

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

TVORBA ZVUKU V TECHNOLOGII VST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL ŠVEC

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

TVORBA ZVUKU V TECHNOLOGII VST

SOUND CREATION USING VST

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL ŠVEC

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Dr. Ing. JAN ČERNOCKÝ

BRNO 2014

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou digitální zvukové syntézy. Jejím hlavním úkolem bylo navrhnout a implementovat nový zvukový syntezátor. Vytvořený nástroj využívá různé přístupy k syntéze zvuku, proto je ho možné označit jako hybridní. Návrh nástroje byl inspirován existujícími audio syntezátory. Pro implementaci byl zvolen jazyk C++ a technologie VST od společnosti Steinberg. Jako rozšíření byl navržen a realizován modul, který dokáže zpracovat hlasový nebo textový vstup a na jeho základě vytvořit MIDI soubor, který je možné pomocí syntezátoru interpretovat. Pro tento modul je použitý jazyk Python. K vytvořenému syntezátoru vzniklo i jednoduché uživatelské rozhraní.

Abstract

This diploma thesis deals with digital sound synthesis. The main task was to design and implement new sound synthesizer. Created tool uses different approaches to the sound synthesis, so it can be described as a hybrid. Instrument design was inspired by existing audio synthesizers. For implementation, C++ language and VST technology from Steinberg are used. As an extension, a module, that can process voice or text input and then build a MIDI file with melody (which can be interpreted with using any synthesizer) was designed and implemented. For this module, Python language is used. For the synthesizer, a simple graphical user interface was created.

Klíčová slova

Zvuková syntéza, VST plugin, digitální filtry, zpracování řeči, MIDI humanizace

Keywords

Audio synthesis, VST plugin, digital filters, speech processing, MIDI humanization

Citace

Michal Švec: Tvorba zvuku v technologii VST, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

Tvorba zvuku v technologii VST

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Dr. Ing. Jana Černockého

.....
Michal Švec
18. mája 2014

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Janu Černockému za vstřícnost a cenné rady v průběhu celého vývoje této diplomové práce. Poděkování patří také lidem, kteří práci pomohli otestovat.

© Michal Švec, 2014.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Prehľad kapitol	5
2 Zvuková syntéza	7
2.1 Súčtová syntéza	7
2.2 Rozdielová syntéza	8
2.3 Modulačná syntéza	9
2.4 Formantová syntéza	10
2.5 Tvarová syntéza	11
2.6 Wavetable syntéza	12
2.7 Granulárna syntéza	13
2.8 Pulzarová syntéza	13
3 Digitálne filtre	15
4 Zvukové efekty	17
4.1 Efekty prostredia	17
4.2 Modulačné efekty	17
4.3 Dynamické efekty	18
4.4 Priestorové efekty	18
5 Existujúce VST syntetizátory	19
5.1 Rob Papen Albino3 a Predator	19
5.2 reFX Vanguard a Nexus	20
5.3 NI Massive	20
5.4 Cakewalk Zeta+	21
5.5 Lennar Digital Sylenth1	21
5.6 U-he Zebra	21
5.7 Zhrnutie	21
6 Návrh syntetizátoru	22
6.1 Oscilátory	23
6.2 Granulárny modul	24
6.3 Filter	25
6.4 Zosilňovač	25
6.5 Použité efekty	26
6.6 Možnosti modulácie	27
6.7 Uživateľské rozhranie	28

7 Implementácia	29
7.1 Oscilátory	29
7.2 Granulárny modul	30
7.3 Filtre	31
7.3.1 „Analogový“ rezonančný filter	31
7.3.2 Filtre bez rezonancie	33
7.4 Zdroje modulácie	34
7.4.1 LFO	34
7.4.2 Generátor obálky	34
7.4.3 Krokový modulátor	35
7.5 Použité efekty	37
7.5.1 Chorus	37
7.5.2 Pingpong delay	38
7.5.3 Saturátor	39
7.5.4 Stereo enhancer	41
7.6 Hlavný modul	43
7.6.1 Generovanie zvuku	43
7.6.2 Hlasový modul	44
7.6.3 Spracovanie udalostí	45
7.7 Modulačná matica	46
8 Generovanie melódie	48
8.1 Spracovanie vstupu	48
8.2 Prevod na noty	49
8.3 Humanizácia	50
8.4 MIDI rozhranie	52
9 Testovanie	53
9.1 Vyhodnotenie	54
9.2 Spotreba výkonu	54
10 Záver	55
10.1 Hlavný prínos práce	55
10.2 Možné pokračovanie práce	55
A Obsah CD	58
B Manuál	59
B.1 Inštalácia a spustenie	59
B.2 Oscilátory	59
B.3 Grain modul	59
B.4 Filter	59
B.5 Modulátory	61
B.6 Modulačná matica	61
B.7 Zosilňovač	61
B.8 Efekty	62
C Zoznam parametrov syntetizátoru	63

Zoznam obrázkov

2.1	Bloková schéma súčtovej syntézy	8
2.2	Bloková schéma rozdielovej syntézy	9
2.3	Základné druhy modulačnej syntézy	10
2.4	Znázornenie amplitúdovej a fázovej tvarovej syntézy	11
2.5	Jednoduchý príklad vyhľadávacej tabuľky	12
2.6	Ukážka grain prúdu s trojuholníkovou amplitúdovou obálkou	13
2.7	Ukážka jednoduchého pulzarového vlaku	14
3.1	Základné typy filtrov podľa frekvenčnej odozvy	15
3.2	Jednoduchý filter FIR a IIR	16
6.1	Bloková schéma syntetizátoru	22
6.2	Tvary amplitúdovej obálky granulárneho modulu	25
6.3	Tvary modulačnej obálky pre zosilňovač a filter	26
7.1	Bloková schéma granulárneho modulu	31
7.2	Bloková schéma analógového filtra	32
7.3	Prenosová funkcia nelineárneho bloku	33
7.4	Stavový diagram reprezentujúci generátor obálky	35
7.5	Výstup generátoru obálky s lineárnym priebehom	36
7.6	Výstup krokového zdroja modulácie	36
7.7	Bloková schéma efektu Chorus	37
7.8	Príklad výstupu modulačného zdroja	39
7.9	Bloková schéma efektu Pingpong delay	39
7.10	Bloková schéma saturačného efektu	41
7.11	Saturačná krivka $y_1(x)$	41
7.12	Saturačná krivka $y_2(x)$	42
7.13	Saturačná krivka $y_3(x)$	42
7.14	Saturačná krivka $y_4(x)$	43
7.15	Bloková schéma efektu pre rozšírenie stereo hĺbky	43
7.16	Bloková schéma hlasového modulu	45
7.17	Zjednodušená blokovaná schéma modulačnej matice	47
8.1	Príklad súboru s fonémovou segmentáciou	49
8.2	Príklady rôznych dĺžok melódie	49
8.3	Znázornenie melodického vzoru	50
8.4	Humanizácia jednoduchej melódie	51
B.1	Blok oscilátorov	60

B.2	Blok granulárneho modulu	60
B.3	Blok filtra	60
B.4	Blok LFO modulátorov	61
B.5	Blok krokového modulátora	61
B.6	Blok modulačnej matice	62
B.7	Blok zosilňovača	62
B.8	Blok efektov	62

Kapitola 1

Úvod

Táto práca bola vytvorená na Fakulte informačných technológií na Vysokém učení technickém v Brně. Zaoberá sa problematikou digitálnej syntézy zvuku. K tomuto účelu je na trhu momentálne dostupné pomerne veľké množstvo nástrojov, ktoré využívajú rôzne metódy zvukovej syntézy a snažia sa užívateľovi ponúknuť jednoduchý prístup k obrovskému množstvu pestrých zvukov. Z tohto dôvodu je relatívne obtiažne priniesť úplne nový pohľad na zvukovú syntézu, avšak na druhej strane digitálna audio syntéza nemá tak striktné obmedzené možnosti spracovania signálu, oproti syntéze využívajúcej analógové obvody, ktoré majú limitované vlastnosti.

Hlavnou úlohou práce bolo vytvoriť návrh digitálneho audio syntetizátoru a následne tento návrh implementovať ako experimentálny, ale použiteľný zvukový modul v technológii VST (Virtual Studio Technology). Pre implementáciu bol zvolený jazyk C++, v ktorom je napísaná väčšina VST pluginov. Tento spôsob implementácie poskytuje vhodnú mieru abstrakcie, ktorá je efektívne využívaná pri návrhu a tiež dostatočnú rýchlosť pri vykonávaní výsledného kódu. Okrem VSTSDK, čo je nízkoúrovňový voľne dostupný framework pre vývoj VST pluginov od spoločnosti Steinberg, nebol použitý žiadny iný vývojový nástroj typu JUCE (nástroj pre vývoj multiplatformových aplikácií) a podobne. K výslednému syntetizátoru bolo vytvorené aj jednoduché užívateľské rozhranie, no dôraz sa kládol hlavne na spracovanie signálu, možnosti syntézy a celkovú kvalitu výstupného zvuku.

Po implementácii samotného inštrumentu bolo realizované rozšírenie nástroja o hlasový alebo textový vstup, ktoré bolo implementované v jazyku Python. V aktuálnej verzii pracuje iba v režime off-line. Tento modul je schopný na základe vstupu vygenerovať výstupný súbor vo formáte MIDI (.mid). Súbor obsahuje synteticky vytvorenú melódiu, ktorú je možné interpretovať pomocou realizovaného alebo aj iného syntetizátoru s MIDI rozhraním. Vstupný hlasový signál je nutné najprv spracovať pomocou fonémového rozpoznávača, ktorý je vyvíjaný na Fakulte informačných technológií v Brne skupinou BUT Speech@FIT.

1.1 Prehľad kapitol

Celá práca je rozdelená na niekoľko väčších tematických celkov, ktoré sa venujú určitej problematike. Prvé 3 kapitoly vytvárajú teoretický základ pre samotné jadro práce, ktoré bližšie popisuje návrh a implementáciu. Kapitola nasledujúca za úvodom práce sa zaoberá metódami zvukovej syntézy, ktoré sa aktuálne používajú a ktorých vlastnosti a techniky boli následne začlenené do návrhu nového hybridného syntetizátoru. Po zoznámení s možnosťami digitálnej audio syntézy, nasleduje krátka kapitola, ktorá sa venuje problematike

digitálnych filtrov. Opisuje základné druhy filtrov, ich vlastnosti a spôsob použitia. Poznanky získané v tejto kapitole sú zúžitkované a implementované v samotnom vytvorenom syntetizátore. Štvrtá kapitola je venovaná zvukovým efektom, ktoré sú rozdelené do niekoľkých kategórií. U každej kategórie je uvedený aj typický spôsob využitia daného efektu a prínos pre užívateľa.

Po týchto teoretických kapitolách nasleduje krátka rekapitulácia aktuálne dostupných digitálnych audio syntetizátorov v technológii VST. Kapitola slúži ako podklad pre nasledujúci návrh nového inštrumentu, ktorý sa snaží dodržať štandardy a samozrejme zároveň priniesť užívateľom niečo nové. V poradí šiesta kapitola sa zaoberá návrhom. Obsahuje informácie o spôsobe syntézy výsledného zvuku a možnostiach, ktoré syntetizátor užívateľovi ponúka. Najprv popisuje syntetizátor ako celok a následne sa bližšie venujem jeho menším dôležitým častiam.

Po kapitole návrhu pokračuje už samotná implementácia. Keďže práca má implementačný charakter, je táto kapitola pomerne rozsiahla a podrobne popisuje implementačné detaily jednotlivých modulov. Sú v nej tiež popísané všetky problémy, na ktoré sa pri práci narazilo a spôsob ich riešenia. Kapitola s poradovým číslom osem, sa venuje rozšíreniu navrhnutého syntetizátoru o hlasový alebo textový vstup. Popisuje spôsob riešenia a realizácie daného rozšírenia, pričom kladie dôraz na základné stavebné prvky melódie, rytmu a humanizácie MIDI udalostí.

Predposledná kapitola sa stručne venuje testovaniu vytvoreného nástroja pre digitálnu audio syntézu. V tejto kapitole je uvedený popis problematického testovania podobných projektov a tiež zdôvodnený postup, s akým sa k celému vyhodnocovaniu pristupovalo. Poslednú kapitolu tvorí záver, v ktorom sú zhrnuté dosiahnuté výsledky a celkové zhodnotenie prínosu. V závere je tiež naznačené možné pokračovanie práce.

Kapitola 2

Zvuková syntéza

Zvuková alebo tiež audio syntéza je proces, ktorý sa zaoberá riadenou tvorbou zvuku. Zvuky je možné rozdeliť na jednoduché a komplexné. Základné 2 úlohy, ktoré zvuková syntéza rieši, sú:

- Tvorba už existujúcich zvukov (napodobňovanie zvukov hudobných nástrojov a iných reálnych zvukov).
- Tvorba nových zvukov (nové hudobné nástroje a zvukové efekty, ktoré nemajú v reálnom svete obdobu).

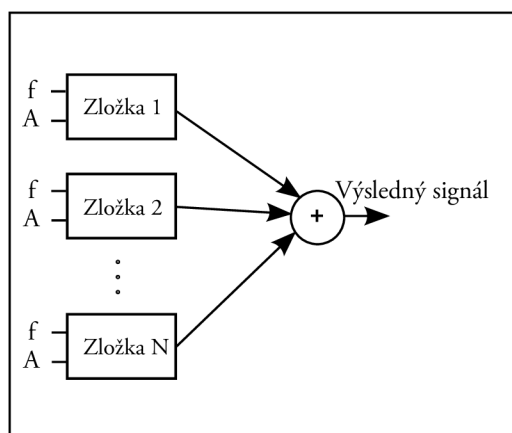
Prvá úloha je značne zložitejšia, pretože existuje pomerne veľké množstvo vonkajších faktorov, ktoré ovplyvňujú reálne zvuky a je veľmi náročné, niekedy až nemožné zahrnúť všetky tieto faktory do diskrétného modelu zvukovej syntézy. Taktiež existuje možnosť objektívne porovnať kvalitu syntetizovaného zvuku s pôvodným reálnym zvukom. Pri druhej úlohe je hodnotenie kvality výsledného zvuku čisto subjektívne. Na generovanie zvuku je možné využiť znalosti matematiky, fyziky či dokonca biológie alebo inej vedy. Spôsob tvorby zvuku nie je nijako obmedzený a behom vývoja tohto odvetvia vzniklo mnoho prístupov a algoritmov, ktoré sa podieľajú na samotnej syntéze. Nasledujúce podkapitoly stručne popisujú najpoužívanejšie metódy pre tvorbu zvuku. [3]

2.1 Súčtová syntéza

Z anglického názvu Additive Synthesis je tento spôsob pravdepodobne prvým známym druhom syntézy a napriek jednoduchosti algoritmu je touto metódou možné generovať obrovské množstvo rôznych zvukov. Princíp tohto algoritmu spočíva v sčítaní väčšieho množstva jednoduchých signálov do jedného komplexného signálu. Ako jednoduchý príklad môže slúžiť použitie množiny oscilátorov, ktoré generujú funkciu sínus s nejakou amplitúdou a nejakou frekvenciou poprípade fázovým posunom. Sčítaním týchto signálov vznikne nový signál s novou amplitúdou a frekvenciou. Názornú blokovú schému zobrazuje obrázok 2.1. Tento typ syntézy priamo vychádza z Fourierovej analýzy, ktorá poukazuje na to, že akýkoľvek periodický signál je možné zapísať ako sumu sínusoviek s rôznou amplitúdou a frekvenciou. Výstupný signál je potom možné zapísať vzťahom:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (2.1)$$

kde N je počet použitých zložiek signálu, A_k je amplitúda, ω_k je kruhová frekvencia a φ_k je fáza k -tej zložky. Súčtová syntéza poskytuje užívateľovi totálnu kontrolu nad generovaným zvukom, čo je jej veľkou výhodou, ale zložitosť nastavenia a množstvo parametrov je pri kreatívnom využití tohto princípu veľkou nevýhodou. Reálne signály sa skladajú z veľkého množstva zložiek a preto je veľmi obtiažne dosiahnuť požadovaný zvuk bez predchádzajúcej analýzy signálu, ku ktorému sa chce užívateľ dostať. Ďalšou nevýhodou je pomerne veľká výpočtová náročnosť v porovnaní napríklad s rozdielovou syntézou, o ktorej hovorí nasledujúca podkapitola. Moderné využitie súčtovej syntézy spolupracuje so spektrálnou analýzou, na základe ktorej sa automaticky nakonfigurujú parametre pre generovanie [3] [5].



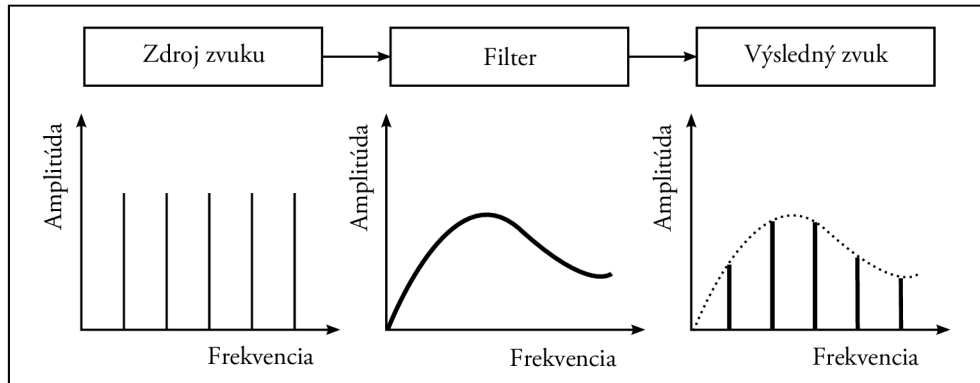
Obr. 2.1: Bloková schéma súčtovej syntézy

Doplnením časovej závislosti parametrov jednotlivých zložiek sa získa maximálna kontrola nad generovaným zvukom, ale na druhej strane sa nastavenie generovania mnohonásobne komplikuje.

