by dokázaly jak minimalizovat objem obsazené paměti, tak i nabízet dobrou kvalitu zvuku a široké spektrum možností. Jednou z takových technik je wavetable (tabulka vlnových průběhů) syntéza zvuku.

Současně je to jedna z nejběžnějších technik zvukové syntézy, která dokáže s minimálním počtem zdrojů reprodukovat kvalitní a přirozený zvuk velmi podobný zvuku skutečného nástroje. Existuje velké množství hardware a software produktů pracujících na jejím principu jakožto digitální syntezátory, hudební moduly, generátory tónů, samplery apod. I když se první syntezátor, který použil wavetable syntézu jako primární typ syntézy, objevil již v sedmdesátých letech minulého století, toto téma je stále aktuální a dokonce je popoháněno celkovou rychlostí rozvoje dnešní technologické společnosti. A to je jeden z důvodů, proč vznikla tato práce.

Cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou zpracování digitálního signálu se zaměřením na wavetable syntézu zvukových signálů v kontextu hudební produkce, realizace experimentálního systému pro pořizování a testování multiparametrických zvukových bank pro wavetable syntézu a pořízení i demonstrace alespoň jedné zvukové banky.

Kapitola 2 začíná obecnou problematikou digitalizace analogových signálů, pak se zabývá principem práce digitálního syntezátoru, zejména používanými technikami syntézy zvuku, zaměřuje se na podrobnou analýzu wavetable syntézy a končí krátkou exkurzí do světa hudby pro lepší pochopení vytvořeného experimentálního systému. **Kapitola 3** popisuje praktickou část této práce, tedy především realizaci algoritmu v programovém prostředí Matlab a použití jeho výstupů, vzorků hudebních zvuků, v prostředí Native Instruments Kontakt.

2. Zpracování digitálního signálu

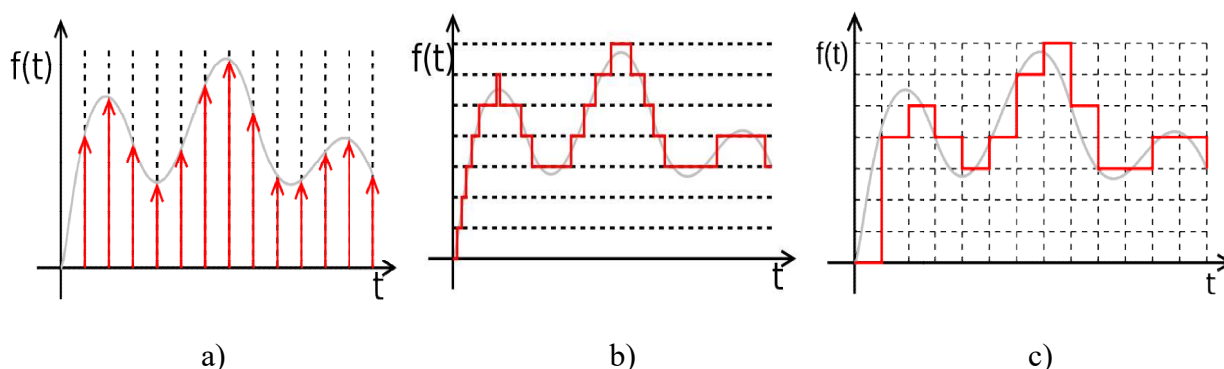
V této kapitole je probrána problematika zpracování digitálního signálu, počínaje základní obecnou informací o digitalizaci analogových signálů a končíc konkrétní informací použité v rámci zadání.

2.1. Doménová charakteristika

Digitální zpracování signálu (Digital Signal Processing, DSP) je použití digitálního zpracování, například pomocí počítačů nebo více specializovaných digitálních signálových procesorů, pro provádění širokého spektra operací zpracování signálu. Signály zpracované tímto způsobem jsou sekvence čísel, které reprezentují vzorky kontinuální proměnné v doméně jako je čas, prostor nebo frekvence.

Každý nepřetržitý (analogový) signál $s(t)$ lze digitalizovat v čase a kvantizovat podle úrovně (digitalizace), tj. převést na digitální podobu [1]. Podle Shannonova teorému [2], jestliže vzorkovací frekvence signálu f_s není menší než dvojnásobek nejvyšší frekvence v signálovém spektru, pak získaný diskrétní signál $s(k)$ je ekvivalentní signálu $s(t)$ v tom smyslu, že $s(t)$ může být přesně rekonstruován ze $s(k)$. Digitalizace obvykle probíhá ve dvou krocích:

- Diskretizace, tj. čtení analogového signálu a odběr okamžité hodnoty signálu v daném bodě v pravidelných časových intervalech (vzorkovací frekvence). Každé takové čtení se nazývá vzorek.
- Kvantizace, tj. zaokrouhlení vzorků na pevnou sadu čísel.



Obrázek č.1 Znárodnění průběhu signálu a) vzorkovaného, b) kvantovaného, c) digitálního.

Při DSP inženýři obvykle studují digitální signály v jedné z následujících domén: časová doména (jednorozměrné signály), prostorová doména (multidimenzionální signály) a frekvenční doména [1]. Volba domény, ve které je pak zpracováván signál, závisí na tom, která doména nejlépe reprezentuje základní charakteristiky signálu a zpracování, které má být použito. Sekvence vzorků z měřicího zařízení vytváří reprezentaci časové nebo prostorové domény (graf časové domény ukazuje, jak se signál mění s časem), zatímco například diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier Transform, DFT) poskytuje reprezentaci frekvenční domény (graf graf frekvenční domény ukazuje, jak velká část signálu leží v rámci daného frekvenčního pásma v daném rozsahu frekvencí) [1].

Nejčastějším přístupem zpracování v časové nebo prostorové doméně je úprava vstupního signálu metodou nazývanou filtrování [4]. Digitální filtrování se obvykle skládá z některé lineární transformace řady okolních vzorků kolem aktuálního vzorku vstupního nebo výstupního signálu. Vzhledem k tomu, že vzorky signálu přicházejí do filtru s konstantní rychlostí (vzorkovací frekvence), musí být filtr schopen zpracovat aktuální vzorek před příchodem dalších, tj. zpracování signálu probíhá v reálném čase [4]. Podle [4], [5] a [6] existují různé způsoby, jak charakterizovat filtry; například:

- Lineární filtr znamená lineární transformaci vstupních vzorků. Lineární filtry splňují princip superpozice, tj. jestliže vstupem je vážená lineární kombinace různých signálů, pak výstupem bude podobně vážená lineární kombinace odpovídajících výstupních signálů.
- Kauzální filtr používá pouze předchozí vzorky vstupních nebo výstupních signálů, zatímco nekauzální filtr používá budoucí vstupní vzorky. Nekauzální filtr může být obvykle změněn na kauzální přidáním zpoždění.
- Časově invariantní filtr má v průběhu času konstantní vlastnosti; jiné filtry, jako jsou například adaptivní filtry, se v čase mění.
- Stabilní filtr vytváří výstup, který s časem konverguje na konstantní hodnotu nebo zůstává v konečném intervalu omezen. Nestabilní filtr může produkovat výstup, který roste bez hranic, s ohraničeným nebo dokonce nulovým vstupem.
- Filtr s konečnou impulsní odezvou (FIR) používá pouze vstupní signály, zatímco filtr nekonečné impulsní odezvy (IIR) používá jak vstupní signál, tak i předchozí vzorky výstupního signálu. FIR filtry jsou vždy stabilní, zatímco filtry IIR mohou být nestabilní.

Filtr může být reprezentován blokovým schématem, které může být použito k odvození algoritmu pro zpracování vzorku a následnou hardwarovou implementaci filtru. Filtr může být také popsán jako diferenční rovnice, sbírka nul a pólů anebo impulsní odezva nebo kroková odezva.

Nejběžnějším účelem analýzy signálů ve frekvenční oblasti je analýza vlastností signálu. Inženýr může studovat spektrum pro určení toho, které frekvence jsou přítomné ve vstupním signálu a které chybí. Analýza kmitočtové oblasti se také nazývá spektrální analýza [7].

Ačkoli se pojem "frekvenční doména" používá v jednotném čísle, existuje řada různých matematických transformací, které se používají k analýze funkcí časové domény a jsou označovány jako metody "frekvenční domény". Podle [4], [5] a [6] se jedná o nejběžnější transformace a oblasti, ve kterých jsou používány:

- Fourierova řada - opakující se signály, oscilační systémy;
- Fourierova transformace - neopakovatelné signály, přechodné;
- Laplaceova transformace - elektronické obvody a řídicí systémy;
- Z - transformace - diskrétní signály, digitální zpracování signálu;
- Waveletová transformace - analýza obrazu, komprese dat.

Obecněji řečeno, můžeme mluvit o *transformační doméně* s ohledem na jakoukoli transformaci. Všechny výše uvedené transformace mohou být interpretovány jako zachycování nějaké formy frekvence a tudíž transformační doména je označována jako frekvenční doména.

Hlavními aplikacemi DSP jsou zpracování zvukových signálů, komprese zvuku, digitální zpracování obrazu, komprese videa, zpracování řeči, rozpoznávání řeči, digitální komunikace, digitální syntezátory, radar, sonar, zpracování finančních signálů, seismologie a biomedicíny [7].

V rámci dané práce je kladen důraz na aplikaci DSP u digitálních syntezátorů.

2.2. Digitální syntezátor

S ohledem na to, že existuje hodně zařízení pro syntézu zvuku, která mají svá vlastní jména (hudební moduly, generátory tónů, samplery atd.), základní principy jejich práce jsou stejné [8] a dále se jim bude říkat jen syntezátor.

Pro syntézu zvuku se používá jak fyzické zařízení (analogový syntezátor), tak i počítačové programy - virtuální zařízení. V prvním případě výsledkem je elektrický signál. Ve druhém případě výsledkem je průběh signálu prezentovaný v digitální podobě, který je potom přiveden na vstup DAC převodníku a následně transformován na elektrický signál. Přijatý signál může být zaznamenán nebo odeslán koncovému zařízení, například reproduktorům [8]. Některé digitální syntezátory napodobují analogové syntezátory; jiné zahrnují schopnost vzorkování jako dodatek k digitální syntéze [9].