2.2 Rozdielová syntéza

Anglický názov tejto metódy je Subtractive Synthesis. Tento typ syntézy patrí medzi najrozšírenejšie spôsoby tvorby zvuku vôbec. Jej princíp je veľmi jednoduchý a veľmi účinný. Spôsob generovania zvuku kopíruje prirodzený vznik zvuku v hudobných nástrojoch alebo ľudskom hlase. Jadrom generátoru je oscilátor, ktorý generuje signál bohatý na frekvencie. Najčastejšie sa generuje pílovitý, obdĺžnikový alebo trojuholníkový priebeh, ktorý sa následne upravuje pomocou filtra. Veľmi často sa používajú aj rôzne druhy šumu (biely alebo ružový). Jednoduchá bloková schéma rozdielovej syntézy je znázornená na obrázku 2.2. Filter ovplyvní frekvenčné spektrum pôvodného signálu, čím sa upravuje farba výsledného zvuku. Ten je tvorený frekvenciami, ktoré sú obsiahnuté v počiatočnom signály pričom sú určité frekvencie potlačené a iné zosilnené. Filter žiadne nové frekvencie do pôvodného signálu nepridá preto je tento spôsob generovania zvuku značne obmedzený a radí sa medzi lineárne syntézy. Ďalším obmedzením oproti reálnym nástrojom je vzájomné oddelenie generátoru a filtra. U reálnych nástrojov sa tieto dve časti navzájom ovplyvňujú a práve tento fakt im dodáva ich unikátnosť. Pri digitálnej implementácii sú možnosti in-

terakcie pomerne obmedzené a ako najlepšie riešenie sa ukazuje zavedenie spätnej väzby, ktorá nie je za všetkých okolností účinná. Výhodou tohto prístupu ku generovaniu zvuku je výpočtová nenáročnosť a pomerne malý počet vstupných parametrov pričom sa dosiahne požadovaný zvuk. [3] [5]



Obr. 2.2: Bloková schéma rozdielovej syntézy

2.3 Modulačná syntéza

Pod týmto pojmom sa rozumie druh zvukovej syntézy, ktorá využíva pri tvorbe zvuku určitý druh modulácie. Pri modulácii sa v čase mení niektorý parameter nosného signálu v závislosti od aktuálnej hodnoty modulačného signálu. Väčšinou je tiež možné určiť hĺbku modulácie pomocou ďalšieho nezávislého parametra. Hĺbka modulácie stanovuje, do akej maximálnej miery sa modulovaný signál mení. Pri použití komplexného nosného signálu vzniká pomocou modulácie bohatý hutný zvuk, ktorý môže mať tónový alebo šumový charakter. Ten závisí od parametrov samotnej modulácie. Táto metóda syntetizovania zvuku patrí medzi nelineárne, pretože pri nej vznikajú nové harmonické zložky, ktoré sú úmerné súčtom a rozdielom už prítomných frekvencií. Možnosti modulovania parametrov nie sú nijako obmedzené a je možné jeden parameter modulovať viacerými zdrojmi súčasne či dokonca použiť jeden zdroj signálu ako nosný aj modulačný. V takomto prípade signál ovplyvňuje sám seba pomocou spätnej väzby. Ako zdroje modulácie sa tiež používajú špeciálne, k tomuto účelu vyvinuté, generátory. Príkladom môže byť nízkofrekvenčný oscilátor, označovaný tiež ako LFO (Low Frequency Oscillator), alebo generátor obálky (Envelope generator). Podľa modulovaného parametru sa rozlišujú 3 základné druhy modulácie: amplitúdová, frekvenčná a kruhová [5].

Pri amplitúdovej modulácii (AM) dochádza k zmene amplitúdy nosného signálu. Ak sa amplitúda mení frekvenciou menšou ako 18 Hz, dochádza k tzv. tremolo efektu. Amplitúdovú moduláciu je možné matematicky zapísať vzťahom:

$$y(t) = [1 + m(t)] c(t) \quad (2.2)$$

kde $y(t)$ je výsledný modulovaný signál, $m(t)$ je modulačný signál, pričom jeho amplitúda určuje hĺbku modulácie a $c(t)$ je nosný signál. Amplitúda nosnej frekvencie zostáva nezmenená. Znázorňujúca schéma je na obrázku 2.3.

Behom frekvenčnej modulácie (FM) dochádza k zmene frekvencie nosného signálu. Ak má modulátor frekvenciu nižšiu ako 18 Hz, dochádza k vibrato efektu. U FM vzniká veľmi bohatý výstupný signál a to aj pri jednoduchom zapojení s jedným nosným a jedným modulačným signálom. V praxi sa však používajú aj oveľa komplikovanejšie zapojenia. Matematický popis pre sínusový priebeh nosného a modulačného signálu je vyjadrený vzťahom:

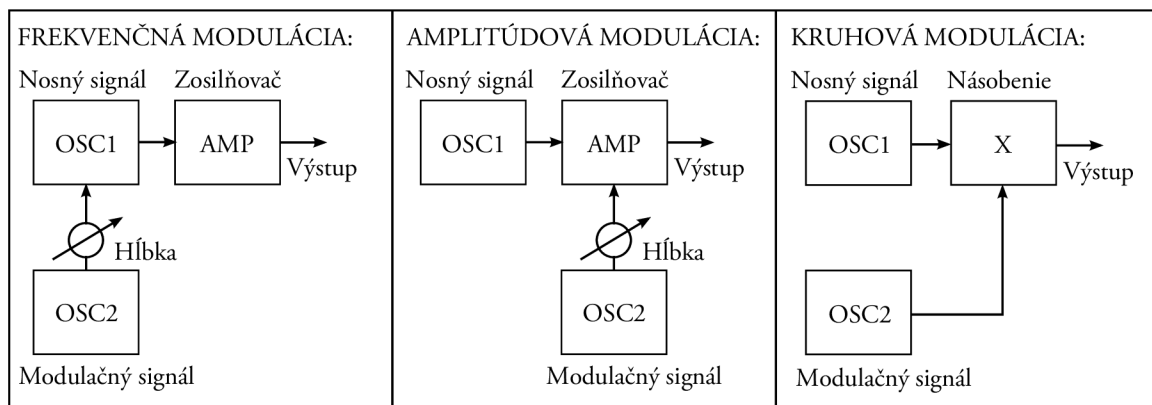
$$y(t) = A_c \sin(\omega_c t + m_{FM} \sin(\omega_m t)) \quad (2.3)$$

kde $y(t)$ je aktuálna hodnota výstupného signálu, A_c je amplitúda nosného a aj výstupného signálu, ω_c je frekvencia nosného signálu, m_{FM} predstavuje hĺbku modulácie, ω_m je frekvencia modulačného signálu a t je čas. Toto jednoduché zapojenie znázorňuje tiež obrázok 2.3.

Pod pojmom kruhová (Ring) modulácia sa rozumie špeciálny druh amplitúdovej modulácie, ktorá je bipolárna. Ring modulácia sa realizuje prostým násobením nosného a modulačného signálu čo je matematicky možné zapísať ako:

$$y(t) = c(t) m(t) \quad (2.4)$$

kde $y(t)$ je výsledný signál, $c(t)$ je nosný signál a $m(t)$ je modulačný signál. Zvuk generovaný touto moduláciou znie značne kovovo a používa sa napríklad na generovanie zvuku zvonov alebo podobných mechanických zvukov. Dôležitým faktom je to, že pri kruhovej modulácii zanikne pôvodná nosná frekvencia a výsledný zvuk tým stráca povahu tónu. Obrázok 2.3 zobrazuje jednoduché zapojenie s použitím Ring modulácie.



Obr. 2.3: Základné druhy modulačnej syntézy

Pri technikách modulačnej syntézy je nutné dbať na to, aby výsledný generovaný signál neobsahoval frekvencie, ktoré sú vyššie ako 2-násobok vzorkovacej frekvencie, pretože by došlo k skresleniu. Tento stav môže nastať, pretože pri modulácii vznikajú súčtové frekvencie nosného a modulačného signálu [3].

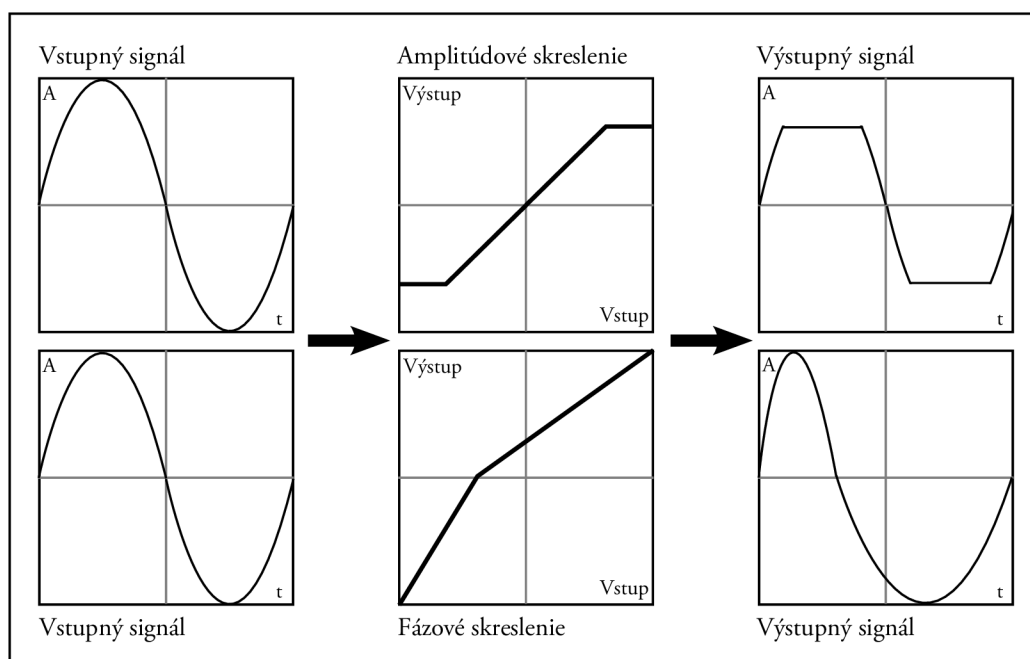
2.4 Formantová syntéza

Tento druh syntézy bol pôvodne vyvinutý pre simuláciu ľudského hlasu, ale jej metódy sa postupom času adaptovali aj na modelovanie iných typov zvukov. Syntéza má veľmi

dobré uplatnenie u hudobných nástrojov, ktoré majú vo svojom frekvenčnom spektre nejaké dominantné formanty. Pod týmto pojmom sa rozumie určitý vrchol spektra. Princíp vzniku zvuku touto metódou je priamočiary. Pulzujúci signál zo zdroja (hlasivky) je upravený komplexným rezonančným filtrom (ústa, nos, jazyk a dutiny). Filter spôsobí zosilnenie v niektorých častiach spektra, pričom iné môže zoslabiť. Pri syntéze sa hlasivky nahradia digitálnym oscilátorom a ako filter sa použije zložitejšie zapojenie jednoduchých pásmových priepustí s nastaviteľnou veľkosťou rezonancie. Inou možnosťou je použiť špeciálny generátor formantu, ktorého parametre je možné prispôbovať (frekvencia špičky, veľkosť špičky, strmosť vzostupnej a zostupnej hrany). Počet generátorov a ich nastavenie závisí od požadovaného spektra výstupného signálu. Výhoda použitia špeciálnych generátorov spočíva v menšej výpočtovej náročnosti oproti generovaniu pomocou siete pásmových filtrov [3].

2.5 Tvarová syntéza

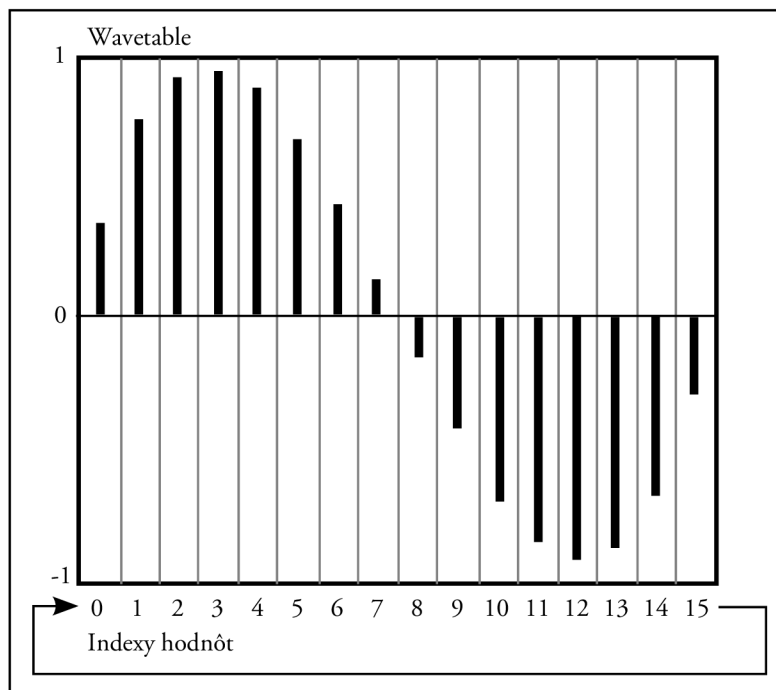
Tvarová syntéza sa radí medzi nelineárne druhy zvukovej syntézy, pretože do signálu pridáva frekvencie, ktoré sa v ňom povodne nevyskytovali podobne ako je to u modulačnej syntézy. V súčasnosti je používaných viac druhov tvarovej syntézy, z ktorých každá má určité prednosti. Princíp činnosti spočíva v prechode signálu nelineárnym prvkom alebo inak povedané prvkom s nelineárnou prenosovou charakteristikou. Týmto spôsobom dochádza k nelineárnemu skresleniu amplitúdy alebo fázy výstupného signálu oproti vstupnému signálu. Podobné skreslenie vzniká pri prechode signálu elektrónkovým zosilňovačom, kde od určitej hodnoty vstupu a zosilnenia dochádza k saturácii a zosilňovač začne skresľovať. Keď takýmto systémom prechádza sínusový signál, na jeho výstupe po saturácii bude signál podobajúci sa obdĺžnikovému priebehu [3]. Jednoduchý príklad amplitúdového a fázového skreslenia je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Znázornenie amplitúdovej a fázovej tvarovej syntézy

2.6 Wavetable syntéza

Pri tomto spôsobe syntézy sa využíva vyhľadávacia tabuľka (Wavetable), v ktorej je uložená jedna perióda generovaného signálu. Tabuľka sa pri syntéze postupne prechádza a jej hodnoty určujú hodnoty výstupného signálu. Keď sa prejde celá tabuľka, pokračuje sa znova od začiatku až kým sa generovanie nezastaví. Výhodou tohto prístupu je, že počítanie hodnôt výstupného signálu sa uskutočňuje iba pri počiatočnej inicializácii vyhľadávacej tabuľky. Pri samotnej syntéze sa už hodnoty z tabuľky len čítajú. Takto sa značne zmenšia nároky na výpočtový výkon. Na druhej strane sa spotrebuje o niečo viac pamäti, ale v dnešnej dobe už tento fakt nerobí veľké problémy. Generovanie zvuku pomocou jednej tabuľky je základný princíp tejto syntézy, ale pre komplexnejšie zvuky je možné použiť viac tabuliek, z ktorých každá sa môže využiť pre inú časť signálu. Tiež je možné použiť tabuľku s väčším množstvom vzoriek a čítať z nej z viacerých miest naraz, či dokonca vytvárať slučky. Dôležité je, aby sa dodržal vzorkovací teorém a nedochádzalo k skresleniu či dokonca praskaniu pri skokových zmenách signálu. V prípade, že je nutné generovať inú frekvenciu ako je frekvencia uloženého signálu v tabuľke, je lepšie aplikovať niektorú z metód interpolácie. Príklad vyhľadávacej tabuľky zobrazuje obrázok 2.5. Jedná sa o veľmi malú tabuľku, kde je počet uložených hodnôt iba 16. V praxi sa používajú tabuľky, ktoré majú 256, 512, 1024 alebo aj viac hodnôt. Počet hodnôt závisí od veľkosti skreslenia s akým chceme daný tvar signálu generovať. Významnú úlohu zohráva aj použitá interpolačná metóda. Čím je rád metódy vyšší, tým menší počet hodnôt tabuľka musí obsahovať, aby sa dosiahla požadovaná kvalita výstupného signálu.

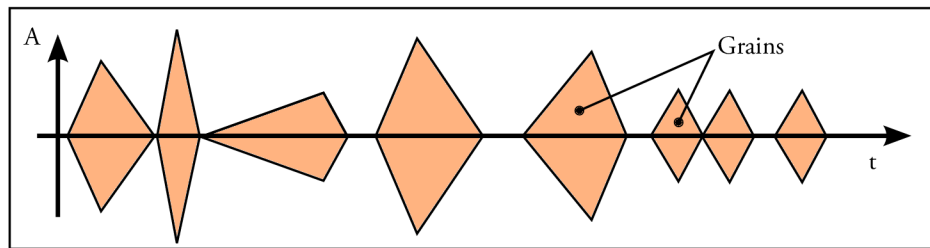


Obr. 2.5: Jednoduchý príklad vyhľadávacej tabuľky

Syntéza poskytuje tiež možnosť veľmi jednoducho simulovať zvuky hudobných nástrojov, keď sa do dostatočne dlhých tabuliek uložia jednotlivé tóny. Zvuk takéhoto riešenia je ale značne monotónny a bez ďalších vylepšení nie je veľmi realistický [3].

2.7 Granulárna syntéza

Pri tvorbe zvuku touto metódou sa využívajú tzv. granule alebo zrnká, anglicky Grains. Grain je veľmi krátky časový úsek signálu, obvykle v dĺžke rádovo do 100 ms. Počas syntetizovania sa zrnká generujú a prehrávajú veľkou rýchlosťou za sebou alebo sa dokonca prekrývajú. Pre ľudský sluch to znie ako plynulý signál, podobne ako dokáže séria obrázkov prehrávaných dostatočnou rýchlosťou vytvoriť animáciu. Každé zrno môže mať svoju vlastnú amplitúdovú obálku, frekvenciu, dobu trvania a oneskorenie s akým sa prehráva. Sofistikovanejšie implementácie využívajú aj náhodné hodnoty, pravdepodobnosť, fraktálnu geometriu či celulárne automaty. Veľmi časté je tiež kombinovať viacero rôznych grain prúdov súčasne, čím sa vytvorí tzv. mrak. Takto vznikajú mohutné zvukové textúry najrôznejšieho znenia. Ako zdroj signálu pre generovanie grainov je možné použiť akýkoľvek audio signál. Dôležité u granulárnej syntézy je používať amplitúdové obálky, ktoré začínajú aj končia na hodnote 0 alebo zabezpečiť, aby fázy jednotlivých susedných generátorov obálky na seba nadväzovali. Inak dôjde k výraznému praskaniu na skokových zmenách signálu [3].



Obr. 2.6: Ukážka grain prúdu s trojuholníkovou amplitúdovou obálkou

Obrázok 2.6 znázorňuje prúd zrníčok s trojuholníkovou obálkou, kde sa mení amplitúda a mierne aj tvar obálky, doba trvania jedného zrníčeka a tiež oneskorenie medzi jednotlivými zrníčkami.

2.8 Pulzarová syntéza

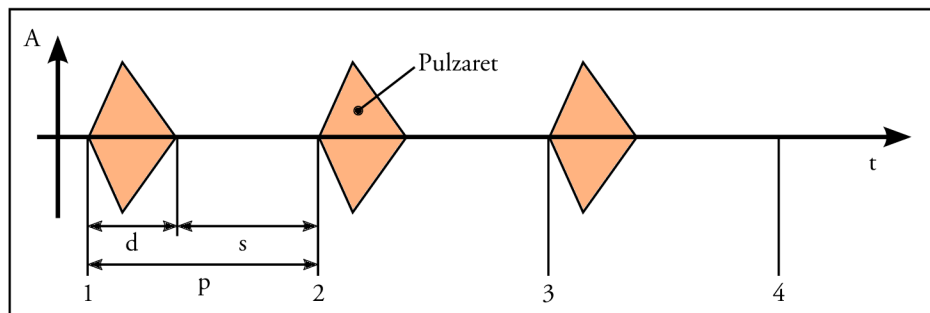
Táto syntéza je veľmi podobná granulárnej syntéze dokonca sa v niektorých zdrojoch uvádza ako špeciálny druh granulárnej syntézy no jej prístup k tvorbe zvuku je mierne odlišný. Pulzarová syntéza generuje tzv. pulzarový vlak (pulsar train), ktorý je periodický a je riadený rôznymi parametrami. V najjednoduchšej forme, ktorú zobrazuje obrázok 2.7, je vlak riadený 2 základnými parametrami, základnou frekvenciou:

$$f_p = \frac{1}{p} \quad (2.5)$$

$$p = d + s \quad (2.6)$$

kde perióda p pozostáva z pulzaretu šírky d a z oblasti ticha šírky s . Pulzaret je časť pulzaru, kde sa generuje signál určitej frekvencie f_d . Šírka pulzaretu a ticha sa udáva v ms [9].

$$f_d = \frac{1}{d} \quad (2.7)$$

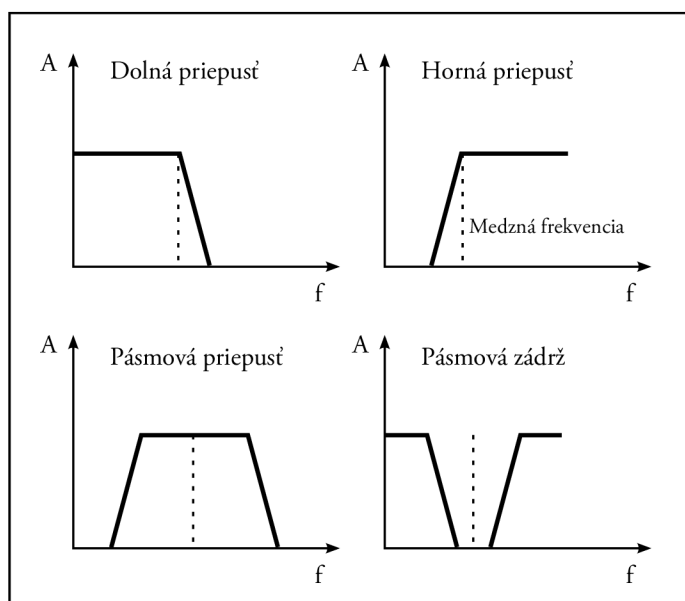


Obr. 2.7: Ukážka jednoduchého pulzarového vlaku

Kapitola 3

Digitálne filtre

Filtre sa pri tvorbe zvuku používajú na úpravu frekvenčného spektra, čím sa mení farba zvuku. Pri prechode signálu filtrom sa niektoré frekvencie zosilnia, poprípade zoslabia čo určuje prechodová charakteristika daného filtra. Podľa frekvenčnej odozvy sa rozoznávajú 4 základné typy filtrov: dolná priepusť, horná priepusť, pásmová priepusť a pásmová zádrž. Dolná priepusť alebo LP (Lowpass) prepúšťa len frekvencie nižšie ako medzná frekvencia filtra, čo je frekvencia kedy útlm dosiahne 3 dB. Horná priepusť, HP (Highpass) naopak prepúšťa len vyššie frekvencie, pásmová priepusť, BP (Bandpass) prepúšťa úzke pásmo okolo medznej frekvencie a pásmová zádrž, N (Notch) ho zase tlmí. Charakteristiky jednotlivých filtrov sú zachytené na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Základné typy filtrov podľa frekvenčnej odozvy

Každý filter je určitého rádu, čo rozhoduje o veľkosti jeho útlmu v decibeloch na frekvenčný rozsah 1 oktávy. Najpoužívanejšie filtre majú 6, 12 alebo 24 dB. V niektorých prípadoch sa používajú aj filtre s vyššou strmouťou, ale nie je to také typické. Ďalšou veľmi dôležitou vlastnosťou filtrov používaných pri tvorbe zvuku je možnosť nastavenia veľkosti rezonancie. Rezonancia zosilňuje úzke pásmo frekvencií v okolí medznej frekvencie čím vzniká charak-

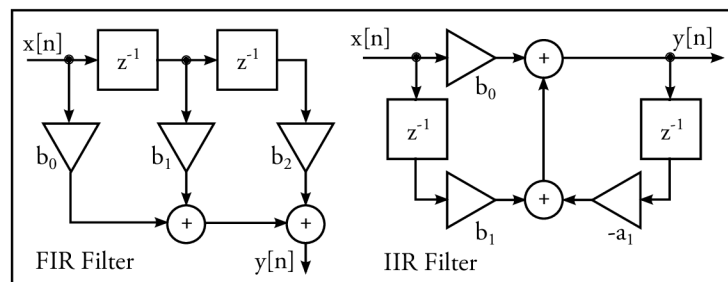
teristický ostrý zvuk. Pri dostatočne vysokej hodnote rezonancie sa z niektorých filtrov stavajú oscilátory, toto ale závisí na návrhu filtra. Návrh filtrov pre použitie pri syntéze zvuku je pomerne náročný a vo väčšine prípadov vychádza z analógových variant, ktoré sa snaží napodobniť. Digitálne filtre majú pri spracovaní signálov značné výhody a ich výsledky sú neporovnateľné s analógovými variantmi, pretože sa viac blížia k ideálnym filtrom, avšak práve nedokonalosť a nelineárne charakteristiky použitých súčiastok dodávajú analógovým filtrom ich hutný zvuk. Z hľadiska implementácie je možné filtre deliť na filtre s konečnou impulznou odozvou (FIR - Finite Impulse Response) a filtre s nekonečnou impulznou odozvou (IIR - Infinite Impulse Response). FIR reagujú na konečný vstup konečne dlhým výstupom a po určitom čase sa ustália na hodnote 0. Pri spracovaní využívajú aktuálnu hodnotu vstupu a niekoľko predchádzajúcich hodnôt, ktoré majú váhové koeficienty. Oproti IIR sú ale výpočtovo náročnejšie. Výstup FIR filtra je možné popísať vzťahom:

$$y[n] = \sum_{i=0}^N b_i x[n - i] \quad (3.1)$$

kde $x[n]$ je vstupný signál, $y[n]$ je výstupný signál, b_i sú koeficienty, ktoré vytvárajú impulznú odozvu a N je rád filtra. Tento typ filtrov nepotrebuje spätnú väzbu, je vnútorne stabilný a je možné dosiahnuť fázovú lineárnosť, ktorá je pri niektorých situáciách kľúčová. IIR využívajú spätnú väzbu a dosahujú požadované vlastnosti už pri nižších rádoch. Ich impulzná odozva je nekonečná a je nutné riešiť problémy so stabilitou. Filter typu IIR je možné popísať vzťahom:

$$y[n] = \sum_{i=0}^Q b_i x[n - i] - \sum_{j=1}^P a_j x[n - j] \quad (3.2)$$

kde $x[n]$ je vstupný signál, $y[n]$ je výstupný signál, b_i sú koeficienty priamej vetvy filtra, a_j sú koeficienty spätoväzobnej vetvy, P je rád priamej vetvy filtra a Q je rád spätoväzobnej vetvy filtra. Príklad jednoduchého FIR a IIR filtra zobrazuje obrázok 3.2 [8].



Obr. 3.2: Jednoduchý filter FIR a IIR

Kapitola 4

Zvukové efekty

Efektov, ktoré sa používajú pri zvukovej syntéze a spracovaní zvuku je veľké množstvo. Je možné ich deliť do niekoľkých skupín podľa rôznych hľadísk. Nasledujúce podkapitoly stručne charakterizujú klasické a veľmi často používané audio efekty. Časť z nich, ktorá je použitá v implementácii, bude bližšie spomenutá v ďalšej kapitole. Pomocou efektov sa syntetickým zvukom dodáva organický charakter aký majú reálne hudobné nástroje.

4.1 Efekty prostredia

Do tejto skupiny patria efekty, ktoré využívajú časové oneskorenie signálu a tým simulujú akustické vlastnosti prostredia. Prvým efektom je efekt oneskorenia (Delay). Delay opakuje zdrojový signál raz alebo niekoľko krát, čím simuluje odraz zvuku od vzdialených objektov. V najjednoduchšej variante má tento efekt 2 parametre a to čas medzi jednotlivými opakovaniami a veľkosť spätnej väzby, ktorá určuje počet opakovaní. Zložitejšie efekty používajú viac časov oneskorenia, pracujú so stereo signálom alebo používajú filtre v spätnoväzobnej časti. Druhým efektom z tejto skupiny je reverb. Reverb simuluje prirodzené prostredie pre posluš, konkrétne odrazy od stien a okolitých objektov. Základné parametre reverbu tvorí čas medzi pôvodným zvukom a efektom vytvorenými odrazmi, dĺžka a frekvenčná charakteristika generovaného signálu. Obvykle je možné zosilňovať alebo zoslabovať určité frekvenčné pásma [4].

4.2 Modulačné efekty

Tieto efekty využívajú pri svojej činnosti moduláciu, podobne ako modulačná syntéza. Vo väčšine prípadov sa využíva delay, ktorého dĺžka sa moduluje nízkofrekvenčným oscilátorom. Pri miešaní oneskoreného signálu s pôvodným vznikajú rôzne typy efektov v závislosti na zapojení. Týmto spôsobom pracujú efekty ako Chorus, Phaser, Flanger alebo Vibrato. Pri implementácii sa tiež využívajú rôzne druhy filtrov a spätná väzba. Medzi základné parametre týchto efektov patrí frekvencia modulácie, hĺbka modulácie, tvar modulačného signálu a poprípade pomer miešania originálneho zvuku s upraveným. V prípade, že sa moduluje amplitúda, vznikne efekt zvaný Tremolo. Modulačné efekty sa používajú na simulovanie znenia viacerých nástrojov naraz (Unison), pridanie živosti do monotónneho generovaného signálu alebo kreatívne syntetizovanie zvuku [4].

4.3 Dynamické efekty

Úlohou týchto efektov je ovplyvňovať dynamiku zvuku. Základné efekty patriace do tejto skupiny sú kompresor (Compressor), expander (Expander), limiter (Limiter) a brána (Gate). Kompresor znižuje hlasitosť zvuku, ktorý prekročí stanovený prah (Threshold). Ďalšie parametre tohto efektu sú Attack a Release. Tieto špecifikujú za aký čas začne efekt pracovať v plnom rozsahu a za aký čas zase prestane signál ovplyvňovať. Veľkosť kompresie sa udáva kompresným pomerom. Expander pracuje podobne ako kompresor ale jeho účinok je opačný. Limiter je zjednodušene povedané kompresor s veľmi veľkou hodnotou kompresie, pričom nedovolí, aby hlasitosť výstupného signálu prekročila stanovený prah. Brána prepúšťa len zvuk s vyššou úrovňou ako je stanovený prah a jej pôvodný účel bol potlačiť šum pozadia. Veľmi dôležitým aspektom u tejto skupiny efektov je aj spôsob akým sa určuje úroveň signálu [6].

4.4 Priestorové efekty

Efekty tohto typu upravujú priestorové vnímanie zvuku a to buď umiestňovaním zvuku v priestore alebo rozširovaním stereo hĺbky. Veľmi často využívajú psychoakustické vlastnosti zvuku a moduláciu. Autopan označuje efekt, ktorý mení umiestnenie zvuku v stereo obraze pomocou modulácie nízkofrekvenčným oscilátorom alebo iným zdrojom modulácie. Stereo enhancer umožňuje rozšíriť stereo hĺbku daného signálu poprípade vytvoriť z mono signálu stereo [4].

Kapitola 5

Existujúce VST syntetizátory

Kapitola stručne popisuje aktuálny stav technológie na trhu. Sú v nej charakterizované vlastnosti niektorých vybraných virtuálnych syntetizátorov, ktoré patria medzi obľúbené a často používané. Na konci kapitoly je krátke zhrnutie.

5.1 Rob Papen Albino3 a Predator

Oba syntetizátory sú veľmi obľúbené a často používané v rôznych hudobných žánroch. Pre Albino3 už dokonca skončila podpora, ale napriek tomu stále veľa hudobníkov používa práve tento inštrument. Jedná sa o pomerne zložité nástroje s veľkým množstvom parametrov a hybridným spôsobom zvukovej syntézy.

Albino3 disponuje 4 kvalitnými stereo oscilátormi so širokými možnosťami nastavenia a možnosťou frekvenčnej a amplitúdovej modulácie. Tiež užívateľovi ponúka veľa spôsobov smerovania výstupného signálu oscilátorov. Syntetizátor má 2 stereo filtre s nastaviteľným charakterom, vlastným modulom saturácie (4 rôzne typy charakteru) a generátorom modulačnej obálky. K dispozícii sú aj vstavané efekty (Reverb, Delay, Compressor, Gater, LoFi¹, Chorus, ...), u ktorých je možné zvoliť poradie zapojenia. Pre náročných užívateľov má Albino3 pokročilý a dobre konfigurovateľný Arpeggiator. Pre modulácie je možné využiť 4 konfigurovateľné LFO moduly a niekoľko generátorov obálky. O prepojenie veľkého množstva modulačných zdrojov a cieľov sa stará pohodlne nastaviteľná modulačná matica. Veľkou prednosťou tohto nástroja je možnosť vytvárať niekoľko vrstiev inštancií samotného pluginu. Napriek zložitosti je nástroj veľmi dobre optimalizovaný. Nevýhodou je, že zložitá konfigurácia nie je viditeľná z jednej obrazovky a preto má nástroj niekoľko pohľadov. Užívateľ teda stráca prehľad o aktuálnej konfigurácii inštrumentu.²

Predator je nástupca Albino3 a jeho užívateľské rozhranie sa snaží podstatnú konfiguráciu zobrazíť na jednej obrazovke. Obsahuje 3 stereo oscilátory, ktoré majú na výber 128 rôznych tvarov signálu, široké možnosti nastavenia (frekvencia, symetria, stereo hĺbka a iné) a modulácie (FM, AM, PWM). Každý z oscilátorov tiež disponuje vlastným sub-oscilátorom (generuje signál o jednu oktávu nižšie) s obdĺžnikovým priebehom. Nástroj má hlavný analógovo modelovaný filter s nastaviteľným charakterom a samostatným modulom pre skreslenie. Filter má tiež vlastný generátor obálky a oscilátor LFO pre moduláciu jeho parametrov. Nástroj obsahuje aj ďalší doplnkový filter s nastaviteľným charakterom bez rezonancie. Pre modulácie sú k dispozícii 2 nezávislé generátory obálky a 2 oscilátory

¹Low Fidelity effect - simuluje zníženu kvalitu audio záznamu

²<http://www.robpapen.com/albino-3.html>

LFO. Nastavenie modulácií je podobne ako u Albina realizované pomocou modulačnej matice. Tiež obsahuje pokročilý Arpeggiator a master sekciu pre nastavenie spôsobu hrania (Unison, Legato, Mono, Poly, Arp). Syntetizátor disponuje aj obrovskou škálou veľmi kvalitných vstavaných efektov (Mono Delay, Stereo Delay, Comb, Reverb, Chorus, Flanger, Phaser, Wah, Distortion, LoFi, Waveshaper, Autopan, Gator, Vocoder a iné). Predator je výnimočný svojím pokročilým nastavením, ktoré obsahuje rôzne parametre pre modelovanie analógového charakteru a zmenu chovania parametrov.³

5.2 reFX Vanguard a Nexus

Vanguard je syntetizátor, ktorý sa užívateľovi snaží čo možno najviac uľahčiť jeho prácu, ale zároveň ponúknuť širokú paletu výstupných zvukov. Výhodou tohto nástroja je prehľadný dizajn, ktorý neobsahuje veľa parametrov a je preto pre užívateľov veľmi prívetivý. Obsahuje 3 oscilátory, ktoré majú nastaviteľnú hlasitosť, frekvenciu a 31 rôznych tvarov výstupnej vlny. Ďalej analógový filter s 13 typmi charakteru a rezonanciou. Sekcia výstupného zosilňovača obsahuje nelineárne skreslenie s kvalitným hutným zvukom. Pre modulácie slúžia 2 generátory obálky a 3 oscilátory LFO. Možnosti modulácie sú ale pevne dané a nie je možné ich ľubovoľne meniť. Inštrument obsahuje vstavané Delay, Reverb a Trance Gate (brána riadená rytmickým vzorom) efekty. Užívateľ má k dispozícii jednoduchý Arpeggiator.⁴

Nexus využíva princípy Wavetable syntézy, pričom pre svoju činnosť potrebuje knižnicu zvukových nahrávok. Tento spôsob implementácie zvukovej syntézy je momentálne veľmi rozšírený a nie je nutne orientovaný len na syntézu zvuku reálnych nástrojov (gitara, husle, klavír a iné). Je možné nahráť zvukové stopy z akéhokoľvek zdroja a vložiť ich ako zdrojový audio signál. To je veľká výhoda tohto prístupu, pretože náročnosť na výpočtový výkon nie je závislá na zložitosti generovaného výstupného signálu. Nevýhodou je, že samotné knižnice zaberajú o niečo viac miesta na disku a aj v pamäti. Knižnice je možné dynamicky pridávať poprípade odoberať. Nexus poskytuje radu nástrojov pomocou, ktorých môže užívateľ modifikovať výsledný zvuk. K dispozícii je kvalitný filter, vstavané efekty, Arpeggiator, Trance Gate a možnosť modulácie niektorých parametrov.⁵