Provoz většiny zařízení pro syntézu lze řídit jinými externími zařízení, například hudebními nástroji a sekvencery. Připojení těchto zařízení probíhá pomocí MIDI-rozhraní, které se stalo standardem a současně skoro nemá alternativu [10]. Některá zařízení tímhle způsobem však řídit nelze a proto slouží pouze k syntéze zvukových vzorků, které lze uložit a které lze použít v budoucnu. Když budeme považovat syntezátor za „černou skříňku“, pak jeho vstupem je MIDI-sekvence a výstupem je zvukový signál v digitální podobě. Zdrojem MIDI-sekvence mohou být MIDI-ovladače (například MIDI-klávesnice, MIDI-kytary nebo MIDI-flétny), sekvencery atd. Celkový vstupní datový tok může dosáhnout velkých hodnot, ale u digitálních syntezátorů žádné takové omezení neexistuje [8]. Dalším důležitým aspektem vstupní MIDI-sekvence je zpoždění mezi simultánními událostmi. Jeden typ zpoždění je spojen s diskretní povahou práce zdrojů MIDI-sekvencí a přenosovou rychlostí samotného MIDI, další zpoždění vznikají v opakovacích a směrovacích při přenosu MIDI-sekvence.

Syntezátor přijímá MIDI-zprávy na vstupu a generuje podle nich výstupní zvukový signál. Hlavní MIDI-zprávy jsou zprávy "zapnout notu" a "vypnout notu", které zapínají a vypínají zvuk určitého hudebního nástroje o dané výšce. Zbytek zpráv ovlivňuje parametry zvuku

Hlavním rysem, podle kterého se syntezátory liší, je typ použité syntézy. Možné typy syntézy jsou podle [8], [10], a [11]:

- Aditivní (Additive) - V této metodě je zvuk hudebního nástroje tvořen součtem několika sinusových kmitů s různými frekvencemi a amplitudami. Za tímto účelem se používá sada několika sinusových generátorů s nezávislým řízením, jejichž výstupní signály jsou sčítány tak, aby získaly výsledný signál. Tato metoda je

založena na principu vytváření zvuku ve varhanním stroji a umožňuje získat libovolný periodický zvuk. Změna nastavení jednoho z generátorů neovlivňuje zbytek zvukového spektra, ale pro zvuky složité struktury mohou být požadovány stovky generátorů, což se těžce dá realizovat.

- Subtraktivní (Subtractive) - Metoda je založena na generování zvukového signálu s bohatým spektrem, po němž následuje filtrace - zesílení některých komponent a oslabení ostatních - na tomto principu funguje lidský řečový aparát. Jako počáteční signály se zpravidla používají signály, které mají obdélníkový, pilový nebo trojúhelníkový průběh, a také různé typy šumu. Hlavním nástrojem syntézy v této metodě jsou řízené filtry: rezonanční (pásmový) s proměnnou polohou a šířkou pásma a dolní propust s proměnnou mezní frekvencí. Každý filtr také má regulovatelný činitel jakosti. Tato metoda má poměrně jednoduchou implementaci a poměrně širokou škálu syntetizovaných zvuků, ale, stejně jako u aditivní syntézy, pro syntézu zvuků se složitým spektrem je zapotřebí velké množství kontrolovaných filtrů.
- Frekvenční modulace (Frequency modulation, FM) - Tato metoda využívá frekvenční intermodulaci mezi několika sinusovými generátory. Každý z těchto generátorů má vlastní tvarovač amplitudové obálky a nazývá se operátor. Různé způsoby zapojení několika operátorů tak, aby signály z výstupů prvních řídily práci dalších, se nazývají algoritmy syntézy. Algoritmus může zahrnovat jeden nebo více operátorů zapojených v sérii, paralelně, sériově-paralelně, se zpětnou vazbou apod, což poskytuje skoro nekonečné množství možných zvuků. Praktické využití této metody je však obtížné vzhledem k tomu, že většina takto generovaných zvuků představuje hlučné oscilace a stačí jen lehce změnit nastavení jednoho z generátorů, aby se čistý tón přeměnil na šum. Na druhé straně tato metoda poskytuje skvělé příležitosti pro syntézu různých typů perkusivních zvuků a také různých zvukových efektů, které se nedá realizovat použitím jiné metody rozumné složitosti.
- Vzorková (Sample-based) - Tato metoda používá předem zaznamenané vzorky - zvukové signály, které jsou pak reprodukovány ve správný čas. Pro získání zvuků různé výšky z jednoho vzorku se používá metoda posunu kmitočtu: pro získání zvuku o výšce odlišné od původního o n -krát je nutné o n -krát změnit vzorkovací frekvenci. Pro zachování přirozeného zvuku jsou zvuky vzorkovány s určitým výškovým krokem a frekvenční posuv slouží k získání přechodných zvuků. U starších syntetizátorů vzorků byly zvuky doslova zaznamenány na magnetofon, v moderní době se používá digitální záznam zvuku. Metoda umožňuje získání libovolně přesné podobnosti zvuku skutečného nástroje, avšak pro to je zapotřebí velké množství paměti. Na druhou stranu zvuk zní přirozeně jenom s parametry, se kterými byl původně zaznamenan. Například po změně amplitudové obálky přirozenost drasticky klesá. Pro snížení požadovaného objemu paměti se používá smyčka (looping). V takovém případě je zaznamenan pouze krátký úsek zvuku nástroje - zpravidla střední fáze (sustain neboli úroveň udržování) s ustáleným zvukem, která se při přehrávání opakuje dokud je nota zapnutá, a po uvolnění se přehrává koncová fáze. V moderních syntezátorech na základě této metody může být reprodukovatelný zvuk podroben různým procesům - modulaci, filtrování, přidávání

nových harmonických, zvukových efektů, v důsledku čehož může zvuk získat nový tón, někdy zcela odlišný od původního zvuku.

- Pomocí tabulky vlnových průběhů (Wavetable) – Metoda, která využívá vlnové periodické průběhy (krátké fragmenty vzorku) uložené to tabulky v paměti syntezátoru v produkci hudebních tónů nebo not. Podstata wave table syntézy je probrána v kapitole 2.3.
- Fyzikálního modelování (physical modelling) - Skládá se z modelování fyzikálních procesů, které určují zvuk skutečného nástroje na základě jeho specifikovaných parametrů (například pro housle – druh dřeva, složení laku, geometrické rozměry, materiál strun a smyčce atd.). V souvislosti s extrémní složitostí přesného modelování dokonce i jednoduchých nástrojů a obrovského množství výpočtů se metoda postupně vyvíjela pomalu na úrovni studiových a experimentálních vzorků syntezátorů.

Základní jednotkou zvuku je hlas, což u sample-based a wave-table syntezátorů představuje vzorkovací kanál [12]. Obecně platí, že jeden nástroj může obsadit několik hlasů a počet obsazených hlasů se může během přehrávání měnit. Syntezátor dle příchozích MIDI-zpráv určuje, kterou notu zapnout nebo vypnout pomocí kterého nástroje. Kromě not a nástrojů, pomocí MIDI-zpráv se dá zadávat sadu dalších parametrů zvuku, například hlasitost, obálky, modulace, filtry, a navíc se také dá ovlivnit hlasy nástroje znějící v daný okamžik. Proto je práce syntezátoru omezena na analýzu vstupního MIDI-toku, v důsledku které jsou určeny hlasy, které by měly být v tuto chvíli aktivní. Tato část práce syntezátoru se nazývá algoritmus pro přidělování hlasů [12]. Jenom po určení hlasů a parametrů jejich zvuků jsou příslušné generátory zapnuty.

Počet hlasů v syntezátoru je omezen [8]. Především je to kvůli počtu dostupných generátorů, který je zpravidla omezen. Druhým důvodem je, že pokud je povolen neomezený počet hlasů, pak může amplituda výstupního signálu překročit maximální přípustnou hodnotu. V tomto případě bude nutné některé hlasy vypnout, aby nedošlo k překročení přípustné prahové hodnoty.

Vzhledem k tomu, že počet hlasů je omezen, je možná situace, když bude potřeba zapnout nové hlasy, ale všechny dostupné již budou obsazeny. V tomto případě jsou možné dvě strategie. Ta jednodušší strategie se spočívá v tom, že se nové hlasy neotevírají a zprávy, které o tom žádají, jsou ignorovány. Lepší volbou však je uvolnit obsazené hlasy podle určitého kritéria a přiřadit nové na jejich místo. Možná kritéria mohou být například "nejstarší" hlas nebo nejtišší hlas.

2.3. Wavetable syntéza

2.3.1. Historický vývoj

Nejdříve experimenty s digitální syntézou byly prováděny s počítači v rámci akademického výzkumu generování zvuku. V roce 1973 japonská společnost Yamaha licencovala algoritmy pro FM syntézu od Johna Chowninga, který experimentoval s ní na Stanfordské univerzitě od roku 1971. Inženýři Yamahy začali různými cestami přizpůsobovat Chowningův algoritmus pro použití v komerčním digitálním syntezátoru. Například řešili problém zkreslení, které se normálně vyskytovalo v analogových systémech během FM. V 70.

letech byla společnosti Yamaha udělena řada patentů pod dřívějším názvem firmy "Nippon Gakki Seizo Kabushiki Kaisha", které vyvíjely počátečnou práci Chowninga nad technologií FM syntézy. Společnost Yamaha postavila první prototyp digitálního syntezátoru v roce 1974 [8].