5.3 NI Massive

Technicky veľmi vyspelý hybridný syntetizátor, ktorý obsahuje 3 plne konfigurovateľné oscilátory, generátor šumu a modul, ktorý pracuje so spätnou väzbou. Massive tiež disponuje veľmi kvalitnými filtermi a vstavanými efektmi. Možnosti modulácie tohto syntetizátoru sú takmer neobmedzené. Vnútorne zapojenie jednotlivých modulov je pomerne komplikované a je možné ho čiastočne re-konfigurovať. Oproti predchádzajúcim zmieneným má tento nástroj pokročilé viac-stavové generátory obálky.⁶

³<http://www.robpape.com/predator.html>

⁴<https://refx.com/products/vanguard/summary/>

⁵<https://refx.com/products/nexus/summary/>

⁶<http://www.native-instruments.com/en/products/komplete/synths-samplers/massive/>

5.4 Cakewalk Zeta+

Tento nástroj je určený pre tých najnáročnejších užívateľov. Poskytuje 6 nezávislých oscilátorov s množstvom použiteľných tvarov vlny a možnosťou konfigurácie, 2 analógovo navrhnuté filtre, 6 oscilátorov LFO, 6 generátorov obálky, Arpeggiator, množstvo zabudovaných efektov a plne konfigurovateľnú modulačnú maticu. Všetky uvedené moduly majú oproti tradičným parametrom aj rozšírené možnosti konfigurácie. Nevýhodou takto konštruovaných syntetizátorov je ich zložitosť nastavenia.⁷

5.5 Lennar Digital Sylenth1

Sylenth1 je syntetizátor s hutným analógovým zvukom, ktorý mu dodávajú jeho veľmi dobre navrhnuté filtre. Nástroj má 4 kvalitné oscilátory s analógovým tvarom jednotlivých vln. Možnosť využiť až 512 hlasov v Unison móde. Oscilátory je možné smerovať do jedného poprípadе oboch rezonančných filtrov. Pre moduláciu sú dostupné 2 generátory obálky a 2 oscilátory LFO. Spôsob modulácie sa nastavuje pomocou 16 modulačných slotov. Sylenth1 obsahuje Arpeggiator a radu vstavaných efektov s pevne definovaným zapojením. Syntetizátor je veľmi dobre optimalizovaný.⁸

5.6 U-he Zebra

Predstavuje „bezdrôtový modulárny syntetizátor“ (hardvérové modulárne syntetizátory zabezpečujú prepojenie jednotlivých modulov pomocou externých káblov), ktorého možnosti audio syntézy sú takmer neobmedzené. Obsahuje veľké množstvo vysoko kvalitných stereo zvukových modulov, ktorých prepojenie je konfigurovateľné za behu aplikácie. Takmer každý parameter je možné použiť ako cieľ modulácie a napriek zložitosti je tento nástroj vynikajúco optimalizovaný. Je to syntetizátor vhodný pre náročných skladateľov, poprípadе zvukových dizajnérov, ktorý vyžadujú neobmedzené možnosti a veľkú mieru flexibility.⁹

5.7 Zhrnutie

Aktuálne je na trhu dostupné veľké množstvo virtuálnych syntetizátorov s rôznymi vlastnosťami. Väčšina z nich využíva hybridný spôsob zvukovej syntézy a má spoločné charakteristické črty, ktoré dopĺňa o nejaké špecifické vlastnosti. Čím je syntetizátor komplexnejší, je jeho ovládanie náročnejšie, no je schopný ponúknuť širšiu paletu zvukov. Od kvality výstupného signálu a flexibility sa odvíja celková spotreba a náročnosť syntetizátoru na výpočtový výkon. Z tohto dôvodu sa niektoré syntetizátory špecifikujú len na určitý typ zvukov, alebo využívajú Wavetable syntézu s použitím audio knižníc, kde tento problém nevzniká. Informácie o jednotlivých syntetizátoroch boli získané na základe testovania demo alebo plných verzií produktov a z ich užívateľských manuálov.

⁷<http://www.cakewalk.com/Products/Z3TA/>

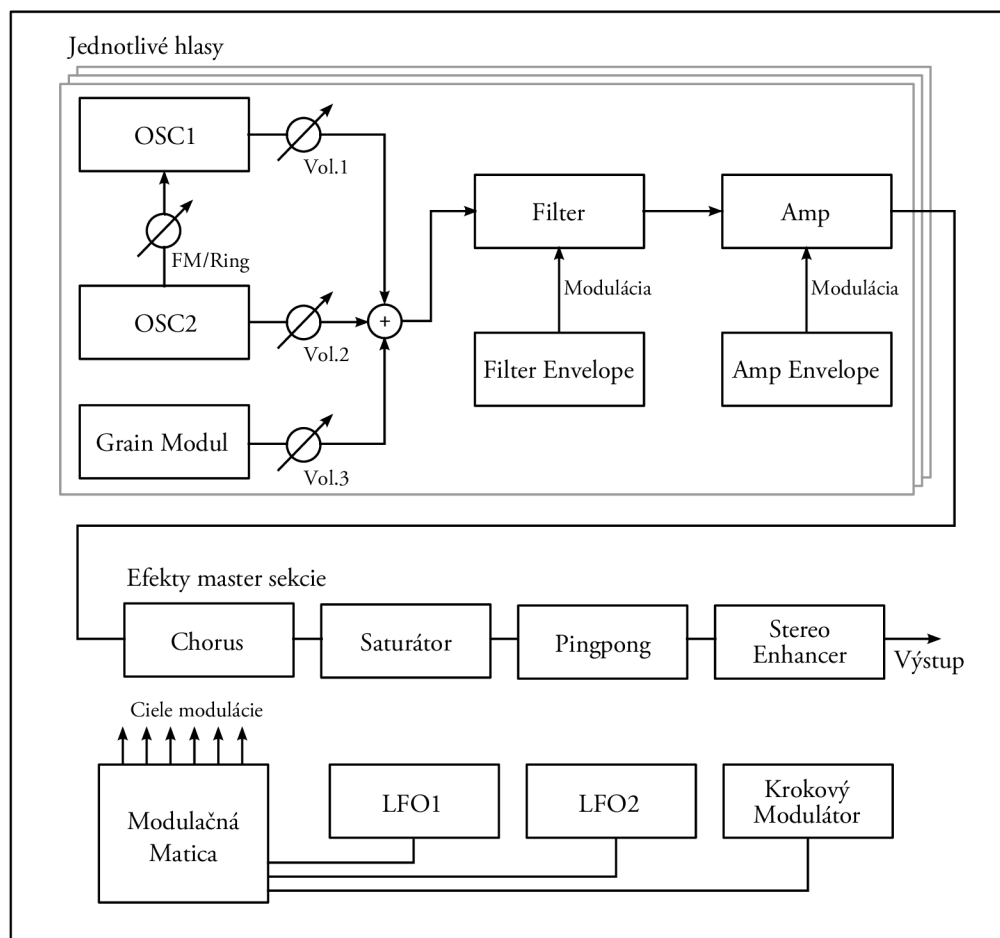
⁸<http://www.lennardigital.com/modules/sylenth1/>

⁹<http://www.u-he.com/cms/zebra>

Kapitola 6

Návrh syntetizátoru

Návrh implementovaného syntetizátoru sa snaží spojiť špecifické vlastnosti rôznych metód syntézy zvuku, ktoré boli popísané v predchádzajúcich kapitolách a vytvoriť tak jedinečný nástroj, ktorý je možné použiť pri tvorbe hudby alebo zvukových efektov. Keďže sú pri návrhu využité rôzne metódy zvukovej syntézy, je možné tento syntetizátor označiť ako hybridný. Bloková schéma návrhu je znázornená na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Bloková schéma syntetizátoru

Návrh nástroja bol inšpirovaný viacerými komerčne dostupnými, ale aj voľne šíriteľnými softvérovými syntetizátormi, ktoré boli bližšie priblížené v kapitole 5. Tiež boli skúmané hardvérové syntetizátory (Moog, Korg) a niektoré ich vlastnosti ako možnosti zvukovej syntézy, možnosti modulácie, kvalita výstupného audio signálu, celková spotreba výkonu, spôsob ovládania a užívateľské rozhranie, či použité efekty a ďalšie špecifické vlastnosti. Hlavným cieľom návrhu bolo poskytnúť užívateľovi jednoduchý a intuitívny prístup k tvorbe jednoduchých, ale aj komplexných zvukov s využitím moderných syntetizačných metód. Syntetizátor sa zameriava na tvorbu elektronickej hudby ako Trance, Techno, Dubstep, Ambient, Drum and Bass, Industrial či Psychedelic. Jeho celkový princíp tvorby zvuku je prispôsobený tomuto účelu. Inštrument nevyužíva žiadne nahrávky živých nástrojov, ani iné podobné techniky. Je zameraný na čisto digitálnu audio syntézu. Polyfónna realizácia disponuje celkom 8 nezávislými hlasovými modulmi, ktoré sú schopné hrať samostatne alebo spolu. Týmto spôsobom je možné pomocou syntetizátoru generovať rytmické vzory a hudobné motívy, ktoré sú v elektronickej hudbe veľmi rozšírené, poprípade hrať akordy (viac tónov súčasne). Štruktúru syntetizátoru je možné rozdeliť do niekoľkých častí:

- Zdroje zvuku
- Filter a zosilňovač
- Výstupné efekty
- Modulačná matica a zdroje modulácie

Nasledujúce podkapitoly stručne popisujú jednotlivé časti a ich vzájomnú spoluprácu pri tvorbe výsledného zvuku syntetizátoru. Špecifickým implementačným detailom je venovaná samostatná kapitola.

6.1 Oscilátory

Predstavujú klasické zdroje zvuku, ktoré je možné nájsť takmer v každom syntetizátore. Dostupné sú 2 samostatné plne funkčné moduly, u ktorých je možné nastaviť posun hranej oktávy v rozsahu -2 až +2 a podobne tónu od -7 do +7 poltónov. Tiež je možné pre každý oscilátor nastaviť jeho hlasitosť a prípadné reštartovanie. Reštartovanie oscilátora znamená, že sa pred hraním každej novej noty jeho fáza reštartuje do počiatočného bodu. Týmto sa stane oscilátor tzv. stabilným a každá zahraná nota znie rovnako v prípade, že nieje použitá iná forma modulácie. U starších analógových syntetizátorov boli oscilátory ako elektronické obvody uvedené do činnosti nepretržite a ich fáza sa pri hraní nemenila. Takéto chovanie je pre modul možné vynútiť nastavením a dodáva výslednému zvuku prirodzenejší charakter. Existujú však druhy zvukov, kde táto vlastnosť nie je žiadúca, pretože výsledný syntetizovaný zvuk stráca svoju razanciu. Problém je možné pozorovať u basových liniek, pre ktoré sa u starších analógových syntetizátorov používala metóda sámplovania. Pre generovanie je možné zvoliť jeden z 5 rôznych tvarov vlny:

1. Sin - klasický sínusový priebeh bez vyšších harmonických frekvencií, je vhodný pre rôzne účely od rozvíjajúcich sa modulovaných efektov, až po použitie modulu ako sub-oscilátor pre hlboké basové textúry.
2. Saw - pílovitý priebeh, bohatý na harmonické frekvencie vhodný pre syntetizovanie strunových nástrojov, basových liniek, či iných efektov s bohatým frekvenčným spektrom.

3. Ramp - obrátený pílovitý priebeh, má podobné využitie ako predchádzajúci tvar avšak mierne odlišný charakter.
4. Square - obdĺžnikovitý priebeh, vhodný pre syntetizovanie dychových nástrojov.
5. Triangle - trojuholníkovitý priebeh, má podobné využitie ako sínusový a pomerne často sa používa na syntetické bubny.

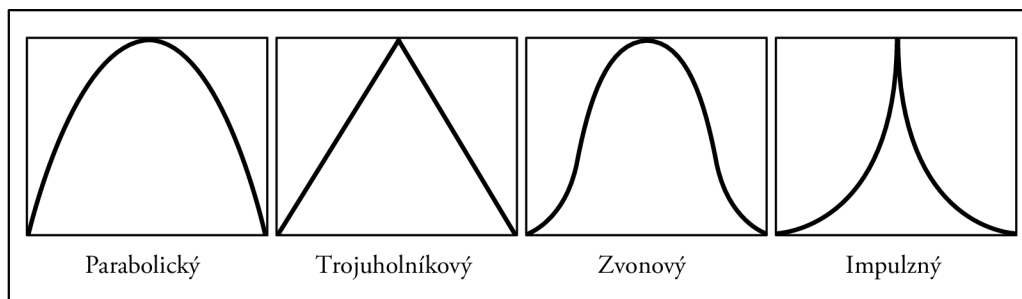
Počet modulov bol zvolený optimálne vzhľadom na dostupnosť FM a Ring modulácie, možnosti kombinovať rôzne priebehy, za účelom vytvorenia zložitejších tvarov vln a tiež schopnosti využiť jeden z modulov ako sub-oscilátor. Zvolený návrh tiež umožňuje užívateľovi používať pre svoj zvukový dizajn iba jeden modul. Hlasitosť druhého môže nastaviť na najnižšiu hodnotu, čím jeho zvuk úplne zanikne. Modulácie medzi OSC1 a OSC2 fungujú, aj keď je hlasitosť OSC2 na minime. Povolenie Ring modulácie je konfigurovateľné za behu pomocou prepínača a hĺbka FM modulácie je ovládateľná pomocou otočného potenciometra. Podpora pre tieto 2 typy modulácie bola zvolená pre ich veľmi rozšírené používanie v tvrdších žánroch elektronickej hudby.

6.2 Granulárny modul

Doplňuje syntetizátor o možnosť využitia granulárnej syntézy. Tento druh audio syntézy je známy už pomerne dlhú dobu a sú na trhu dostupné aj nástroje, ktoré tento princíp využívajú, no napriek tomu je medzi užívateľmi menej rozšírená. Jednoduchý experimentálny modul ponúka užívateľovi rýchly prístup k rôznym zvukovým efektom, či bohatým atmosférickým textúram. Väčšinu hudobníkov a zvukových návrhárov od tejto syntézy odrádza pomerne veľké množstvo nastaviteľných parametrov, pričom zmena niektorého z parametrov väčšinou vyvoláva ťažko predvídateľný výsledný zvukový signál. Uvedený problém sa granulárny modul snaží riešiť tým, že ako zdroj signálu využíva klasický oscilátor, ktorý má podobný spôsob nastavenia ako oscilátory spomenuté v predchádzajúcej sekcii, a na ovládanie výsledného prúdu zrníčok používa minimálne množstvo pridaných konfigurovateľných parametrov. Modul je však navrhnutý tak, aby ho menší počet ovládacích prvkov neznevýhodňoval. Možnosti nastavenia sú nasledovné:

- Nastavenie zdroja zvuku (oscilátora):
 1. Tvar vlny (Sin, Saw, Ramp, ...)
 2. Bázová frekvencia - oscilátor je naladený na statickú frekvenciu a hraná nota na neho nemá vplyv.
 3. Hlasitosť - ovplyvňuje celkovú hlasitosť výstupu modulu.
- Nastavenie prúdu zrníčok:
 1. Variácia frekvencie - určuje veľkosť zmeny bázevej frekvencie oscilátora pre jednotlivé zrníčka.
 2. Variácia hlasitosti - určuje veľkosť zmeny amplitúdy jednotlivých zrníčok.
 3. Variácia oneskorenia - určuje zmeny oneskorenia medzi jednotlivými generovanými zrníčkami audio signálu.
 4. Veľkosť zrníčok - udáva dĺžku trvania zrníčok (1 až 25 ms) a je pre všetky zhodná.

5. Tvar amplitúdovej obálky - prispôsobuje tvar jednotlivých zrníčok, nastaviteľné tvary amplitúdových obálok je možné vidieť na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Tvary amplitúdovej obálky granulárneho modulu

Pomocou rôznych kombinácií nastavenia je možné vytvoriť organické zvukové atmosféry, menej spojité ruchy pripomínajúce zvuky prostredia, či syntetické perkusné nástroje (tamburína, šejker a iné). Modul dopĺňa syntetizátor o veľmi unikátnu paletu zvukových efektov.

6.3 Filter

Filter je jedným z najzákladnejších stavebných blokov a je prítomný takmer v každom kvalitnom syntetizátore. Jeho úlohou je upraviť frekvenčné spektrum generované pomocou zdrojov zvuku. Hlavný dôraz pri návrhu filtrov pre syntetizátory sa kladie na jeho analógový charakter a možnosť nastavenia veľkosti rezonancie.

Návrh použitého filtra vychádza z analógového modelu, ktorý napodobňuje reálny filter používaný v syntetizátoroch od spoločnosti Moog [7]. Je možné zvoliť jeden z nasledujúcich typov frekvenčnej odozvy:

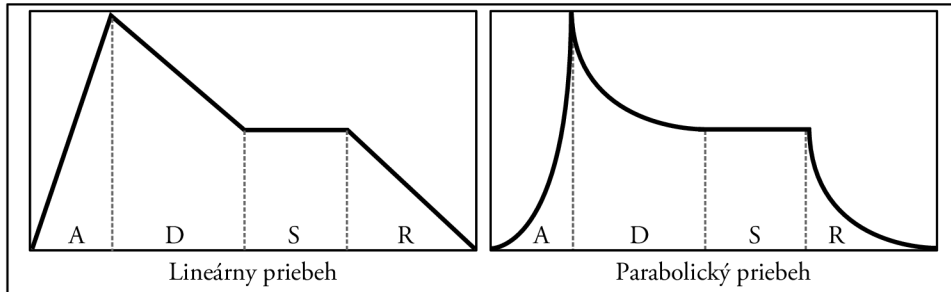
- LP - dolná priepusť so strmou 24 dB.
- BP - pásmová priepusť so strmou 12 dB.
- HP - horná priepusť so strmou 24 dB.

Veľkosť rezonancie je nastaviteľná za behu aplikácie a dodáva filteru ostrejší výsledný zvuk. Filter nie je konštruovaný tak, aby sa pri vysokej hodnote rezonancie stal oscilujúcim. Rozšírením modulu je samostatný generátor obálky so štandardným nastavením a parametrom, ktorý určuje hĺbku modulácie medznej frekvencie filtra. Generátor je schopný generovať lineárny alebo parabolický priebeh výstupného signálu medzi jeho stavmi. Priebehy zobrazuje obrázok 6.3.

6.4 Zosilňovač

Jedná sa o štandardný blok syntetizátorov, ktorý slúži na tvarovanie amplitúdy a tiež určuje celkovú hlasitosť výstupného audio signálu hlasového modulu. Hlasitosť je ovplyvňovaná generátorom obálky a hlasitosťou hranej noty (určuje sila s akou je klávesa stlačená, MIDI Velocity). Generátor amplitúdovej obálky má nastaviteľnú dĺžku stavu Attack, Decay, Release

a tiež hodnotu amplitúdy pre stav Sustain. Podobne je možné zvoliť lineárny alebo parabolický priebeh amplitúdy medzi jednotlivými stavmi. Tvary priebehov sú znázornené na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Tvary modulačnej obálky pre zosilňovač a filter

6.5 Použité efekty

Pre dodanie väčšej zvukovej hĺbky do celkového výstupu syntetizátoru, bola navrhnutá a implementovaná sekcia koncových efektov. Tieto efekty sú svedomito vyberané s ohľadom na ich prínos a obľúbenosť medzi užívateľmi. Z pomerne veľkej množiny používaných zvukových efektov boli do návrhu zaradené:

1. Chorus - dodáva zvuku mohutnejší a mierne organický charakter. Výsledný dopad efektu závisí od nastavenia. Unikátnosťou tohto modulu je jeho špeciálne navrhnutý zdroj modulácie. Užívateľ má možnosť konfigurovať frekvenciu modulátoru, hĺbku modulácie a pomer miešania výstupu efektu a vstupného signálu tzv. mix. Modul je tiež možné pomocou prepínača úplne vyradiť z činnosti, čím sa ušetrí výpočtový výkon v prípade, že ho užívateľ nechce použiť.
2. Saturátor - efekt spôsobuje nelineárne skreslenie amplitúdy signálu, čím do výsledného zvuku dodáva vyššie harmonické frekvencie. Výsledný zvuk je ostrejší a výraznejší. Na výber sú 4 rôzne typy saturácie. Každá ma iný charakter a je vhodná pre iný účel. Efekt má tiež parameter, ktorým sa určuje zosilnenie vstupného signálu pred prechodom cez nelineárny prvok. Pomocou týchto konfiguračných parametrov je možné dosiahnuť jemnej saturácie signálu, ale aj tvrdého skreslenia. Tento modul svojím spôsobom dopĺňa výstupné zosilňovače jednotlivých hlasových modulov a obohacuje ich o podobnú vlastnosť, ktorú je možné vidieť u elektrónkových zosilňovačov.
3. Pingpong delay - tento typ efektu oneskorenia bol zvolený preto, aby dodal do syntetizovaného mono signálu stereo hĺbku, tým že ozvena efektu prechádza z ľavého kanálu stereo signálu do pravého a naopak. Stereo šírka tohto efektu je konštantne nastavená na maximálnu hodnotu tým, že výstupy jednotlivých bufferov idú vždy len do jedného zo stereo kanálov. Efekt má modifikovateľnú dĺžku oneskorenia (1 až 800 ms), veľkosť spätnej väzby a parameter pre mix. Podobne ako efekt Chorus je aj tento modul možné úplne vyradiť z činnosti.
4. Stereo enhancer - poskytuje jednoduché rozšírenie stereo hĺbky signálu. Hĺbka je konfigurovateľná pomocou parametra. Bol do návrhu pridaný potom, ako sa ukázala

potreba generovať stereo signál bez delay efektu. Oba efekty je samozrejme možné kombinovať a užívateľ nie je ich používaním nijako obmedzovaný.

6.6 Možnosti modulácie

Bez použitia techník modulačnej syntézy, by bol výsledný generovaný zvuk nástroja veľmi monotónny. Na riešenie tohto problému je syntetizátor schopný niektoré svoje parametre modulovať pomocou rôznych modulačných zdrojov. Použiteľné modulačné zdroje sú:

- LFO - klasický nízkofrekvenčný oscilátor. Syntetizátor obsahuje 2 nezávislé moduly, ktoré sú konštruované ako voľné (freerun). To znamená, že ich stav sa dynamicky mení nezávisle na prichádzajúcich MIDI udalostiach. U každého modulu je možné nastaviť jeho frekvenciu výstupného signálu a tvar vlny (sin, saw, ramp, square, triangle).
- Krokový modulátor - modulačný zdroj, ktorý má synchronizované tempo s hosťovskou aplikáciou a pozostáva zo 16 stavov. Každý stav má konfigurovateľnú amplitúdu generovaného signálu. Strmosť prechodov medzi jednotlivými stavmi je modifikovateľná pomocou parametru, podobne ako dĺžka trvania jedného stavu. Nastaviteľné dĺžky stavov sú odvodené od aktuálneho tempa hosťovskej aplikácie a pravidelne sa aktualizujú. Tento zdroj je špeciálne použitý pre zápornú moduláciu celkovej amplitúdy syntetizátoru čím vzniká tzv. gater efekt. Hĺbka tejto modulácie je konštantne nastavená na maximálnu hodnotu. Ovplyvňovanie výslednej amplitúdy je možné vypnúť pomocou prepínača.
- Generátory obálky - možnosť modulovať frekvenciu filtra a amplitúdu zosilňovača.

Zdroje modulácie je možné aplikovať na niekoľko parametrov. Momentálne je syntetizátor schopný aplikovať len kladnú moduláciu na nasledujúce ciele:

- Frekvencia OSC1
- Frekvencia OSC2
- Hĺbka FM
- Frekvencia filtra
- Rezonancia filtra

Ako najprehľadnejší a zároveň najmenej obmedzujúci prístup k ovládaniu jednotlivých modulácií sa ukázalo použitie modulačnej matice. Pomocou matice môže užívateľ dynamicky vytvárať alebo rušiť jednotlivé modulačné spojenia. Veľkosť matice bola obmedzená na 6 samostatných slotov. Tento počet je vzhľadom na možnosti smerovania dostačujúci pre jednoduché ale aj komplikovanejšie nastavenia. Každý slot disponuje nastavením zdroja, cieľa a hĺbky modulácie.

6.7 Užívateľské rozhranie

Aby bolo možné syntetizátor lepšie otestovať, bolo navrhnuté a implementované jednoduché užívateľské rozhranie. Toto rozhranie využíva základné stavebné prvky ako otočné alebo posuvné potenciometre, prepínače a výberové menu, pre sprístupnenie základnej konfigurácie samotného modulu pre zvukovú syntézu. Dôraz pri práci bol kladený hlavne na kvalitu zvuku a možnosti zvukovej syntézy, preto je užívateľské rozhranie implementované len veľmi skromne. Bližší popis, spolu s ilustračnými fotografiami častí rozhrania, je možné nájsť v prílohe **B**.

Kapitola 7

Implementácia

Táto kapitola bližšie popisuje jednotlivé bloky návrhu, problémy, ktoré sa pri riešení vyskytli a niektoré špecifické implementačné detaily. Celá práca je implementovaná v jazyku C++ a využíva VSTSDK framework od spoločnosti Steinberg. Tento framework je voľne stiahnuteľný na stránkach spoločnosti.¹ Pri návrhu implementácie bol použitý objektovo orientovaný prístup a každý väčší modul predstavuje samostatnú triedu. Kritické časti kódu, kde sa vyžaduje vysoká efektivita, sú realizované pomocou makier, inline funkcií, rozvíjania cyklov a podobných optimalizačných techník. Napriek tomu by však pre dosiahnutie uspokojivej miery optimalizácie bolo nutné použiť efektívnejšie metódy ako napríklad spracovanie pomocou inštrukcií SSE (Streaming SIMD Extensions - rozšírená sada inštrukcií pre urýchlenie spracovania dát). Toto momentálne v práci nie je implementované.

7.1 Oscilátory

Oscilátory sú implementované pomocou vyhľadávacej tabuľky. Týmto spôsobom sa značne ušetrí výpočtový výkon, ktorý by bol nutný pri počítaní hodnôt jednotlivých tvarov výstupných vln. Pre každý tvar vlny je uložených 128 tabuliek (pre každú notu) po 1024 vzoriek. Nutnosť ukladať tabuľku pre každú notu (frekvenciu) zvlášť vyplýva zo vzorkovacieho teorému, pretože pri vlnách bohatých na harmonické frekvencie, ako je pílovitý alebo obdĺžnikový priebeh, by dochádzalo k výraznému skresleniu v prípade, že by sa počet navzorkovaných harmonických frekvencií neznižoval so stúpajúcou frekvenciou základného tónu. Z tohto tiež vyplýva fakt, že čím je frekvencia hranej noty vyššia tým sa viac výstupný signál blíži k sínusovému priebehu napriek tomu, že je oscilátor nastavený na generovanie pílovitého alebo iného priebehu. Hodnoty v tabuľkách sa vypočítajú vždy po spustení modulu a uložia sa do statickej premennej, takže sú pre všetky oscilátory zdieľané. Pre výpočet hodnôt jednotlivých údajov v tabuľke sú použité nasledujúce vzťahy:

$$y_{sin}(t) = \sin(t) \quad (7.1)$$

$$c = \left(\cos \left((i-1) \frac{\pi}{2N} \right) \right)^2 \quad (7.2)$$

$$y_{saw}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{i} \sin(it) c, \quad y_{ramp}(t) = -y_{saw}(t) \quad (7.3)$$

¹<http://www.steinberg.net/en/company/developer.html>

$$y_{sqr}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{i} \sin(it) c, \quad y_{tri}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{i^2} (-1^{0.5i-0.5}) \sin(it) c \quad (7.4)$$

kde $y_{sin}(t)$ je hodnota sínusového tvaru vlny, čo odpovedá klasickej sínusovej funkcii, $y_{saw}(t)$ je hodnota pílovitého priebehu, $y_{ramp}(t)$ je hodnota prevráteného pílovitého signálu, $y_{sqr}(t)$ je hodnota obdĺžnikového priebehu, $y_{tri}(t)$ je hodnota trojuholníkového priebehu, t je čas, c je koeficient, ktorý dodáva oscilátorom špecifický charakter a zmierňuje zvlnenie, i je číslo harmonickej frekvencie, pričom u obdĺžnikového a trojuholníkového priebehu sa pripočítavajú iba nepárne harmonické a N je celkový počet harmonických frekvencií pre daný tvar vlny. Tento počet je obmedzený na hodnotu 200 a pri vyšších frekvenciách sa táto hodnota znižuje tak, aby nedošlo k prekročeniu vzorkovacieho teóremu.

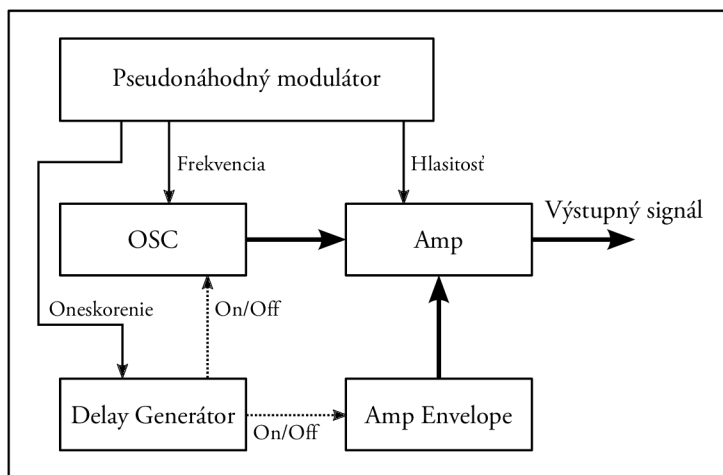
Aby bolo možné z tabuľky generovať priebeh s požadovanou vzorkovacou frekvenciou a požadovanou bázovou frekvenciou výstupného signálu, využíva sa lineárna interpolácia medzi susednými vzorkami uloženými v tabuľke. Táto metóda bola zvolená pre jej uspokojivú kvalitu a nižšiu náročnosť oproti interpolačným metódam vyšších rádov. Frekvenčná modulácia oscilátorov je riešená jednoduchou zmenou kroku v tabuľke, pričom sa odchýlka vždy počíta vzhľadom k základnej frekvencii aktuálne hranej noty. Pre zamedzenie skreslenia pri vysokej hĺbke modulácie sa tiež dynamicky prepína tabuľka, z ktorej sa hodnoty čítajú. To znamená, že ak sa vplyvom modulácie frekvencia oscilátora z bázovej frekvencie aktuálne hranej noty zvýši na nastavenú hranicu, index tabuľky, z ktorej sa hodnoty čítajú, sa prepne na tabuľku vyššej frekvencie. Výstupom oscilátorov je monofónny signál v rozmedzí hodnôt $\langle -1.0, 1.0 \rangle$.

7.2 Granulárny modul

Predstavuje zdroj zvuku, ktorý využíva princípy granulárnej syntézy. Tento modul používa ako zdroj signálu jeden oscilátor popisovaný vyššie. Pre zmeny parametrov jednotlivých zrníčok slúži modulačný buffer, náhodne vygenerovaných hodnôt, ku ktorému má každý parameter pridelený index pre čítanie. Každé zrníčko má vlastnú frekvenciu, amplitúdu a oneskorenie s akým je generované. Spoločnými parametrami pre všetky zrníčka sú dĺžka trvania grainu, tvar amplitúdovej obálky a bázová frekvencia. Pri generovaní nového zrníčka sa posunú indexy a tým sa získajú nové hodnoty jednotlivých parametrov. Týmto spôsobom sa získa prúd pseudonáhodných hodnôt, ktorého perióda pre 1 parameter sa rovná veľkosti modulačného bufferu, čo je 1024 položiek. Výhodou tohto riešenia je nízka náročnosť na výpočtový výkon, pretože hodnoty sa z bufferu pri generovaní iba čítajú a nie je tu nutné použiť ani interpolačnú metódu. Fázovú zhodu susedných zrníčok zabezpečuje amplitúdová obálka, ktorá začína aj končí vždy na hodnote 0. Tvar obálky je podobne ako modulácie uložený v pamäti a hodnoty sa menia len pri jeho zmene alebo pri zmene dĺžky jedného grainu. Vzhľadom k tomu, že ako zdroj zvuku sa využíva klasický oscilátor je výstup tohto modulu tiež monofónny. Blokovú schému zapojenia granulárneho modulu znázorňuje obrázok 7.1.

Signál z oscilátora (OSC) je upravený pomocou aktuálne zvolenej amplitúdovej obálky. Frekvenciu oscilátora ovplyvňuje parameter bázovej frekvencie (konfigurovateľný pomocou GUI) a odchýlka získaná z pseudonáhodného modulátora, ktorá je vážená hodnotou parametra pre variáciu frekvencie (konfigurovateľný pomocou GUI). Generovanie signálu z oscilátora riadi generátor oneskorenia (Delay Generátor). Veľkosť oneskorenia pre jednotlivé zrníčka je dynamicky modifikovaná podobne ako frekvencia oscilátora. Rozdiel je v tom, že

oneskorenie je modifikované pomocou iných pseudonáhodných hodnôt a parametra hĺbky variácie. Rovnakým spôsobom je upravovaná aj celková hlasitosť zrníčok.



Obr. 7.1: Bloková schéma granulárneho modulu

7.3 Filtre

V rámci implementácie boli použité 2 druhy filtrov, ktoré majú mierne odlišné vlastnosti. Popis implementácie oboch variant použitých filtrov obsahujú nasledujúce podkapitoly.

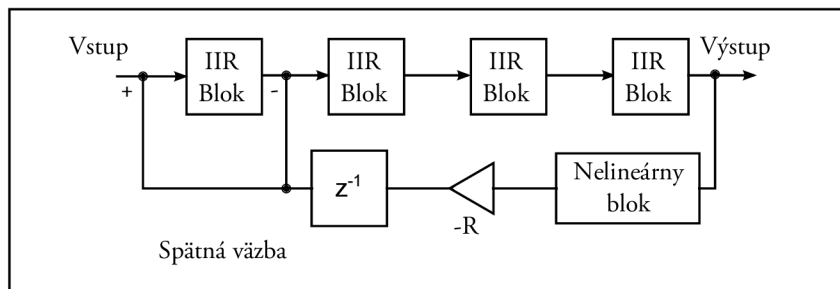
7.3.1 „Analogový“ rezonančný filter

Tento filter slúži ako hlavný filter syntetizátoru a jeho implementácia vychádza z návrhu, ktorý sa snaží napodobniť charakter analogových filtrov. Tento filter má okrem nastavenia typu a frekvencie ešte aj parameter pre nastavenie veľkosti rezonancie. Návrh bol inšpirovaný digitalizáciou známeho Moog filtra [7]. Bloková schéma je na obrázku 7.2. Filter pozostáva zo 4 IIR blokov a zápornej spätnej väzby, podobne ako Moog, avšak implementácia samotných blokov je iná. Každý IIR blok je samostatný jedнопólový filter, ktorého charakter sa mení podľa nastavenia parametrov. Bloky majú strmosť 6 dB, čo pri sériovom zapojení dáva celému filteru strmosť 24 dB na oktávu v prípade, že je zvolený typ filtra horná alebo dolná priepusť, kedy majú všetky 4 bloky rovnaký charakter. Pri pásmovej priepusti pracujú 2 bloky ako horná priepusť a 2 bloky ako dolná priepusť.