Časné obchodní digitální syntezátory používaly jednoduché hardwarově zapojené digitální obvody pro implementaci technik, jako je aditivní syntéza a FM syntéza. Jiné techniky, jako je wavetable syntéza, se staly možnými pouze s příchodem vysokorychlostní mikroprocesorové a digitální technologie zpracování signálu [8]. V současné době je to jeden z nejběžnějších typů syntézy, který umožňuje s velkou mírou přesnosti reprodukovat zvuk skutečných nástrojů.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, wavetable syntéza využívá vlnové průběhy (waveforms) v produkci hudebních tónů nebo not [8]. Tato technika byla vyvinutá společností Wolfgang Palm z Palm Products GmbH (PPG) koncem sedmdesátých let a publikována v roce 1979 a od té doby byla používána jako metoda primární syntézy v syntezátorech postavených společnostmi PPG a Waldorf Music a jako metoda pomocné syntézy u společností Ensoniq a Access. V současné době se používá v softwarových syntezátorech pro počítače a tablety, včetně aplikací nabízených PPG a Waldorfem [13]. Ovšem se udržování shody mezi koncepcemi a terminologiemi během rychlého vývoje technologie historicky nezdařilo. Podle [13]:

Pojem "waveform table" (nebo "wave shape table" jako ekvivalent) je často zkrácen na "wavetable" a jeho odvozený termín "wavetable oscillator" je téměř shodný s "table-lookup oscillator" (oscilátor s vyhledávací tabulkou). Z toho důvodu další odvozený pojem "wavetable syntéza" se zdá mírně matoucí. V přirozeném slovasmyslu je jeho původní význam v podstatě stejný jako "syntéza s vyhledávací tabulkou", tj. v obou případech se tím rozumí akce na tvaru vlny uložené v tabulce v paměti syntezátoru, například jak je vidět z práce o syntéze Karplus-Strong string (nejjednodušší třída algoritmu „wavetable-modifikace“ známá jako digitální waveguide syntéza). Potom v pozdních sedmdesátých letech Michael McNabb a Wolfgang Palm samostatně rozvíjeli multiple-wavetable rozšíření table-lookup syntézy, které se obvykle používalo na technologii PPG Wave a které bylo později označováno společností Horner, Beauchamp & Haken 1993 jako „multiple wavetable syntéza“. Současně na konci sedmdesátých let, po zavádění produktů Fairlight CMI a E-mu Emulator, se stala vlivná i syntéza založená na vzorcích s poměrně dlouhými vzorky (sample-based) namísto jednočinných vlnových průběhů (single-cycle waveform). Nakonec se v devadesátých letech 20. století na trhu objevilo několik produktů s obchodními názvy, které se podobaly „wavetable syntéze“ (například wavetable karty od Gravis Ultrasound, rozšiřující wavetable karty od Creative Wave Blaster a Microsoft GS Wavetable SW Synth), a tyhle zmatky dále ovlivnily několik průmyslových standardů (včetně standardů MPEG-4 Structured Audio a AC97).

2.3.2. Princip aplikace v digitálních syntezátorech

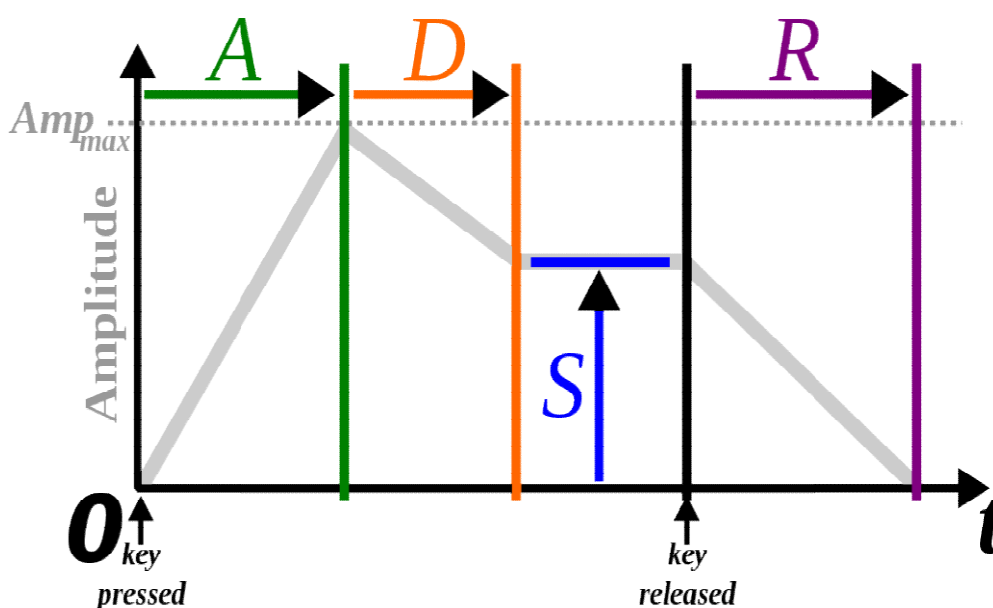
Podle [14], [15] a [16] prvním principem wavetable syntézy je funkčně uspořádaný mechanismus sekvenčního volání z matice a reprodukce různých vlnových průběhů. Druhou charakteristickou vlastností tohoto typu syntézy je dynamická variace reprodukováných vln. Spočívá v ovlivňování výsledné vlny následnými syntézními nástroji - například filtry, generátor obálek (Envelope Generator, EG), nízkofrekvenční oscilátory (Low Frequency Oscillator, LFO),

různé modulační nástroje, dynamické zpracování a efektové procesory. Všechny tyto změny lze provést pomocí matematických funkcí, které popisují stupeň vlivu parametru na vygenerovaný signál v jednotlivých okamžicích.

Je třeba rozlišovat pojem „waveform“ od běžného pojmu „vzorek“ [14]. V tomto kontextu waveform je malý fragment (perioda) vzorku, určitý základní prvek schopný zachovat spektrální charakteristiky zvuku. Je důležité si uvědomit, že waveform není pouze abstraktní matematickou funkcí, je to informace o spektrálně-harmonickém složení zvuku, která určuje její základní barevné charakteristiky.

Fragmenty jsou vybírány ze čtyř fází průběhu signálu [17]:

- Doba útoku (Attack time) je čas potřebný k počátečnímu spuštění úrovně od nuly ke špičce, počínaje prvním stisknutím tlačítka.
- Doba rozpadu (Decay time) je čas potřebný pro následný pokles z úrovně útoku na označenou úroveň udržení.
- Úroveň udržování (Sustain level) je úroveň během hlavní sekvence trvání zvuku, dokud není uvolněn klíč.
- Doba uvolnění (Release time) je čas potřebný k tomu, aby hladina klesla z úrovně udržování na nulu po uvolnění tlačítka.



Obrázek č.2 ADSR obálka signálu

Wavetable syntéza obvykle funguje s fragmentem vzorku nazývaným „sustain“, ale tabulka určitě může obsahovat další fragmenty vzorků. Jeden z „klasických“ průběhů známých z analogové syntézy také může být použit jako fragment: sinusová vlna, pilová vlna, trojúhelníková vlna anebo obdélníková vlna [15].

Podle [14], [15] a [16] při wavetable syntéze, nástroj, který v obecném případě nemusí být nutně hudební nástroj v běžném slovasmyslu, je reprezentován objektem s nějakou sadou vlastností. Specifické reprezentace nástroje závisí na realizaci wavetable syntézy. V obecném

případě se každý nástroj skládá ze skupiny fragmentů vzorků, z nichž každý má vlastní sadu vlastností. Jeden a ten samý fragment může být použit v několika různých nástrojích. Taková reprezentace nástroje má několik aspektů.

V nejjednodušším případě se nástroj skládá z jednoho fragmentu, který začíná znít, když je nota zapnutá a zní až do konce. Taková realizace neumožňuje zohlednit okamžik uvolnění noty, proto se v praxi používají složitější metody. Například je možné použít dva fragmenty - první se zapne po zapnutí noty, druhý, který reprezentuje fázi Release, se zapne při uvolnění noty, přičemž první fragment se v tento okamžik vypíná. Dalším běžným způsobem, jak zohlednit uvolnění noty, je představit fragment ve formě počáteční Attack/Decay a smyčkové fáze Sustain; v okamžiku uvolnění noty smyčka je stále aktivní, ale její úroveň hlasitosti se snižuje, stejně jako ve fázi Release. Chceme-li, aby byl nástroj co nejvíc podoben skutečnému, je zapotřebí ještě složitější konstrukce.

Podle [12] a [18] přirozenost zvuku syntezátorů závisí hlavně na dvou faktorech: podobnost zabarvení (spektrální charakteristiky zvuku) a podobnost dynamických vlastností (například štípnutí kytarových nebo harfových strun). Psychoakustický výzkum z [8] ukazuje, že i dokonale digitalizovány nástroj bez svých přirozených dynamických vlastností zní nepřírozně, zatímco špatná digitalizace nebo dokonce imitace zabarvení, která ale má charakteristické rysy hraní na tomto nástroji, je vnímána sluchem jako mnohem přirozenější. Ve většině případů, nejvíce informace o povaze zvuku je založeno ve fázi Attack, kde se nejvíc projevuje uplatněný způsob hraní. Když se provádí úplná digitalizace nástroje, výsledný zvuk již zahrnuje způsob hraní použitý během nahrávání. V tomto případě jednotlivé MIDI-noty zní zcela přirozně, ovšem zvuk už navždy bude mít charakter zaznamenaného nástroje a těžce se dá ho měnit.

Pro zohlednění dynamických vlastností se používají dvě hlavní metody [8]:

V první metodě nástroj je reprezentován minimálním počtem fragmentů vzorku, občas se nahrává jenom Sustain fáze, a pro zohlednění dynamických vlastností se během přehrávání mění odpovídající parametry fragmentů. Mezi nejběžnější parametry patří amplitudová a frekvenční obálka, amplitudová a frekvenční modulace a filtry (pásmové, dolní a horní propust). Například pro simulaci strunného nástroje se synchronně s počátkem fáze Attack vkládá krátké rychle klesající navýšení výšky tónu, které simuluje vyšší tón struny v okamžiku štípnutí; pro simulaci dechových nástrojů, s ohledem na končící se v plicích vzduch, hlasitost zvuku se postupně snižuje apod. Mohou být také vypočítány parametry, jako je amplituda výkyvu před nárazem na strunu, objem vzduchu v plicích, rychlost pohybu smyčce v okamžiku dotyku strun, atd. Většina MIDI-partitur s řádně provedenými imitacemi dynamických vlastností subjektivně zní dokonce přirozenější na syntezátorech střední třídy než "čisté" MIDI-partitury na komplexních profesionálních zařízeních.