Vplyvom tohto zapojenia vzniká značný útlm v priepustnom pásme oproti 2 predchádzajúcim variantom. Na zmiernenie tohto nežiaduceho javu bola použitá jednoduchá kompenzácia, ktorá násobí výstup filtra konštantou 6.0. Hodnota tejto konštanty bola stanovená empiricky. Výstup IIR bloku je daný vzťahom:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n - 1] - a_1y[n - 1] \quad (7.5)$$

kde $y[n]$ je hodnota na výstupe filtra, $x[n]$ je hodnota na vstupe filtra, $[n - 1]$ označuje predchádzajúcu hodnotu vstupu alebo výstupu a b_0 , b_1 a a_1 sú koeficienty, ktoré určujú



Obr. 7.2: Bloková schéma analógového filtra

charakter a medznú frekvenciu filtra. Výpočet koeficientov pre dolnú priepusť je realizovaný nasledovne:

$$w = \tan\left(\pi \frac{f_c}{f_s}\right), \quad n = \frac{1}{1+w} \quad (7.6)$$

$$a_1 = n(w-1) \quad (7.7)$$

$$b_0 = wn, \quad b_1 = b_0 \quad (7.8)$$

kde w a n sú pomocné koeficienty, ktoré sa používajú pri výpočte a sú spoločné pre dolnú aj hornú priepusť, f_c je medzná frekvencia filtra a f_s je vzorkovacia frekvencia s akou filter pracuje. Pre hornú priepusť sa koeficienty počítajú takto:

$$b_0 = n, \quad b_1 = -b_0 \quad (7.9)$$

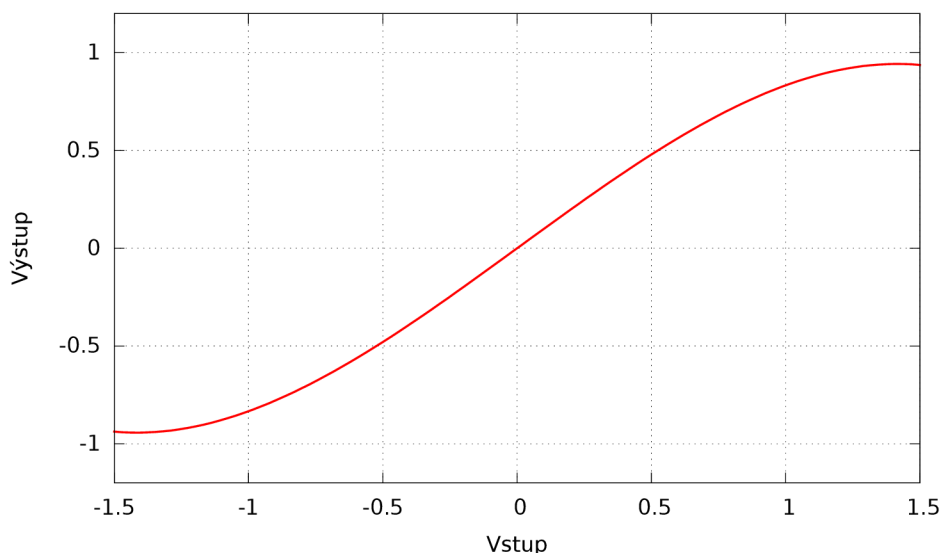
Koeficient a_1 je pre oba typy filtrov rovnaký. Pri každej zmene nastavenia filtra je nutné koeficienty prepočítať. Aby sa tieto výpočty zrýchlili, sú všetky koeficienty potrebné pre činnosť filtra spočítané pri inicializácii a uložené do tabuľky. V tabuľke je uložených 20 000 koeficientov čo odpovedá možnosti nastaviť medznú frekvenciu filtra v intervale 1–20 000 Hz s presnosťou na 1 Hz. Aby bolo možné nastaviť akúkoľvek frekvenciu z tohto rozsahu je použitá lineárna interpolácia. Týmto riešením sa ušetrila náročná operácia pre výpočet hodnoty funkcie $\tan()$, čo hrá významnú úlohu pri použití modulácie na medznú frekvenciu filtra. Tabuľka koeficientov je podobne ako u oscilátorov implementovaná pomocou statických atribútov objektu a je pre všetky inštalácie filtra rovnaká [7].

Samotné IIR bloky nemajú možnosť pre nastavenie veľkosti rezonancie, preto bola zavedená záporná spätná väzba, ktorá obohacuje filter o túto vlastnosť. Vetva spätnej väzby pozostáva z nelineárneho bloku, záporného zosilnenia R a bufferu o veľkosti 1 vzorku. Nelineárny blok dodáva filteru analógový charakter a hodnota jeho výstupu $y[n]$ sa získa zo vstupu $x[n]$ nasledujúcim vzťahom:

$$y[n] = x[n] - x[n]^3 \frac{1}{6} \quad (7.10)$$

Priebeh funkcie je zobrazený na obrázku 7.3. Pri výbere tejto funkcie bol zohľadnený výpočtový výkon a tiež charakter výsledného zvuku oproti iným sigmoidným funkciám (funkcie pripomínajúce písmeno S so stredom v hodnote 0), ktoré sa veľmi často používajú pre implementáciu nelineárneho skreslenia. Veľkosť zosilnenia R udáva veľkosť rezonancie a je možné

ho nastavovať parametrom. Buffer uchováva vždy 1 predchádzajúcu hodnotu čím vzniká oneskorenie. U analógových filtrov tiež dochádza od určitej úrovne vstupného signálu k nasýteniu alebo tzv. saturácii. Táto vlastnosť je simulovaná pomocou jednoduchéj funkcie na vstupe, ktorá má za úlohu orezať všetky hodnoty vyššie ako 1.0 na hodnotu 1.0 a to isté platí pre hodnoty nižšie ako -1.0 , ktoré sú orezané na hodnotu -1.0 . Jedná sa o tzv. tvrdé orezanie (Hard Clipping).



Obr. 7.3: Prenosová funkcia nelineárneho bloku

7.3.2 Filtre bez rezonancie

Tieto filtre predstavujú jednoduché frekvenčné filtre bez možnosti nastavenia rezonancie, ktoré sú využité pri implementácii niektorých efektov. Hlavnou úlohou týchto filtrov je obmedziť šírku frekvenčného spektra, na ktoré sa daný efekt aplikuje. Tieto filtre sú 2-pólové IIR a majú strmúšť 12 dB. Výstup filtra je udaný vzťahom:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n - 1] + b_2x[n - 2] - a_1y[n - 1] - a_2y[n - 2] \quad (7.11)$$

kde $y[n]$ je hodnota výstupu, $x[n]$ je hodnota vstupu, $[n - i]$ odpovedá i -tej predchádzajúcej hodnote vstupu alebo výstupu a b_0, b_1, b_2, a_1, a_2 sú koeficienty, ktoré určujú frekvenciu a charakter filtra. Implementácia umožňuje nastaviť filter na hornú, dolnú alebo pásmovú priepusť. Toto nastavenie sa realizuje pri inicializácii a za behu programu nie je možné ho zmeniť. Zmena frekvencie je možná, ale samotné riešenie nie je optimalizované pre takéto zmeny, ktoré sú vzhľadom na výpočet koeficientov pomerne náročnou operáciou. Výpočet koeficientov je závislý od typu a od nastavenej medznej frekvencie filtra. Spoločné koeficienty pre všetky typy sa počítajú pomocou nasledujúcich vzťahov:

$$w = \tan\left(\pi \frac{f_c}{f_s}\right), \quad n = \frac{1}{w^2 + \frac{w}{Q} + 1} \quad (7.12)$$

$$a_1 = 2n(w^2 - 1), \quad a_2 = n \left(w^2 - \frac{w}{Q} + 1 \right) \quad (7.13)$$

kde w a n sú pomocné koeficienty, f_c je medzná frekvencia filtra, f_s je vzorkovacia frekvencia a Q je koeficient kvality filtra, ktorý je nastavený na hodnotu 0.71, pri ktorej má filter hladkú frekvenčnú odozvu (nedochádza k zvlneniu v priepustnom pásme). Koeficienty pre dolnú priepusť:

$$b_0 = nw^2, \quad b_1 = 2b_0, \quad b_2 = b_0 \quad (7.14)$$

Koeficienty pre hornú priepusť:

$$b_0 = n, \quad b_1 = -2b_0, \quad b_2 = b_0 \quad (7.15)$$

Koeficienty pre pásmovú priepusť:

$$b_0 = n \frac{w}{Q}, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = -b_0 \quad (7.16)$$

Pri návrhu bola uvažovaná aj možnosť implementácie pomocou FIR filtra, ale aby sa zachovali ostré prechody signálu, bola nakoniec zvolená varianta s použitím IIR.

7.4 Zdroje modulácie

Pre syntetizátor boli vytvorené 3 rôzne zdroje modulácie, ktoré majú za úlohu generovať modulačný signál v rozmedzí hodnôt $\langle 0.0, 1.0 \rangle$. Každý má odlišný charakter a hodí sa na iný účel. Samotné nastavenie modulácii je určené modulačnou maticou, ktorá bude popísaná v osobitnej kapitole.

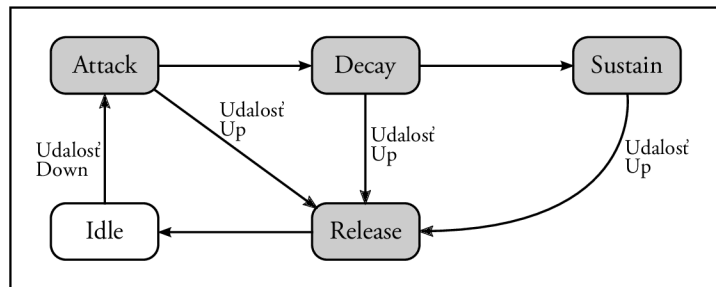
7.4.1 LFO

Predstavuje nízkofrekvenčný oscilátor, ktorý je implementovaný podobne ako oscilátory pre zdroj zvuku, avšak rozdiel je v rozmedzí výstupných hodnôt, nastavení a frekvenčnom rozsahu. Tento oscilátor pracuje na relatívne nízkych frekvenciách, konkrétne v rozsahu od 0.01 Hz do 50 Hz. Z tohto dôvodu nie je nutné mať rôzne tabuľky pre rôzne frekvencie, čím sa ušetrí kapacita pamäti. Vzhľadom k tomu, že zdroj modulácie nevyžaduje tak vysokú kvalitu výstupu ako je tomu u oscilátorov pre zdroj zvuku, sú tabuľky hodnôt menšie. Každá tabuľka pre 1 tvar vlny má 128 hodnôt.

7.4.2 Generátor obálky

Je klasický ADSR (Attack Decay Sustain Release) generátor, ktorý má 4 stavy aktívneho generovania a 1 stav nečinnosti alebo Idle. Stav Attack začína na hodnote 0.0 a končí na hodnote 1.0. Po tomto stave nasleduje stav Decay, ktorý začína na hodnote 1.0 a končí na hodnote, ktorá odpovedá stavu Sustain. Po stave Sustain nasleduje Release, ktorý začína na hodnote stavu Sustain a končí v 0.0. Prechody medzi jednotlivými stavmi generátoru môžu byť lineárne alebo parabolické. Možný príklad výstupu s lineárnymi prechodmi je

na obrázku 7.5. Charakter prechodu je možné meniť parametrom a je pre všetky stavy rovnaký. Nie je možné nastaviť, aby boli niektoré prechody stavov lineárne a iné parabolické. Pri lineárnom priebehu sa používa diferencia, ktorá sa pripočítava k aktuálnej hodnote výstupu, až kým sa nenarazí na koniec aktuálneho stavu, kde sa následne parametre generovania upravujú pre nový stav. Pri parabolickom priebehu sa hodnota výstupu počíta pomocou funkcie a pomocného akumulátora. Činnosť generátora znázorňuje jednoduchý stavový diagram obrázku 7.4.



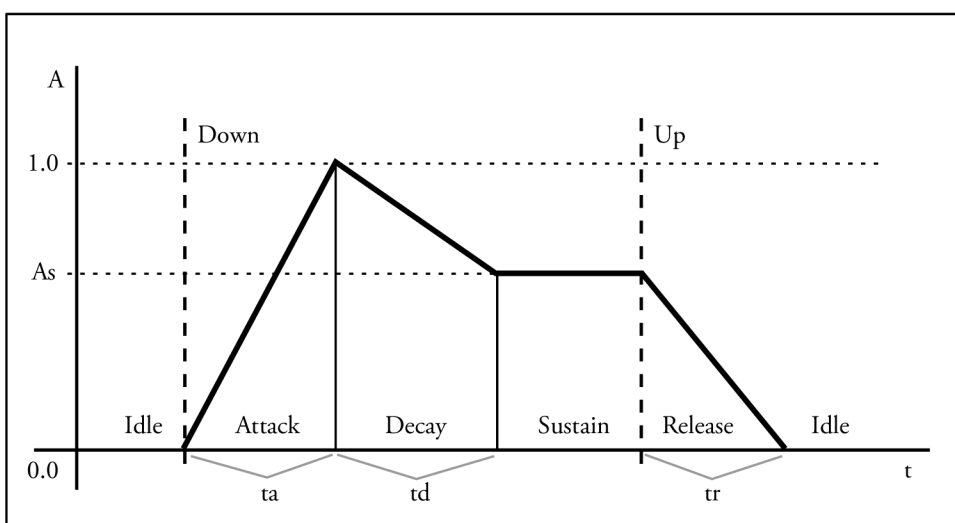
Obr. 7.4: Stavový diagram reprezentujúci generátor obálky

Počiatkový stav generátora je stav Idle. Stavy označené šedou farbou predstavujú aktívne stavy generátora, v ktorých sa generuje výstupný signál. V stave Idle má výstup generátora konštantnú hodnotu 0.0. Šípky bez názvu udalosti predstavujú prechody uskutočnené ukončením daného stavu. Stavy Attack, Decay a Release majú parametrom určenú dobu trvania prechodu od počiatkovej do konečnej hodnoty. Po uplynutí tohto času sa aktuálny stav ukončí a generátor prejde do nasledujúceho stavu. Pomenované šípky znázorňujú udalosti prichádzajúce zvonku. Udalosť Down spúšťa činnosť generátora v prípade, že sa nachádza v stave Idle po prijatí tejto udalosti, prejde do stavu Attack a začne generovať výstupný signál. Ak je generátor v inom stave ako Idle je udalosť Down ignorovaná. Udalosť Up prerušuje stavy Attack, Decay a Sustain, pričom okamžite prepne generátor do stavu Release. Ak sa generátor nachádza v stave Idle alebo Release je udalosť Up ignorovaná.

Obrázok 7.5 predstavuje príklad možného výstupu generátora, hodnota A_s je parametrom nastavená hodnota pre Sustain a hodnoty t_a , t_d a t_r sú nastavené doby trvania stavov Attack, Decay a Release. Aby nedochádzalo k výraznému praskaniu pri veľmi rýchlych zmenách úrovne signálu, je minimálna doba trvania jedného stavu obmedzená na hodnotu 1 ms.

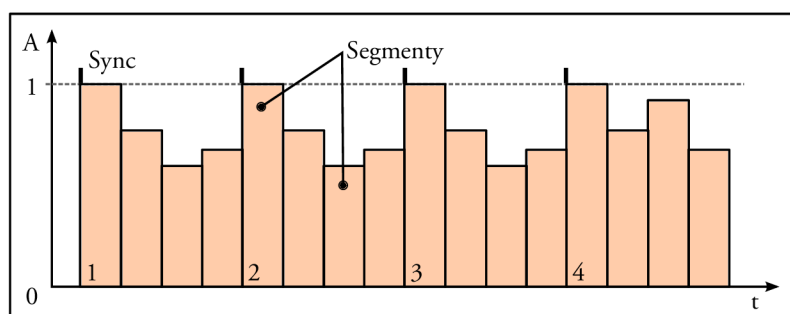
7.4.3 Krokový modulátor

Tento modulátor pozostáva zo 16 segmentov, pričom nastavenie hodnoty každého segmentu určuje hodnotu výstupu. Každý segment môže nadobúdať hodnoty z intervalu $\langle 0.0, 1.0 \rangle$. Hodnota výstupu je počas doby trvania jedného segmentu konštantná. Všetky segmenty majú rovnakú dĺžku, ktorá je odvodená od nastavenia a tiež tempa hosťovskej aplikácie, v ktorej syntetizátor beží. Tempo sa udáva v jednotkách BPM (Beat per Minute) a predstavuje počet úderov za minútu (udáva rýchlosť skladby). Oproti predchádzajúcim zdrojom modulácie musí byť tento zdroj synchronizovaný s tempom a fázou hosťovskej aplikácie. Samotná synchronizácia je riešená pomocou správ, ktoré zasiela hosťovská aplikácia. Uskutočňuje sa pri generovaní výstupného bloku samplov, ktorého veľkosť je väčšinou nastavená na 512 vzoriek (nastavenie hosťujúcej aplikácie). Po prejdení všetkých segmentov sa uzavrie



Obr. 7.5: Výstup generátoru obálky s lineárnym priebehom

cyklus a generovanie pokračuje znova od začiatku. Ilustratívne je príklad výstupu tohto generátoru zobrazený na obrázku 7.6.



Obr. 7.6: Výstup krokového zdroja modulácie

Obrázok zobrazuje 16 segmentov s rôznym nastavením. Zámerne generovanie nezačína v čase 0.0, aby sa zvýraznil vplyv synchronizácie (Sync impulzy). Aby pri prechodoch medzi susednými segmentmi nedochádzalo k skokovitým zmenám výstupného signálu, je ako posledný blok tohto modulátoru použitý filter typu dolná priepusť. Príliš rýchle zmeny modulačného signálu by spôsobovali vznik veľmi nepríjemných artefaktov vo zvuku ako napríklad praskanie. Medzná frekvencia tohto filtra určuje dobu trvania prechodu od jedného segmentu k druhému. Výstup filtra je definovaný nasledujúcim vzťahom:

$$y[n] = gx[n] + (1 - g)x[n - 1] \quad (7.17)$$

kde $y[n]$ je hodnota výstupu, g je koeficient filtra, $x[n]$ je aktuálna hodnota vstupu a $y[n - 1]$ je predchádzajúca hodnota výstupu. Pomocou koeficientu g je možné ovplyvňovať samotnú dĺžku prechodu. Táto vlastnosť je nastaviteľná pomocou parametru priamo za behu programu. Rozsah tohto parametru je obmedzený tak, aby k praskaniu nedochádzalo ani pri

maximálnej rýchlosti prechodu. Toto je však mierne ovplyvnené aj aktuálne spracovávaným signálom, pretože u určitých typov signálov (napr. sínusový) je praskanie oveľa výraznejšie ako u iných.

7.5 Použité efekty

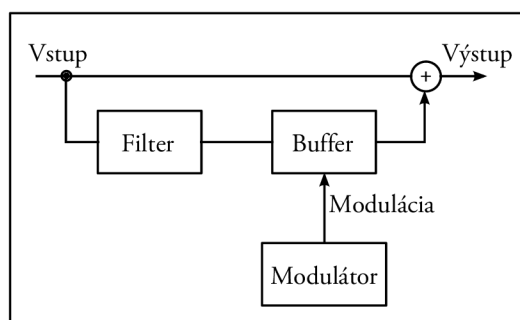
7.5.1 Chorus

Tento efekt je implementovaný klasickou metódou s použitím oneskorenej časti vstupného signálu, ktorá sa mieša s pôvodným signálom, pričom veľkosť oneskorenia sa v čase mení pomocou zdroja modulácie. Týmto spôsobom vzniká posuv základnej frekvencie vstupného signálu, čo po kombinácii s pôvodným signálom vyvoláva dojem, že hrá viac nástrojov súčasne. Aby bolo možné dobu oneskorenia signálu meniť dynamicky v čase pomocou modulačného zdroja a nedochádzalo pri tom k praskaniu, je nutné buffer indexovať pomocou desatinných čísel a pre výstupnú hodnotu použiť interpolačnú metódu. Prvý pokus implementácie využíval lineárnu interpoláciu podobne ako iné časti syntetizátoru. Toto riešenie bolo však neskôr nahradené tzv. Allpass interpoláciou prvého rádu. Allpass interpolácia využíva spätnú väzbu a v niektorých prípadoch znie signál interpolovaný pomocou tejto metódy príjemnejšie. Nevýhodou oproti lineárnej interpolácii je o niečo vyššia náročnosť na výpočtový výkon. Výstupná hodnota metódy je definovaná pomocou vzťahov:

$$c = \frac{1 - f}{1 + f} \quad (7.18)$$

$$y[n] = c(x[n + 1] - y[n - 1]) + x[n], \quad (7.19)$$

pričom $y[n]$ je výstupná hodnota interpolácie, $y[n - 1]$ je predchádzajúca hodnota výstupu, $x[n + 1]$ a $x[n]$ je dvojica susedných vzoriek v bufferi, medzi ktoré ukazuje desatinný index, f je desatinná frakcia z intervalu $\langle 0.0, 1.0 \rangle$, ktorá určuje pomer vzdialeností od jednotlivých celočíselných indexov vzoriek a c je pomocný koeficient. Maximálna veľkosť oneskorenia je udaná veľkosťou bufferu, ktorý je schopný uložiť 30 ms vstupného signálu. Blokovú schému efektu znázorňuje obrázok 7.7.



Obr. 7.7: Bloková schéma efektu Chorus

Typicky sa pre implementáciu tohto efektu používajú buffery veľkosti 15-50 ms. Táto veľkosť tiež určuje maximálnu hodnotu frekvenčného posuvu. Filter je typu horná priepusť a je nastavený na frekvenciu 200 Hz. Úlohou tohto filtra je zamedziť pôsobenie efektu na nízke

frekvencie. V najjednoduchšej variante sa tento efekt implementuje ako monofónny, pričom zdrojom modulácie je LFO so sínusovým alebo trojuholníkovým tvarom výstupnej vlny. Ako rozšírenie sa veľmi často používa stereo varianta, ktorá moduluje ľavý a pravý kanál signálu rôzne, veľmi obľúbené je tiež použitie viacerých LFO zdrojov, ktoré majú rôzne frekvencie a fázové posuny, čím vznikne komplexnejší modulačný signál, alebo náhrada oneskorenia efektom typu reverb. Implementovaný chorus efekt pracuje monofónne, ale ako zdroj modulácie používa špeciálny blok, ktorého výstup sa snaží simulovať náhodný zdroj signálu s nízkou frekvenciou.

Tento zdroj modulácie pracuje na podobnom princípe, aký bol použitý pre realizáciu granulárneho modulu. Zdroj obsahuje buffer náhodne vygenerovaných hodnôt z intervalu $\langle 0.0, 1.0 \rangle$. Výstup sa generuje pomocou lineárnej interpolácie medzi 2 susednými hodnotami v bufferi. Pre ušetrenie výpočtového výkonu sa hodnota výstupu počíta iteratívne, pričítaním diferencie k predchádzajúcej hodnote. Veľkosť diferencie sa určuje pomocou vzťahov:

$$len = \max(100\,000 b[i_{length}] - 100\,000 b[i_{length}] f, 40\,000) \quad (7.20)$$

$$d = \frac{b[i_{value} + 1] - b[i_{value}]}{len}, \quad (7.21)$$

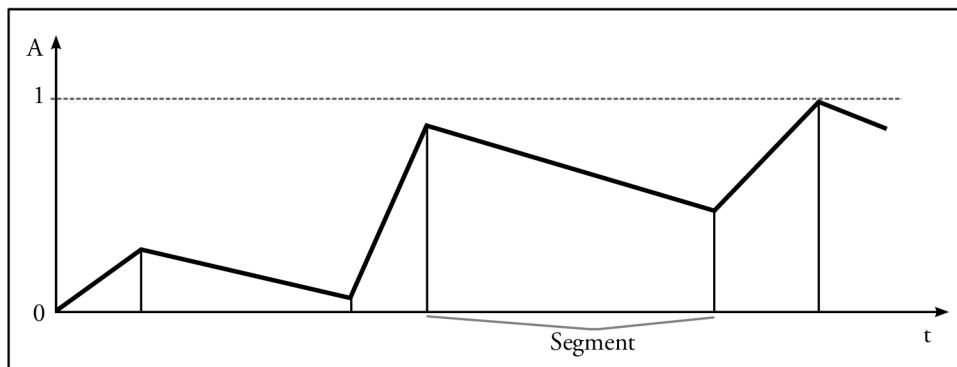
kde len je dĺžka aktuálneho segmentu (počet hodnôt vygenerovaných medzi 2 susednými hodnotami v bufferi) generátoru udaná v samploch, b je buffer náhodných hodnôt, i_{length} je index do bufferu používaný pre získanie novej dĺžky segmentu, i_{value} je index používaný pre získanie výstupných hodnôt, f je parametrom nastavená frekvencia generátoru a d je výsledná diferencia, ktorá sa používa pri generovaní výstupu. Po použití hodnoty z bufferu sa indexy posunú. Na začiatku segmentu sa vypočíta hodnota diferencie a výstup sa nastaví na hodnotu $b[i_{value}]$. Každá ďalšia hodnota sa získa pripočítaním diferencie až kým sa nenarazí na koniec aktuálneho segmentu, kedy sa hodnota výstupu nastaví na hodnotu $b[i_{value} + 1]$ a celý proces sa opakuje. Týmto spôsobom vzniká prúd náhodných hodnôt rôzne dlhých segmentov. Konštanta 100 000 určuje maximálnu dĺžku segmentu a konštanta 40 000 zase naopak minimálnu dĺžku segmentu. Tieto konštanty boli stanovené empiricky avšak nezohľadňujú použitú vzorkovaciu frekvenciu, ktorej zmena by mala za následok zmenu frekvenčného rozsahu tohto generátoru. Aby sa výstup generátoru vyhladil, je použitý jednoduchý filter:

$$y[n] = 0.99995 y[n - 1] + 0.00005 x[n], \quad (7.22)$$

kde $y[n]$ je aktuálna hodnota výstupu, $y[n - 1]$ je predchádzajúca hodnota výstupu a $x[n]$ je aktuálna hodnota vstupu. Krátky úsek s príkladom výstupu modulačného zdroja zobrazuje obrázok 7.8. Výstup je zobrazený pred spracovaním vyššie uvedeným filtrom.

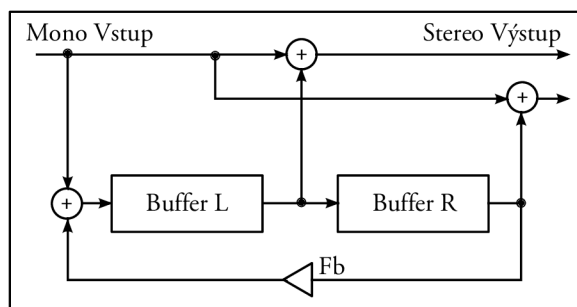
7.5.2 Pingpong delay

Tento delay má na svojom vstupe mono signál, ale na jeho výstupe je už signál vo formáte stereo. Pri efektoch tohto typu je niekoľko klasických možností zapojenia, ktoré sa veľmi často používajú, ale práve z dôvodu zapojenia mono-stereo bol zvolený typ pingpong. Bloková schéma použitého zapojenia je na obrázku 7.9. Efekt využíva 2 buffery jeden pre ľavý a druhý pre pravý kanál. Tieto buffery sú zapojené do série a ich výstupy sa miešajú so



Obr. 7.8: Príklad výstupu modulačného zdroja

vstupným signálom. Každý kanál stereo výstupu obsahuje vstupný signál spolu so signálom z odpovedajúceho bufferu. Pomer miešania je ovplyvnený nastaviteľným parametrom. Vplyvom sériového zapojenia bufferov sa ozvena striedavo objavuje v ľavom a v pravom kanály stereo výstupu, od tohto javu je odvodený názov zapojenia pingpong. Buffer pre jeden kanál je implementovaný pomocou poľa vzoriek o veľkosti $0.8f_s$, kde f_s je vzorkovacia frekvencia signálu na akej syntetizátor pracuje. Z toho vyplýva, že buffer je schopný uložiť maximálne 800 ms vstupného signálu. Do každého z bufferov ukazujú 2 pomocné indexy i_r a i_w . Index i_w slúži pre zápis nových vstupných hodnôt a i_r pre čítanie výstupu. Po spracovaní 1 vzorky sa indexy posunú dopredu a v prípade, že sa dosiahne koniec bufferu pokračuje sa od indexu 0 (kruhový buffer). Počet vzoriek medzi indexom i_r a i_w určuje dĺžku oneskorenia, ktorá je pre obidva buffery rovnaká. Koeficient Fb na obrázku 7.9 definuje veľkosť spätnej väzby a je tiež konfigurovateľný pomocou parametru.



Obr. 7.9: Bloková schéma efektu Pingpong delay

7.5.3 Saturátor

Tento efekt využíva aplikáciu nelineárnych funkcií na vstupný signál, čím dodáva vyššie harmonické frekvencie. Pre efektívne počítanie hodnôt jednotlivých funkcií sú využité tabuľky, ktoré obsahujú na vzorkované hodnoty príslušnej funkcie z intervalu $\langle -1.0, 1.0 \rangle$ s krokom 0.001. Veľkosť tabuliek je stanovená na hodnotu 4096 a každá implementovaná funkcia používa 2 tabuľky. Jedna tabuľka obsahuje hodnoty pre vstupný signál $s < 0.0$ a druhá pre signál $s \geq 0.0$. Zo znamienka vstupného signálu sa určí, ktorá z tabuliek sa použije a pomocou vzťahu $i = 1000 |s|$, kde 1000 je konštanta odvodená od veľkosti kroku vzorkovania

funkcií a $|s|$ je absolútna hodnota vstupného signálu, sa získa index i hľadanej hodnoty v tabuľke požadovanej funkcie. Následne sa pomocou lineárnej interpolácie získa výstupná hodnota. V prípade, že spočítaný index ukazuje mimo tabuľku je použitá konštantná hodnota 1.0 poprípade -1.0. Pomocné tabuľky s hodnotami funkcií sa plnia pri inicializácii efektu podobne ako u ostatných častí syntetizátoru, ktoré využívajú tento spôsob implementácie svojej funkčnosti. Efekt je schopný generovať 4 rôzne nelineárne funkcie v závislosti od nastavenia, ktoré ovplyvňuje výber použitej tabuľky. Prvá funkcia (obr. 7.11) alebo tiež saturačná krivka $y_1(x)$ predstavuje jemnú saturáciu a pre jej realizáciu bola použitá funkcia \tanh .

$$y_1(x) = \tanh(x) \quad (7.23)$$

Druhá krivka $y_2(x)$ je mierne odlišná a vyznačuje sa tým, že jej kladná časť nie je symetrická so zápornou, čo jej dodáva unikátny charakter (obr. 7.12).

$$y_2(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-1.2x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \quad (7.24)$$

Na tretiu saturačnú krivku $y_3(x)$ bola použitá hyperbolická funkcia (obr. 7.13) a oproti predchádzajúcim 2 realizáciám má oveľa agresívnejší charakter spôsobený jej strmou. Táto funkcia je symetrická a je definovaná po častiach.

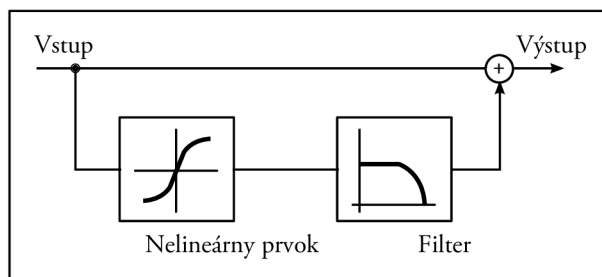
$$y_3(x) = \begin{cases} \frac{2.2x}{2x + 0.3} & x \geq 0.0 \\ \frac{2.2x}{-2x + 0.3} & x < 0.0 \end{cases} \quad (7.25)$$

Poslednou saturačnou krivkou $y_4(x)$ je krivka, ktorá sa snaží napodobniť prenosovú charakteristiku magnetických pásov (obr. 7.14) tým, že má vyšší útlm signálu v oblasti okolo hodnoty 0. Krivka je zložená z funkcie hyperboly a funkcie \tanh .

$$y_4(x) = \begin{cases} \tanh(2x - 0.1) & x > 0.1 \\ \frac{-0.4}{2x - 1} - 0.4 & x \in \langle 0.0, 0.1 \rangle \\ \frac{-0.4}{2x + 1} + 0.4 & x \in \langle -0.1, 0.0 \rangle \\ \tanh(2x + 0.1) & x < -0.1 \end{cases} \quad (7.26)$$

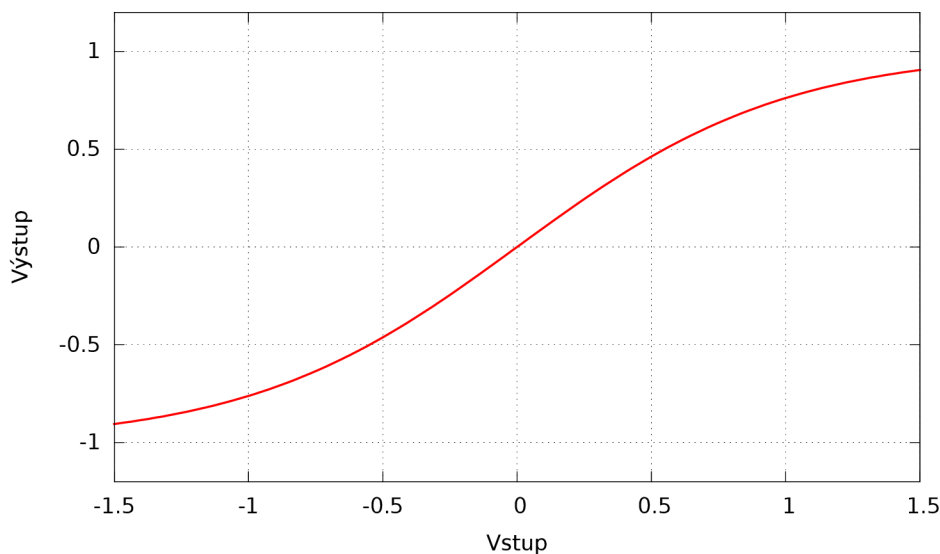
Činnosť tohto efektu spočíva v úprave vstupného signálu pomocou statickej saturačnej krivky, čím vznikne skreslený signál obohatený o vyššie harmonické frekvencie s oveľa výraznejším a ostrejším charakterom. Tento typ saturácie sa pre svoj princíp činnosti označuje ako statická, pretože hodnota výstupu je závislá len od aktuálnej hodnoty vstupného signálu. Obohatením efektu o vnútorný stav je možné vytvoriť dynamickú stavovú saturáciu, ktorá má organickejší charakter je však výpočtovo o niečo náročnejšia. Pri saturovaní vnútorný stav spôsobuje len mikroskopické zmeny v charaktere, ktoré sa snažia lepšie napodobňovať chovanie elektronických obvodov. Aby nebol počet pridaných harmonických

frekvencií príliš vysoký je signál po saturácii upravený filtrom typu dolná priepusť, ktorej medzná frekvencia je nastavená na hodnotu 15 000 Hz. Blokovú schému implementovaného saturačného efektu zobrazuje obrázok 7.10.



Obr. 7.10: Bloková schéma saturačného efektu

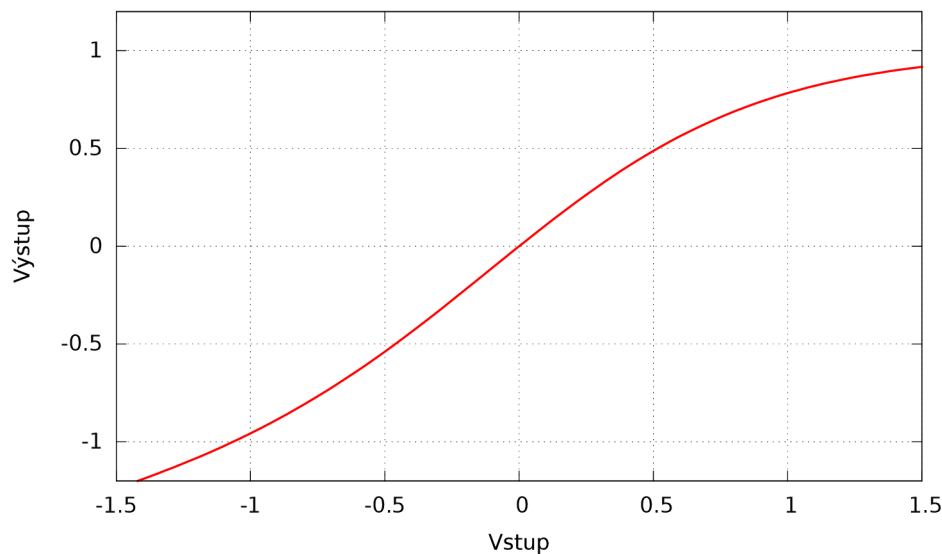
Výstup efektu sa mieša spolu s pôvodným vstupným signálom v pomere 1 : 1. Toto ma za účel zmierniť dopad efektu na výsledný zvuk a tiež zabezpečiť, aby efekt prirodzene saturoval pôvodný audio signál. Efekt pracuje monofónne.