Druhá metoda, která umožňuje zohlednit dynamické vlastnosti, je náročnější na práci a na zdroje. V tomto případě je nástroj nahráván se všemi možnými kombinacemi dynamických vlastností. Samozřejmě, že vzít v úvahu všechny kombinace není možné, proto se volí nějaká optimální sada kombinací s ohledem na paměťové omezení. Při použití této metody, původní zvuk je obvykle rozdělen do několika vzorků, a jejich volba závisí na zvoleném režimu přehrávání, přičemž vzorek lze měnit i během přehrávání v případě, když uživatel takhle učiní. U druhé metody se dá hodně ušetřit na paměti, protože některé části různých vzorků se mohou

shodovat nebo se jen mírně lišit, například se to často stává pro Sustain fázi zvuku nástroje. Je také možné kombinovat dvě metody, pokud máme množinu zvuků jednoho nástroje, na níž se aplikují dodatečné zvukové parametry. Ovšem velké potíže zde vyvolává přechod od jednoho vzorku k jinému, protože je nutné, aby byl zajištěn hladký a plynulý přechod, což je velmi důležitým prvkem wavetable syntézy. Je zřejmé, že když je doba trvání jednotlivého vlnového průběhu ve zvukové struktuře definována parametrem času, pak uvolnění noty nemusí vždy být ve fázi s okamžikem, ve kterém je amplituda signálu nulová. Nejčastěji jsou tabulky vlnových průběhů uspořádány tak, že každý průběh začíná a končí nulou. V jakémkoli jiném bodě odlišným od nuly, prudké přerušování průběhu povede ke vzniku nežádoucích artefaktů - nepříjemných pro sluch kliknutí a šumů. Řešení problému eliminace těchto prvků je realizováno ve wavetable syntezátorech různými způsoby:

- Nejjednodušší z nich je lineární crossfade, ve kterém první průběh dostává příkaz hladkého útlumu a druhý naopak příkaz hladkého nárůstu, přičemž útlum prvního a nárůst druhého se vyskytuje ve stejném časovém intervalu, což poskytuje nenápadný dynamický přechod.
- Dva další způsoby - truncate (zkrácení) a rounding (zaokrouhlení) jsou manipulace na úrovni funkce, tj. korekce dat na základě zadaných parametrů. Truncate zahrnuje jednoduché vyřazování necelého průběhu (to znamená průběh, který neodpovídá stanovenému časovému rámci), například, když vlnový průběh trvá 1,68 sekund a doba periody je 0,1 sekundy, pak do potřebného časového rámci vejde 16 period, a ta poslední neúplná perioda je odříznuta. Na rozdíl od truncate rounding má více „humanní“ přístup, při kterém se místo odříznutí uskutečňuje zaokrouhlení na celočíselnou hodnotu. Tj. ve výše uvedeném případě v důsledku roundingu se reprodukuje 17 period, a v případě, kdyby vlnový průběh trval například 1,63 sekundy, počet period by byl 16.
- A poslední způsob, nejsložitější a technologičtější, se nazývá interpolace nebo matematická aproximace. Pomocí tohoto způsobu se na spojení průběhů objevuje nová přechodná forma, která je výsledkem zprůměrování funkcí dvou sousedních průběhů v rámci části periody vyskytující se v době přechodu. Interpolace může být provedena jak lineárně, tak i složitějšími algoritmy. V důsledku použití interpolace signál obdrží plynulejší a harmoničtější přechod z jednoho průběhu na jiný. Lineární interpolace je docela podobná způsobu s crossfadem.

Použití wavetable syntézy mimo jiné má takový aspekt, jako je možnost multi-mikrofonního záznamu [14]. Tato funkce se často používá, například, když se provádí stereofonní záznam zvuku nástroje nebo když zvuky různých částí téhož nástroje jsou zaznamenány zvlášť (zvuk mechanismu nástroje a zvuk oscilace strun apod.). Přičemž je možné měnit amplitudu jednotlivých komponent, aby byl dosažen přirozenější zvuk.

2.4. Hudební tón

Tradičně v západní hudbě hudební tón je stabilním periodickým zvukem [19]. Noty používané v hudbě mohou být složitější než hudební tóny, jelikož mohou zahrnovat aperiodické aspekty, jako jsou např. vibrato a obálková modulace. Jednoduchý tón nebo čistý tón má

sinusový průběh. Komplexní tón je kombinace dvou nebo více čistých tónů, které se periodicky opakují, pokud není uvedeno jinak.

Hudební tón lze charakterizovat následujícími parametry [20]:

- Výška tónu - vlastnost zvuku, která se určuje lidským uchem a závisí hlavně na frekvenci zvuku, tedy na počtu vibrací média (obvykle vzduchu) za sekundu, které ovlivňují lidské bubienko. S rostoucí frekvencí roste také výška tónu.
- Délka tónu - určitý časový interval: jak dlouho nebo krátce trvá zvuk. Nota může trvat méně než sekundu, zatímco symfonie může trvat déle než hodinu. Jeden ze základních rysů rytmu.
- Dynamika - variace hlasitosti mezi notami. Dynamika je indikována specifickou hudební notací. Značení dynamiky je vždycky relativní a stále vyžaduje interpretaci v závislosti na hudebním kontextu.
- Barva tónu - vnímána kvalita zvuku hudebního tónu. Barva tónu umožňuje posluchačům rozlišovat různé typy zvukové produkce, například hudební nástroje, jako jsou strunné nástroje, dechové nástroje a perkusní nástroje anebo různé nástroje ve stejné kategorii, i kdyby poslouchali tóny stejné výšky.

S pojmem hudební tón těsně souvisí pojmy oktáva a alikvotní tón [20]:

- Oktáva je hudební interval, ve kterém poměr frekvencí mezi prvním a posledním tónem je jedna ku dvěma (to znamená, že frekvence nejnižšího tónu je dvakrát menší než frekvence nejvyššího). Subjektivně je oktáva vnímána jako stabilní, základní hudební interval. Dva tóny vzájemně vzdálené o oktávu jsou vnímány jako velmi podobné, i když se zřetelně liší ve výšce (viz Tabulka č.1). Nejmenší krok v oktávě je půltón s výjimkou přechodu mezi notami B a C, E a F, kde vzdálenost mezi nimi tvoří celý tón.
- Alikvotní tóny jsou zvuky, které jsou součástí spektra hudebního tónu. Přítomnost alikvotních tónů je zapříčiněna kmitáním tělesa, které produkuje zvuk (struna, hlasivky, atd ...), alikvotní frekvence odpovídají frekvencím kmitání částí tělesa. Alikvotní tóny mohou být harmonické a neharmonické. Frekvence harmonických alikvotních tónů jsou celočíselným násobkem základní frekvence, tj. jsou větší o 2, 3, 4, 5, atd.

Tón	A3	A#3/B b 3	B3	C3	C#3/D b 3	D3	D#3/E b 3
f [Hz]	440	466,164	493,883	523,251	554,365	587,33	622,254
Tón	E3	F3	F#3/G b 3	G3	G#3/A b 3	A4	A#4/B b 4
f [Hz]	659,255	698,456	739,989	783,991	830,609	880	932,328

Tabulka č.1 Ukázka oktavy a frekvencí jednotlivých tónů

Al. tóny	C	c	g	c1	e1	g1	h b 1
f [Hz]	65.4064	130.813	196.219	261.626	327.032	392.438	457.845

Tabulka č.2 Ukázka části alikvotních tónů a jejich frekvencí

3. Realizace systému pro pořízení dat pro wavetable syntézu

Tahle kapitola začíná krátkou praktickou informací potřebnou pro realizaci cílu dané práce, pokračuje postupným popisem realizace samotné a končí shrnutím výsledků.

3.1. Základní informace

Jako prostředí pro realizaci systému pro pořízení dat byl zvolen Matlab (verze R2018a), zejména díky širokému spektru možností DSP. Systém byl od začátku orientován na další práci s aplikací Native Instruments Kontakt (verze 5.3.137), která je softwarovým samplerem pro programování vlastních virtuálních nástrojů [21].

Problém byl rozdělen na dvě části. V první části bude postupně popsán proces zpracování dat (pořízení zvukových vzorků s různými vlastnostmi) v realizovaném systému. Druhá část ukáže použití vygenerovaných zvukových vzorků k vytvoření banky zvukových vzorků, která je kompatibilní s Native Instruments Kontakt a která je připravena k wavetable syntéze.

3.2. Pořízení vzorků pro wavetable syntézu

Vypracovaný systém se primárně řídí informacemi z textového souboru formátu .txt, sekundárně při zadání vstupních parametrů před spuštěním.

Textový soubor

Idea předběžného zápisu not a jejich délek do textového souboru byla inspirována nahrávkami zakódovanými do MIDI-souboru. V podstatě v rámci daného systému textový soubor představuje zjednodušenou verzi takového MIDI přístupu k přehrávání nahrávek.

Textový dokument je tvořen především elementem (nota, délka). Tyto elementy jsou potom odděleny řádkem (časově následující) a dvojitým lomítkem „//“ se označuje konec noty. Písmena „a“ až „g“ odpovídají notám, písmeno „x“ značí pauzu, oktava se mění přidáním k písmenu odpovídajícího čísla (rozsah not je c1 až c6). Další možné operace jsou: +/- 1 je zvyšování či snižování o půltón, +/-O je posuv o oktavu nahoru/dolu, -B je posuv pro basový klíč. Délka not je oddělena mezerou a je uváděna jako převrácená hodnota délky noty , tj. 2 je $\frac{1}{2}$, 4 je $\frac{1}{4}$ atd.

Systém je schopen generovat i akordy. Dělá se to zápisem not do jednoho řádku. Pro lepší přehlednost se dá použít posloupnost znaků jako „****“ anebo „----“ pro další oddělení not (např. jako konec taktu nebo konec řádku v notovém zápisu). Ovšem tahle schopnost je ryze ukázková, proto akordy jsou povoleny jenom v režimu poslechu.

```

*****
x      16 // x  16 // x  16 // x  16 // x  16 //
d2     8 // g  2 // e-1 2 // c  2 // x  1 //
c2     8 //
e2-1   8 //
d2     8 // a-1 2 // f  2 // c  2 //
c2     8 //
a-1    8 //
f      8 //
-----
g      2 // f  2 // h-o 2 // g-o 2 // x  1 //
x      8 // x  2 // x  2 // x  2 //
g      8 //
c2     8 //
e2-1   8 //
-----
d2     8 // e  2 // e2-B 2 // a-B 2 // x  1 //
c2     8 //
e2-1   8 //
d2     8 // f  2 // f2-B 2 // a-B 2 //
c2     8 //
a-1    8 //
h-1    8 //
-----
x      8 // x      8 // g  1.6 // a-B 1 // x  2 //
e      8 // e2-B   8 //
d      8 // d2-B   8 //
e      8 // e2-B   8 //
x      8 // c2-1-B 2 // x 9999 // x 9999 // c  2 //
g      8 // x      9999 // x 2.6666 //
c2     8 //
e2-1   8 //
-----
d2     8 // a-o-B 8 // e  2 // x  1 // x  1 //
c2     8 // e-B   8 //
e2-1   8 // a-B   4 //
c2     8 //
d2     8 // c-B   8 // g  4 //
c2     8 // h-B   8 //
g      8 // c2-B  4 // c  4 //
g-1    8 //
-----

```

Obrázek č.3 Ukázka syntaxe v textovém souboru

Vstupní parametry

Před spuštěním systému se dá nastavit následující parametry:

- document – Parametr pro volbu textového souboru. Tímhle způsobem je určen zdroj not pro syntézu vzorků.
- akce – Parametr pro změnu pracovního režimu programu. Režimy jsou dva: poslech a uložení. V režimu uložení systém uloží každou jednotlivou notu z textového souboru do zvláštního vzorku.
- barva – Parametr pro změnu barvy tónu. Umožňuje generovat teplejší a studenější tóny ve vztahu k původnímu tónu.
- tempo – Parametr pro změnu délky tónu.

Proces generování tónů

Skript *Start.m* na základě zvolených vstupních parametrů volá funkcí *hlavni.m*, ve které probíhá načtení not a odpovídajících délek ze souboru a umístění těchto hodnot do matic. Dále se volá funkce *ton.m*, jež předává matice hodnot dál do funkce *synteza.m* a *obalka.m*. Ve funkci *synteza.m* se postupně generuje hlavní ton a jeho alikvotní tóny (když je třeba, mění se zisk alikvotních tónů pro změnu barvy tónu), a pomocí aditivní syntézy jsou sloučeny do jednoho tónu. Tento tón dále prochází funkcí *obalka.m*, kde se pronásobí s ADSR obálkou. Potom funkce *ton.m* v závislosti na zvoleném režimu ukládá tóny ve formátu .wav a pak odesílá připravené tóny zpátky do funkce *hlavni.m*, kde probíhá finální rozřazení a poslech v závislosti na zvoleném

režimu. Funkce *vlastnosti.m* slouží k grafickému zobrazení vlastností vzorků a může být spouštěna ze skriptu *Start.m* po syntéze vzorku.

Zisk a rozložení alikvotních tónů a také průběh ADSR obálky byly inspirovány [24] a [25], obálka však byla potom ručně rozšířena a upravena za účelem zlepšení kvality zvuku.

Výška tónu se počítá podle vzorce:

$$f_x = f_A * 2^{(d/12)} \quad (1)$$

kde f_x je výška hledaného tónu, f_A je výška tónu A třetí oktavy o frekvenci 440 Hz, a d je vzájemná vzdálenost hledaného tónu a tónu A v půltonech.

Barvou výsledného tónu se dá manipulovat pomocí změny zisku jeho alikvotních tónů [20]. Z tabulky č.3 je vidět, že alikvotní tóny teplejších tónů mají větší zisk než studenější tóny. (viz. Příloha B pro grafické znázornění průběhů)

Al. Tóny [půltóny]	0	7	12	16	19	24
Zisk [dB]	-8	-16	-20	-900	-75	-36
Zisk t. [dB]	-1	-2	-2,5	-112,5	-9,375	-4,5
Zisk s. [dB]	-16	-32	-40	-1800	-150	-72

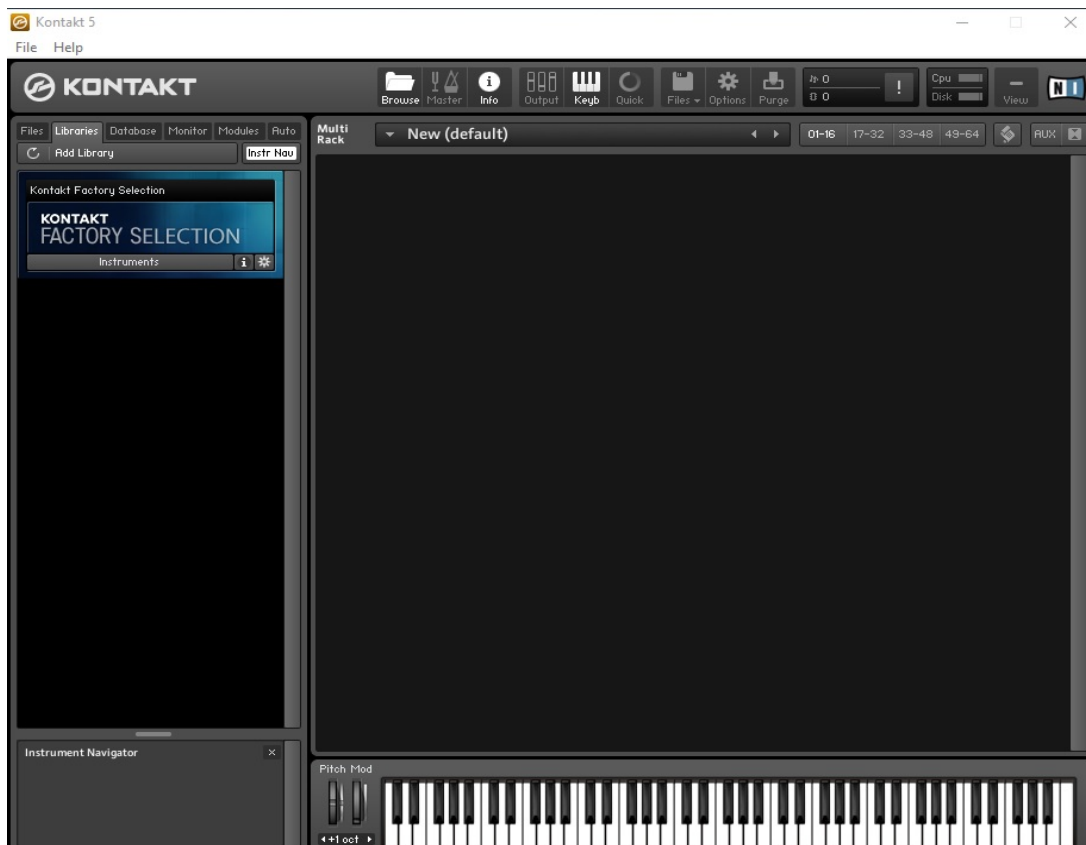
Tabulka č.3 Rozložení alikvotních tónů a jejich zisk pro tři varianty barvy tónu

Celkem pro zvukovou banku bylo pořízeno 37 vzorků formátu .wav, tj. 4 oktavy v rozsahu C1 až C4.

3.3. Vytvoření banky zvukových vzorků

Pro vytvoření vlastní zvukové banky (virtuálního instrumentu) pro další práci v Native Instruments Kontakt, je třeba mít vzorky ve formátu .wav [26]. Tento proces se skládá ze tří kroků:

- I. Nahrávání vzorků do prostředí Native Instruments Kontakt - to se dělá buď pomocí tlačítka „Browse“ nahoře uprostřed anebo jednoduchým přemístěním vzorků do pracovního prostředí pomocí myši. Objeví se nový virtuální instrument.
- II. Mapování (Mapping) – tento proces spočívá v tom, že je třeba přiřadit každý vzorek na odpovídající místo. Ve výchozím stavu budou všechny vzorky roztáhány, aby zaplnily celé pracovní prostředí, a seřazeny podle abecedy. Stiskem tlačítka s maticovým klíčem se otevře menu nastavení, kde hned pod instrumentem uprostřed se nachází tlačítko „Mapping“.
- III. Uložení jako instrument ve formátu .nki.



Obrázek č.4 Pracovní prostředí Native Instruments Kontakt



Obrázek č.5 Mapování

Native Instruments Kontakt pracuje na principu wavetable syntézy a automaticky extrahuje potřebná data z poskytnutých vzorků. Banka zvukových vzorků je připravena k použití.

3.4. Shrnutí

V prostředí Matlab byl vypracován systém pro pořizování a testování zvukových vzorků. Realizovaný systém je schopen vygenerovat vzorky zvukových tónů o různé výšce, barvě nebo délce v rozsahu šesti oktáv a je také schopen přehrát, uložit a poskytnout vizuální informaci o výsledných tónech. Dokáže přehrát nejen jednotlivé noty, ale také i akordy. Vygenerované vzorky pak byly použity v prostředí Native Instruments Kontakt pro vytvoření banky zvukových vzorků, která byla v tomtéž prostředí následně upravena a otestována.

4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení s problematikou zpracování digitálního signálu se zaměřením na wavetable syntézu zvukových signálů v kontextu hudební produkce, realizace experimentálního systému pro pořizování a testování multiparametrických zvukových bank pro wavetable syntézu a pořízení i demonstrace alespoň jedné zvukové banky. Implementoval jsem algoritmus v programovém prostředí Matlab, jehož princip spočívá v generování zvukových vzorků na základě příkazů v textovém dokumentu a zadání parametrů před spuštěním.

Jako standardní prostředí pro přehrávání zvukových bank jsem zvolil Native Instruments Kontakt z těch důvodů, že je jednoduchý z hlediska používání (user friendly) a že jsem už měl zkušenosti jeho použití.

Nejprve byla probána základní problematika DSP, princip digitálních syntezátorů a jejich typy. Dále byla prostudována otázka wavetable syntézy a její implementace v digitálních syntezátorech. Nakonec trocha času byla věnována hudební teorii jakožto hudební tón, oktáva a alikvotní tóny. Při realizaci experimentálního systému v Matlabu jsem se inspiroval strukturou nahrávek zakódovaných do MIDI-souborů, protože takový přístup zaručuje jistotu, že se na výstupu systému neobjeví nic, co by tam nebylo očekáváno. Vygeneroval jsem celkem 37 vzorků o různé výšce tónu, které jsem následně použil v Native Instrument Kontakt. Výsledná zvuková banka byla upravena, otestována a připravena k dalšímu použití.

Problém se však objevil v okamžik, když se zjistilo, že zvuková banka již uložená pomocí prostředí Native Instrument Kontakt není kompatibilní s Matlabem. Jakmile jsou zvukové vzorky takovým způsobem uloženy, je možné je měnit jenom prostřednictvím Native Instruments Kontakt. Proto jsem rozšířil implementovaný v Matlabu systém o změnu barevné charakteristiky zvuku, abych zlepšil jeho demonstrační schopnosti. Možným vylepšením implementovaného systému by byla zkouška jiných kombinací rozložení alikvotních tónů a jejich zisku pro zlepšení kvality zvuku, protože na velmi nízkých a velmi vysokých frekvencích výsledné tóny znějí velmi nepřírozně.

Stanoveného cíle však, tedy implementací nástroje pro pořizování dat pro wavetable syntézu a pořízení i demonstrace alespoň jedné banky zvukových vzorků, bylo dosaženo.

Citovaná literatura

- [1] АРБУЗОВ, С. М., ГУК, И., СОЛОВЬЕВА, И., СОЛОНИНА, А. И., УЛАХОВИЧ, Д. А. “Основы цифровой обработки сигналов. Курс лекций.” *БХВ-Петербург, ISBN 5-94157-388-X*, 2003.
- [2] Wikipedia, „Shannonův teorém“, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Shannonův_theorem
- [3] Wikipedia, „Diskrétní signál“, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Diskrétní_signál
- [4] KUO, Sen M., LEE, Bob H., and TIAN, Wenshun. “Real-Time Digital Signal Processing : Fundamentals, Implementations and Applications.” *John Wiley & Sons, Incorporated, ISBN 1-118-41432-2*, 2013.
- [5] PARK, Tae Hong. “Introduction to Digital Signal Processing : Computer Musically Speaking.” *World Scientific Publishing Co Pte Ltd, ISBN 981-279-027-6*, 2009.
- [6] LEIS, John W. “Digital Signal Processing Using MATLAB for Students and Researchers.” *Wiley, ISBN 0-470-88091-0*, 2011.
- [7] Wikipedia, „Digital signal processing“, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal_processing
- [8] ОГОРОДНИКОВ, А. Н. “Разработка программного таблично-волнового синтезатора музыкальных звуков для WINDOWS 9x.”, *Diplomová práce, Томский государственный университет*, 1999. [online], dostupné z: http://csd.tsu.ru/sites/default/files/Хранилище/people/выпускники/1999/Diplom_ogorodnikov.pdf
- [9] Wikipedia, „Digital synthesizer“, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal_processing
- [10] HOLMES, Thom. “Early Computer Music. Electronic and experimental music: technology, music, and culture (3rd ed.)” *Taylor & Francis, ISBN 0-415-95781-8*, 2008.
- [11] VAIL, Mark. “The Synthesizer: A Comprehensive Guide to Understanding, Programming, Playing, and Recording the Ultimate Electronic Music Instrument.” *Oxford University Press, ISBN 978-0-19-539489-4*, 2014.
- [12] ЛИХНИЦКИЙ, А. „Качество звучания. Новый подход к тестированию аудио-аппаратуры.”, [cit. 23.5.2015], [online], dostupné z: <http://www.backtomusic.ru/person/aml-book>

- [13] Wikipedia, „Wavetable synthesis“, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wavetable_synthesis
- [14] SynthMusic – Студия звукозаписи, “Таблично-волновой синтез”, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: <http://synthmusic.ru/articles/synthesistypes/wavetable>
- [15] Shulich School of Music, “Wavetable Synthesis”, [cit. 23.05.2018], [online], dostupné z: <https://www.music.mcgill.ca/~gary/307/week4/wavetables.html>
- [16] NELSON, Jon C. “The Csound book.” *Cambridge, MIT Press, ISBN 0-262-52261-6*, 2000.
- [17] Wikipedia, „Synthesizer“, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Synthesizer>
- [18] PINCH, Trevor; TROCCO, Frank. “Analog Days: The Invention and Impact of the Moog Synthesizer.” *Harvard University Press. ISBN 978-0-674-01617-0*, 2004.
- [19] Wikipedia, „Musical tone“, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_tone
- [20] SNOMAN, Rick. “Dance Music Manual.” *Focal Press, ISBN 9780415825641*, 2013.
- [21] Wikipedia, „Native instruments“, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Native_Instruments
- [22] Wikipedia, „Частоты настройки фортепиано“, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: https://ru.wikipedia.org/wiki/Частоты_настройки_фортепиано
- [23] Wikipedia, „Обертон“, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Обертон>
- [24] WRIGHT, B., SUKITTANON, S. "Integer-based wavetable synthesis for low-computational embedded systems," *Proceedings of IEEE Southeastcon*, 2013
- [25] MAO, C., GUAN, Y., LIU, Y. „Research and Design of Digital Synthesizer Based on MATLAB”, *L. Kang et al. (Eds.): ISICA, LNCS 5370*, pp. 849–857, 2008.
- [26] Native Instruments – Software And Hardware For Music Production And Djing, „KONTAKT 5 Manual”, [cit. 24.05.2018], [online], dostupné z: https://www.native-instruments.com/fileadmin/ni_media/downloads/manuals/KONTAKT_5_6_8_Manual_English.pdf

Přílohy

Příloha A (CD)

Příloha B (dodatečné grafy)

Příloha A

Přiložené CD obsahuje 4 adresáře:

- Banka zvukových vzorků
- Matlab
- Použité vzorky
- Textové soubory

Ve složce **Banka zvukových vzorků** je vypracovaná banka zvukových vzorků.

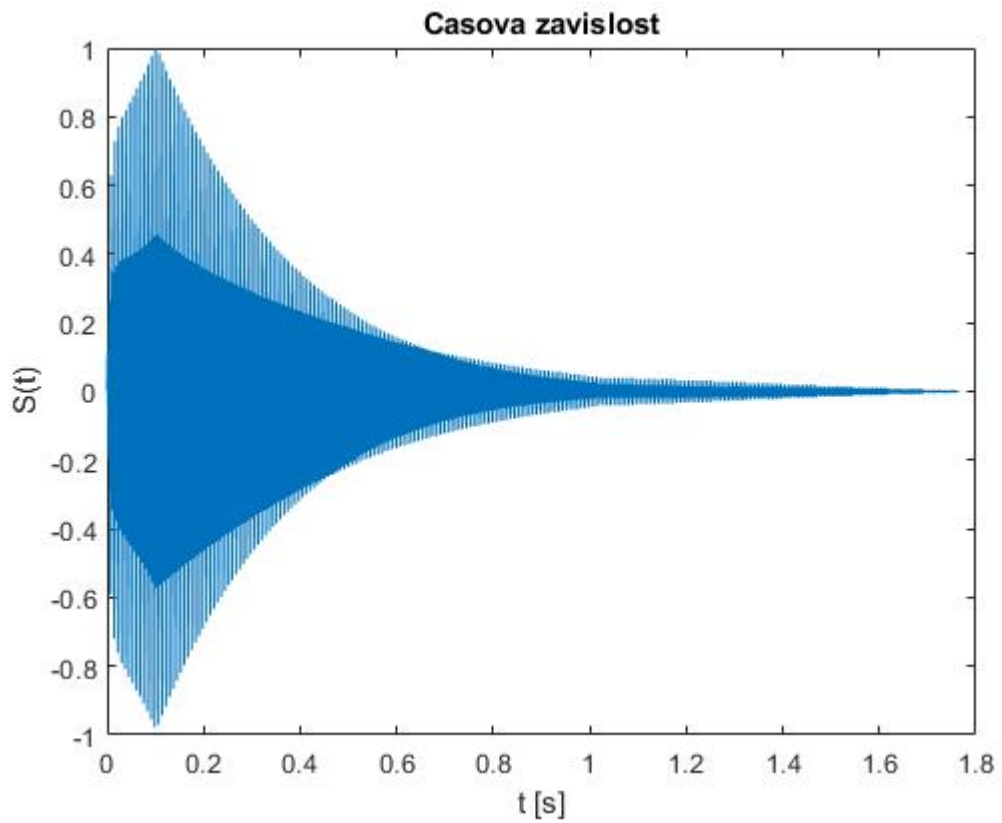
Složka **Matlab** obsahuje všechny vytvořené funkce a skripty.

Ve složce **Použité vzorky** jsou uloženy vzorky použité pro tvorbu banky zvukových vzorků.

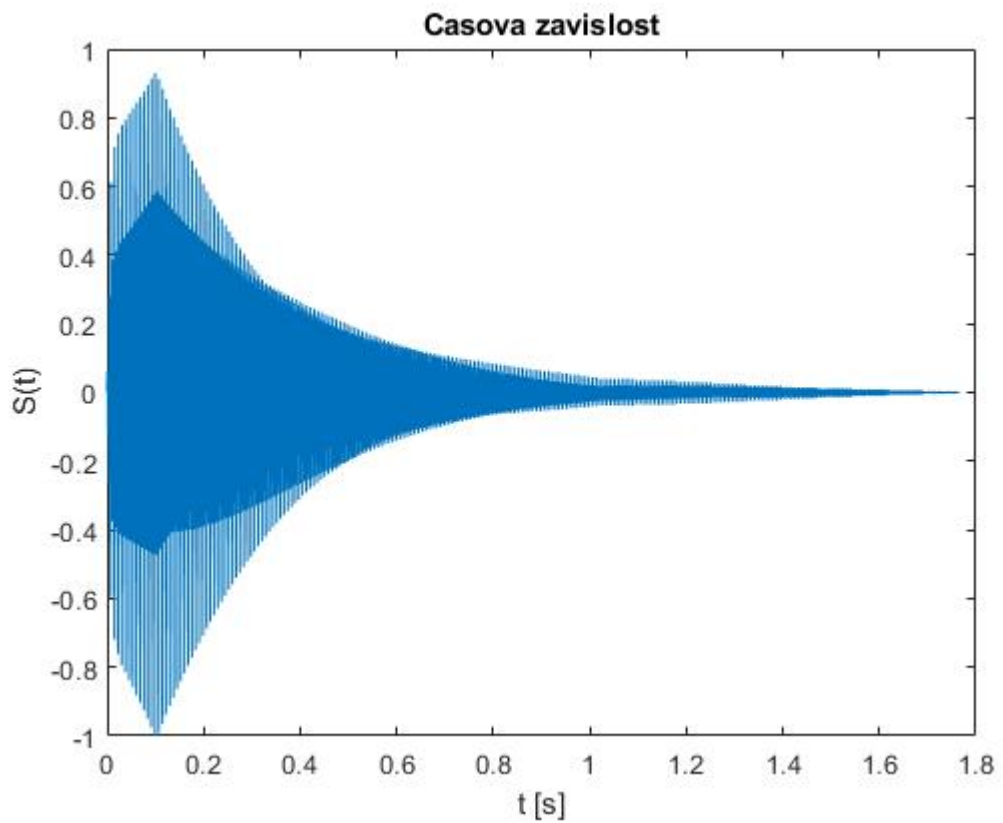
Ve složce **Textové soubory** jsou tři soubory (nota.txt, Stupnice.txt, Rungran_Pain.txt).

Příloha B

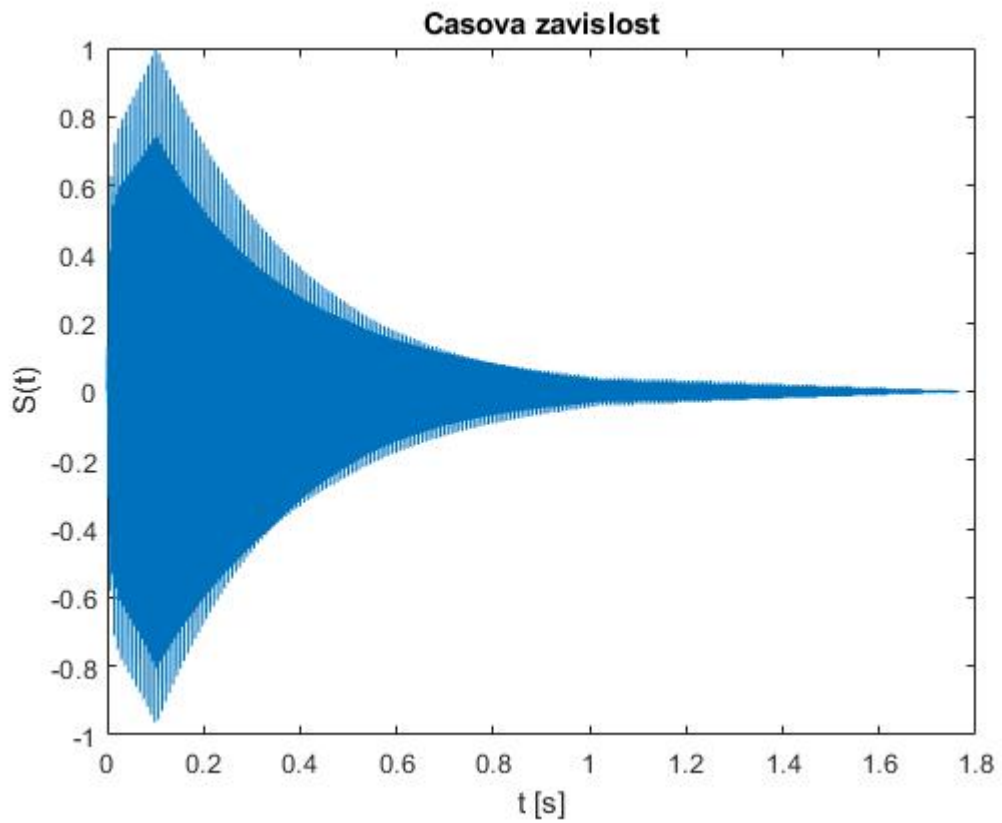
V příloze B jsou grafické výstupy implementovaného systému znázorňující průběhy noty C třetí oktavy pro tři varianty barvy tohoto tónu.



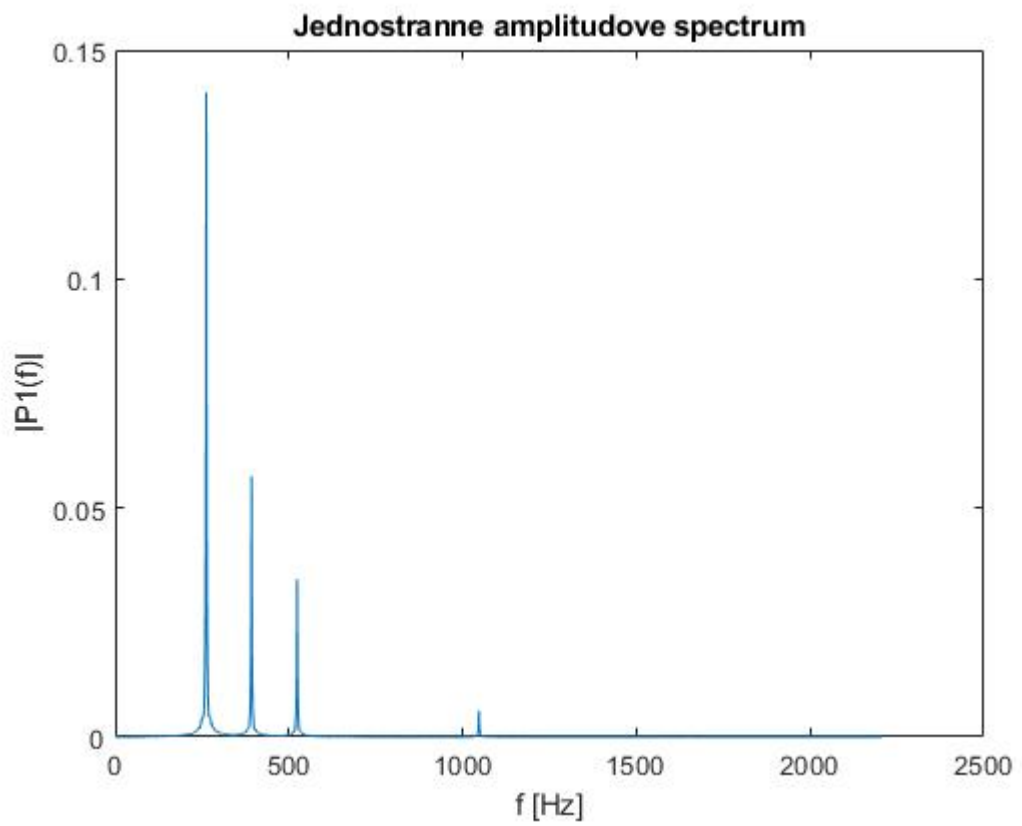
Obrázek č.1 Časová závislost, původní tón



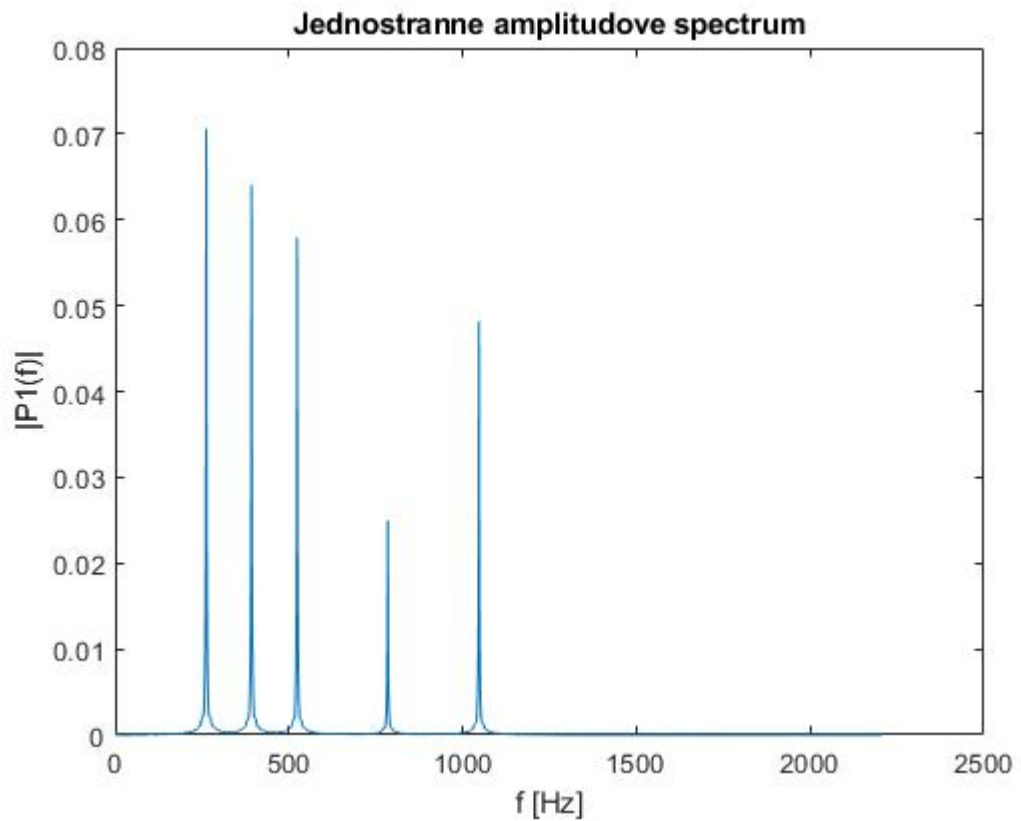
Obrázek č.2 Časová závislost, teplejší tón



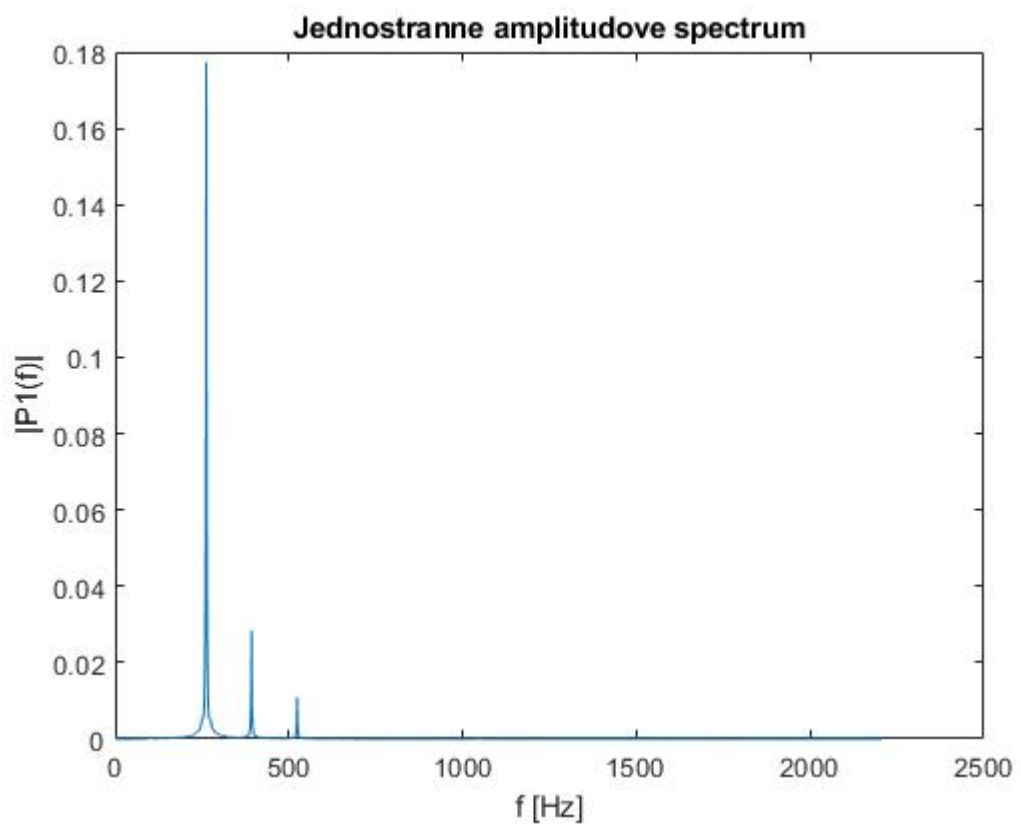
Obrázek č.3 Časová závislost, studenější tón



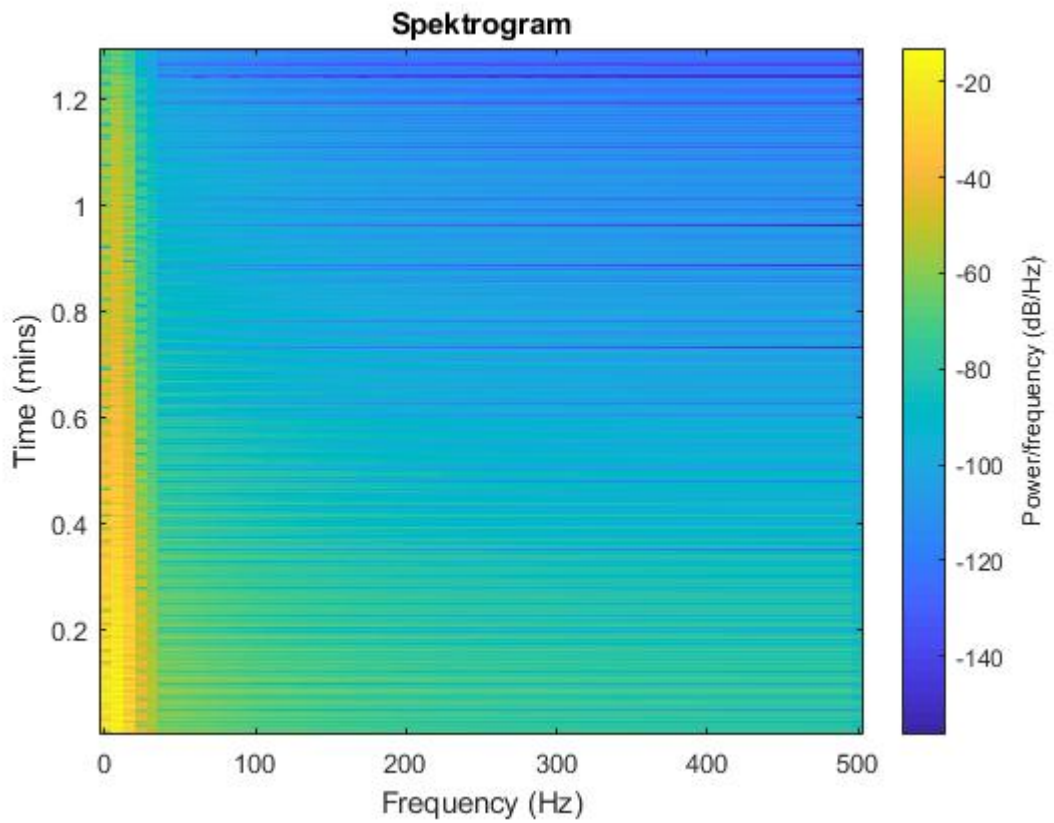
Obrázek č.4 Jednostranné amplitudové spektrum, původní tón



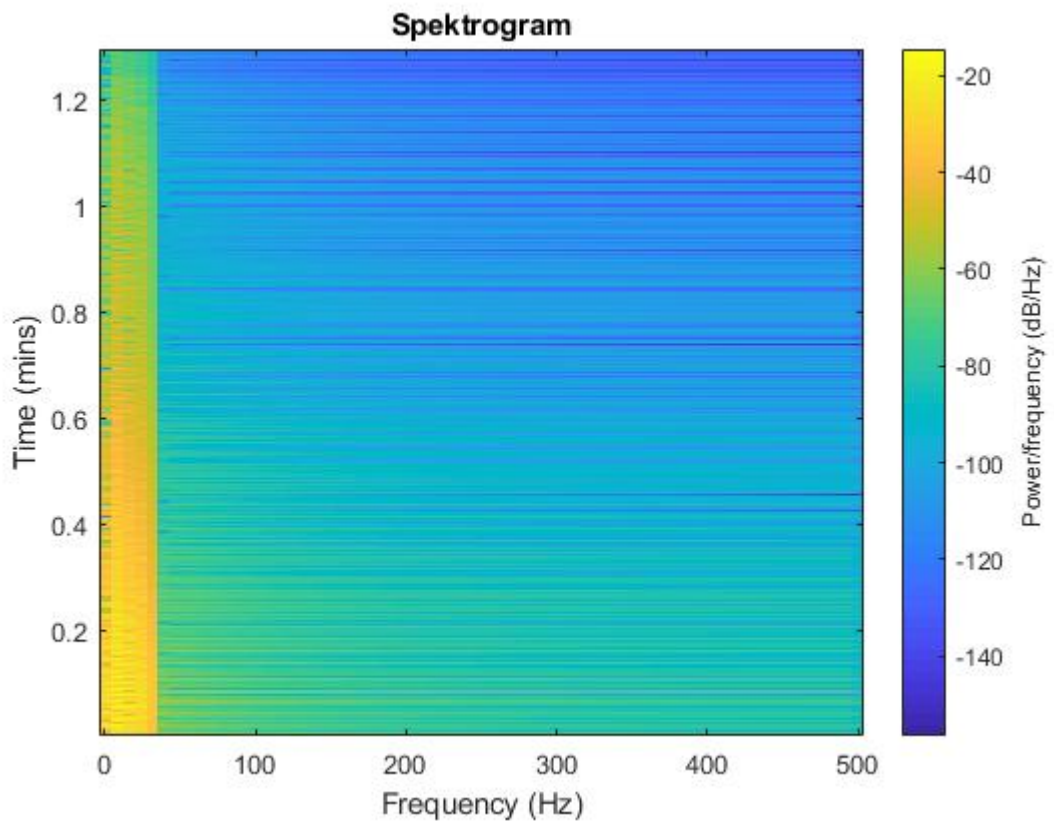
Obrázek č.5 Jednostranné amplitudové spektrum, teplejší tón



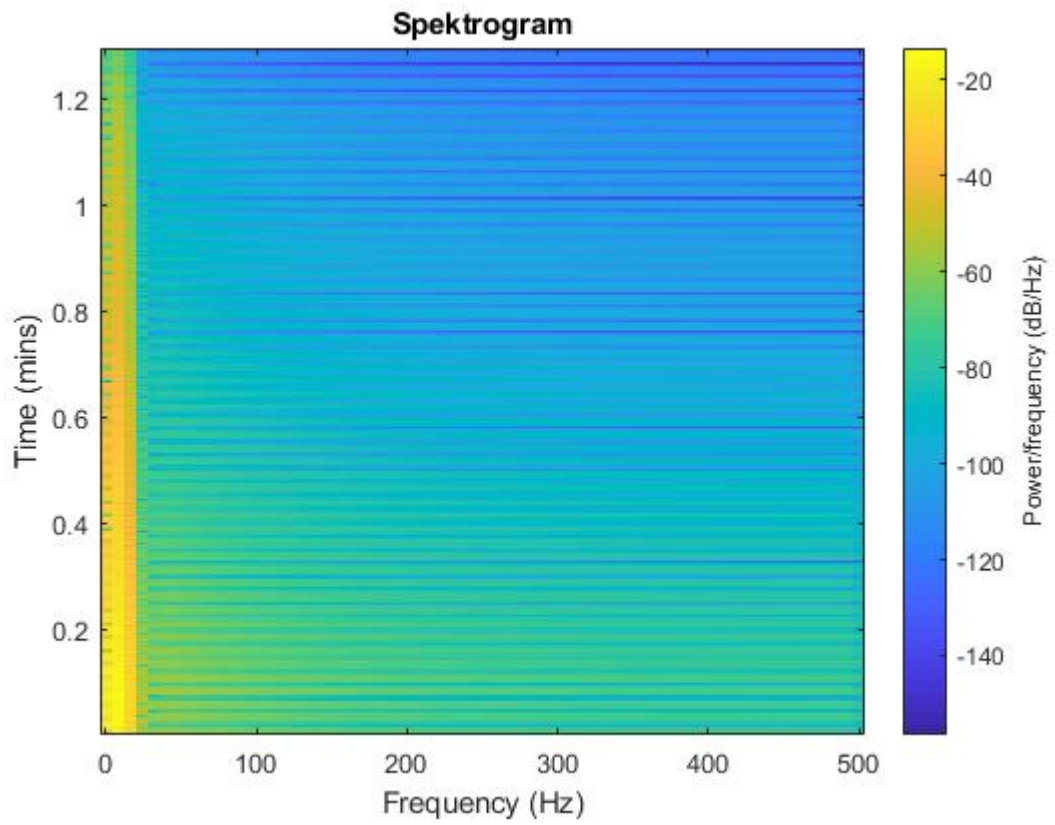
Obrázek č.6 Jednostranné amplitudové spektrum, studenější tón



Obrázek č.7 Spektrogram, původní tón



Obrázek č.8 Spektrogram, teplejší tón



Obrázek č.9 Spektrogram, studenější tón