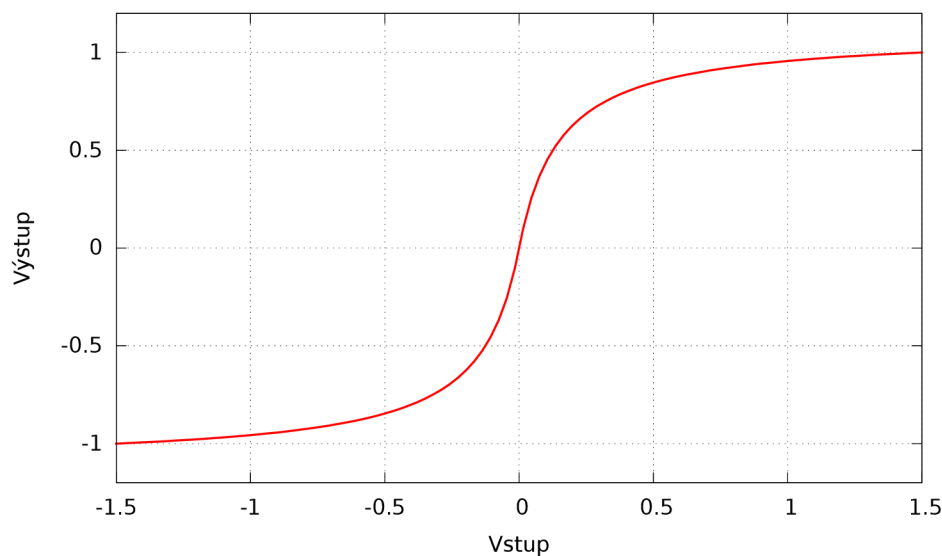
Obr. 7.11: Saturačná krivka $y_1(x)$

7.5.4 Stereo enhancer

Tento efekt pracuje v režime stereo a jeho hlavnou úlohou je dodať, alebo zvýšiť stereo hĺbku vstupného signálu. K tomuto účelu sa používajú rôzne techniky a algoritmy využívajúce psychoakustické vlastnosti zvuku. Aby efekt dosiahol uspokojivých výsledkov a nebol veľmi výpočtovo náročný na implementáciu, bola zvolená metóda rozšírenia priestorového obrazu zvuku, ktorá využíva jednoduché oneskorenie signálu v jednom zo stereo kanálov. Tento jav

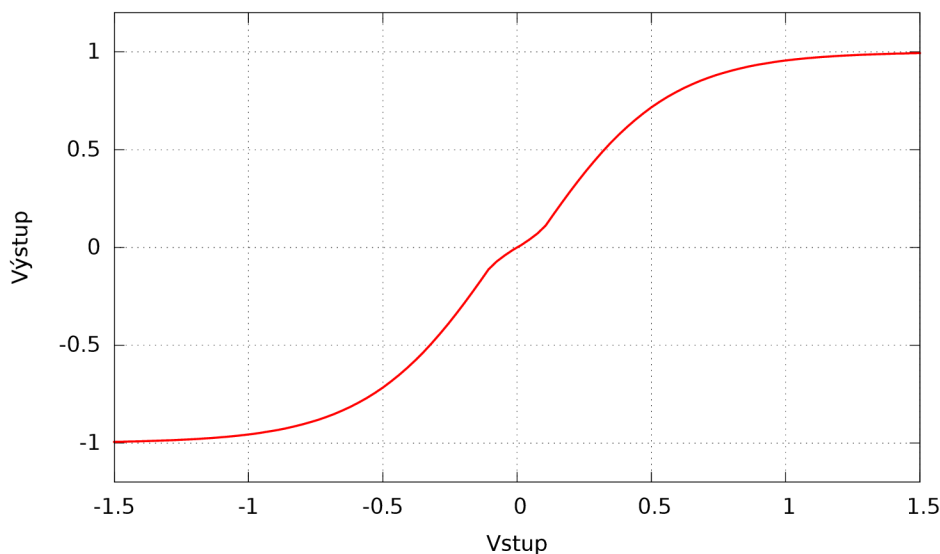


Obr. 7.12: Saturačná krivka $y_2(x)$

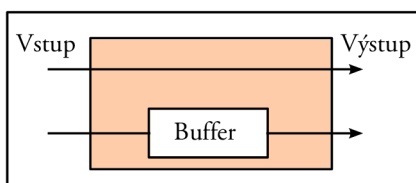


Obr. 7.13: Saturačná krivka $y_3(x)$

spôsobí, že ľudský sluch vníma rozšírenie stereo obrazu výsledného signálu aj v prípade, že do oboch kanálov vstupuje totožný zvukový signál. Pre implementáciu oneskorenia slúži jednoduchý kruhový buffer pre uloženie vstupných hodnôt signálu. Buffer pracuje na podobnom princípe aký bol použitý pre implementáciu efektu pingpong. Maximálna veľkosť bufferu je 128 vzoriek, čo tiež udáva maximálnu veľkosť oneskorenia jedného kanálu voči druhému. Táto veľkosť je nastaviteľná pomocou parametra. Z dôvodu, že efekt nevyužíva spätnú väzbu, je jeho impulzná odozva konečná. Pri spracovaní sa vždy jeden z kanálov dostáva na výstup nemodifikovaný a druhý je o niekoľko vzoriek oneskorený. Tento jednoduchý princíp spracovania je zachytený na obrázku 7.15.



Obr. 7.14: Saturačná krivka $y_4(x)$



Obr. 7.15: Bloková schéma efektu pre rozšírenie stereo hĺbky

Napriek jednoduchosti realizácie, čo je jeho veľkou výhodou, dosahuje tento efekt uspokojivých výsledkov. Ďalšou veľkou výhodou tohto riešenia je, že rozšírenie hĺbky stereo signálu nie je veľmi ovplyvňované frekvenčným rozložením spektra vstupného signálu ako je tomu u metód, ktoré rozšírenie implementujú pomocou komplementárnych zmien vo frekvenčnom spektre ľavého a pravého kanálu.

7.6 Hlavný modul

Tento modul tvorí jadro syntetizátoru a jeho úlohou je riadenie celkovej činnosti a syntézy zvuku, vzájomné prepojenie a komunikácia jednotlivých funkčných blokov a tiež komunikácia s hosťujúcou aplikáciou a teda aj s užívateľom.

7.6.1 Generovanie zvuku

Pre generovanie výsledného zvuku slúži hlavná slučka v metóde `process` pluginu. Táto metóda vždy dostane ako vstup ukazovateľ na pole hodnôt konštantnej veľkosti, ktoré predstavuje výstupné hodnoty. Jednotlivé vzorky výstupného signálu sa generujú postupne v nasledujúcich krokoch:

1. Každých 20 vzoriek výstupného signálu sa hlavný modul pokúsi odblokovať hlasy, ktoré sú v zozname aktívnych, ale už prešli do stavu Idle. Aktivitu hlasu určuje

stav jeho generátoru obálky pre výstupný zosilňovač. Následne sa hlasové moduly so stavom Idle presunú do fronty voľných hlasov.

2. Spracovanie fronty udalostí (popísané v samostatnej sekcii).
3. Vyhľadzovanie zmeny parametrov (bližší popis bude uvedený ďalej).
4. Vyhodnotenie modulačnej matice, posun modulačných zdrojov a aplikovanie zmien (popísané v samostatnej sekcii).
5. Získanie výstupu a posun všetkých aktuálne aktívnych hlasových modulov.
6. Aplikovanie efektu Chorus a saturácia výstupného signálu.
7. Efekt Gater, upraví amplitúdu signálu na základe výstupu krokového modulačného zdroja. Jedná sa o zápornú moduláciu s hĺbkou 100 %.
8. Aplikácia Pingpong efektu a efektu pre rozšírenie stereo hĺbky audio signálu.
9. Zápis výsledných hodnôt (stereo) do výstupného bufferu.

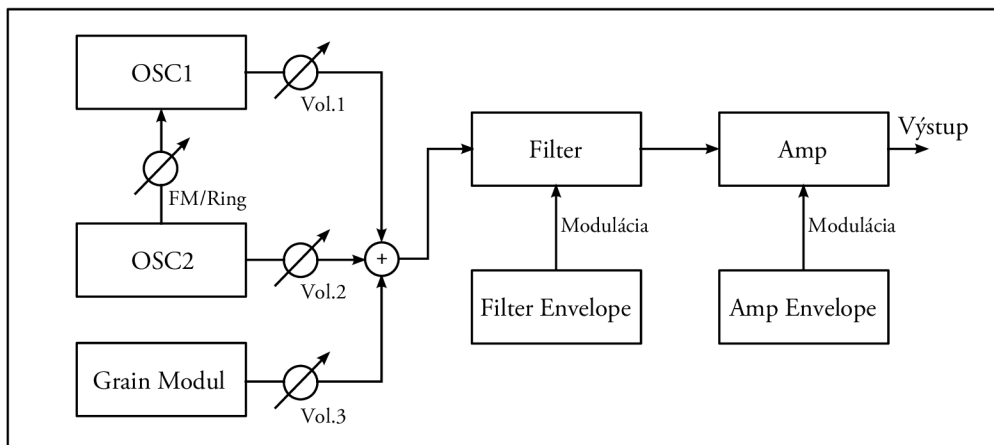
Pred samotným spracovaním výstupného signálu, hlavný modul získa časové údaje z hosťovskej aplikácie a synchronizuje krokový modulátor. Táto operácia je pomerne náročná, preto sa nevykonáva s každou vzorkou výstupu. Aby sa získala vyššia kvalita výstupného audio signálu, časť syntetizátoru od hlasových modulov až po saturačný blok (vrátane) pracuje na 4-krát vyššej vzorkovacej frekvencii. Takto sa získa lepší odstup signálu od šumu pre aplikáciu modulácii a saturácie. Za blokom saturácie je umiestnený filter, ktorého medzná frekvencia je nastavená na hodnotu 20 kHz (antialiasingový filter).

Pri implementácii veľkého množstva blokov je nutné dbať nato, aby pri výpočtoch nevznikali nenormalizované čísla, pretože dochádza k obrovskému nárastu spotreby (na niektorých typoch procesorov). Tento problém sa týka hlavne blokových modulov, ktoré využívajú spätnú väzbu ako Filter, Chorus, Pingpong a iné.

7.6.2 Hlasový modul

Predstavuje jeden hlas syntetizátoru a je schopný generovať zvuk v závislosti od nastavenia. Každý hlasový modul, ktorý dostane správu KeyDown, prejde do aktívneho stavu a začne generovať výstupný signál. Modul má 2 vlastné oscilátory, 1 grain modul, filter s generátorom modulačnej obálky a výstupný zosilňovač. Výstup hlasového modulu je monofónny. Hlasový modul je schopný v jednom okamihu spracovať iba jednu udalosť KeyDown. To znamená, že je schopný generovať audio signál pre jednu stlačenú klávesu s určitou hlasitosťou. Stav aktivity hlasového modulu je určený stavom generátoru obálky pre jeho výstupný zosilňovač.

Bloková schéma modulu je na obrázku 7.16. Signál z oscilátorov a granulárneho modulu sa zmieša v nastavenom pomere a následne prechádza rezonančným filtrom. Na záver je amplitúda výsledného audio signálu upravená zosilňovačom (blok Amp). Zapojenie modulu umožňuje FM a Ring moduláciu medzi OSC1 a OSC2. Hĺbku FM modulácie je možné konfigurovať za behu aplikácie. Obrázok pre jednoduchosť nezobrazuje možnosti konfigurácie všetkých parametrov.



Obr. 7.16: Bloková schéma hlasového modulu

7.6.3 Spracovanie udalostí

Udalosti, ktoré modul obsluhuje, sú väčšinou asynchrónne a je ich možné rozdeliť na dve základné skupiny:

1. Udalosti MIDI (stlačený kláves, uvoľnený kláves, ...)
2. Udalosti z GUI alebo hosťovskej aplikácie (zmena parametru, generovanie novej série výstupných vzoriek, ...)

MIDI udalosti prichádzajú do syntetizátora v štandardnom formáte a po ich spracovaní sú zaradené do fronty, v ktorej čakajú na čas svojej aktivácie. V práci momentálne nie je implementovaná kompletná podpora pre MIDI rozhranie. Plugin akceptuje len 3 základné druhy MIDI udalostí, ktoré sú nutné pre jeho správnu činnosť:

KeyDown Táto udalosť oznamuje stlačenie nejakého klávesu. Udalosť so sebou nesie informácie o tom aký kláves bol stlačený, s akou silou a časový údaj delta, ktorý určuje oneskorenie platnosti udalosti v počte vzoriek. Po prijatí tejto udalosti je zvolený voľný hlas syntetizátora, ktorému sa nastaví oscilátory na požadovanú notu a požadovanú hlasitosť. Hlasový modul je následne presunutý z fronty voľných hlasov do vektora aktívnych hlasov. Súčasne sú zresetované všetky generátory obálky v danom hlasovom module a v závislosti na aktuálnom nastavení aj všetky oscilátory. V prípade, že je hodnota Sustain zosilňovača aktívneho hlasu nastavená na nenulovú hodnotu, zostáva daný hlas aktívny až do príchodu udalosti KeyUp pre tú istú notu, ktorá zahájí Release fázu.

KeyUp Je párovou udalosťou k udalosti KeyDown a oznamuje uvoľnenie určitého klávesu. Po príchode tejto udalosti sa vo vektore aktívnych hlasov vyhľadá hlasový modul, ktorý hrá danú notu a uvedie sa do stavu Release. Dĺžka tohto stavu závisí od aktuálneho nastavenia generátora obálky pre výstupný zosilňovač hlasov. Keď Release fáza skončí oscilátor prejde do stavu Idle a následne sa presunie späť do fronty voľných hlasov.

AllUp Táto udalosť uvedie všetky aktuálne používané hlasy do stavu Release. Jedná sa o globálne aplikovaný KeyUp. Niektoré hosťovské aplikácie používajú túto udalosť v rámci optimalizácie.

Keďže udalosti vo fronte čakajúce na spracovanie si so sebou nesú aj určité časové oneskorenie delta (udané počtom vzoriek), je nutné kontrolovať a posúvať ich čas aktivácie priebežne v rámci generovania vzoriek výstupného signálu. Z tohto dôvodu sa vždy pred spracovaním aktuálnej vzorky vyhodnotí a posunie celá fronta čakajúcich udalostí. V prípade, že je aktuálne fronta udalostí prázdna vyhodnotenie sa preskočí a pokračuje sa generovaním aktuálneho vzorku zvukového signálu. Toto chovanie by bolo možné optimalizovať tak, že by sa celá fronta vyhodnocovala až po uplynutí delta vzoriek do prvej udalosti a následne by sa ostatné udalosti posunuli v čase o túto vzdialenosť. Keď sa však vezme do úvahy fakt, že MIDI udalosti súvisia s hrou na hudobnom nástroji, nie je táto efektívnejšia realizácia nutná, pretože udalostí chodí v čase relatívne nízky počet oproti počtu generovaných vzoriek výstupu za 1 sekundu. Ak nastane čas aktivácie udalosti KeyDown a syntetizátor nemá k dispozícii žiadny voľný hlas, je táto udalosť ignorovaná. Podobným spôsobom je ignorovaná udalosť KeyUp/AllUp v prípade, že žiadny hlasový modul syntetizátoru nie je práve aktívny [1].

Udalosti z hostovskej aplikácie alebo užívateľského rozhrania väčšinou oznamujú nejakú zmenu parametra, poprípade vyžadujú poskytnutie nejakej informácie samotného pluginu (hodnota, názov či jednotka parametra, názov pluginu, vzorkovacia frekvencia, ...). Tieto udalosti sú obsluhované volaním príslušnej metódy, ktorá sa stará o špecifickú udalosť alebo skupinu udalostí určitého typu, pričom parametre volania metódy určujú presnú operáciu. Dôležité je, že ak sa udalosť týka parametru hlasového modulu syntetizátoru, je nutné túto udalosť distribuovať na všetky hlasy syntetizátoru. Celkový počet parametrov syntetizátoru sa pohybuje okolo 100 a ich zoznam je uvedený v prílohe C. Niektoré držia priamo hodnotu, na základe ktorej sa generuje zvuk, iné slúžia ako základ pre výpočet použitých koeficientov. Rozlíšenie toho o aký typ parametru sa jedná, má takisto na starosti hlavný modul.

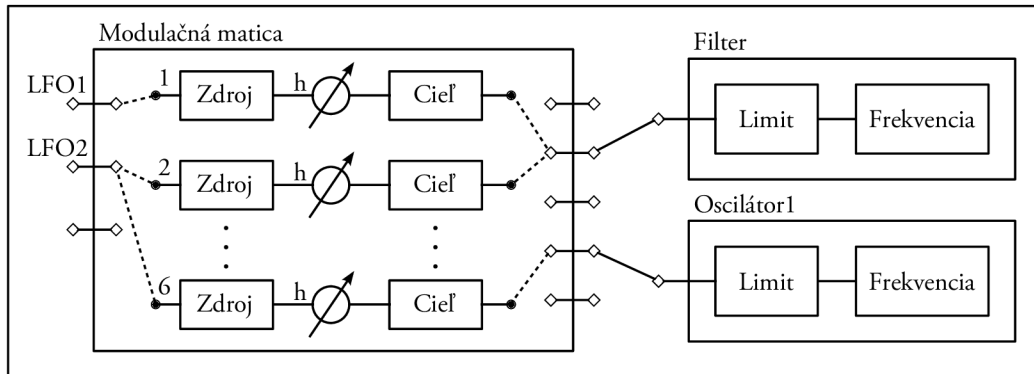
Ďalší problém, ktorý hlavný modul rieši, je vyhladzovanie skokových zmien hodnôt parametrov pri nastavovaní pomocou GUI. Udalosti zmeny totiž chodia v diskretných časových intervaloch a toto chovanie by spôsobovalo nepríjemné praskanie výstupného signálu. Pre tento účel bol implementovaný špeciálny modul `CParamSmoother`, ktorý má za úlohu nastavovanie parametrov vyhladiť. Tento modul funguje na princípe IIR filtra s charakterom dolná priepusť. Frekvencia je nastavená empiricky tak, aby vyhovovala pre väčšinu parametrov a je nemenná. Pre ušetrenie výkonu nemá každý parameter pridelený svoj vlastný vyhladzovací modul, ale každý využíva jednu centrálnu jednotku. Keď príde udalosť zmeny, jednotka sa uvedie do činnosti a po dosiahnutí požadovanej hodnoty, prejde do stavu Idle. Následne čaká na ďalšiu udalosť. Ak príde udalosť a modul je práve aktívny overí sa, či sa jedná o ten istý parameter, ak áno upraví sa koncová hodnota vyhladzovania, ak sa parameter líši, je zmena prepojená priamo na daný parameter (hrozí praskanie). Kolízie sú menej časté a 1 jednotka vo väčšine prípadov postačuje. Vyhladzovanie sa aplikuje iba na parametre, ktoré držia hodnotu typu `float`.

7.7 Modulačná matica

Modulačná matica zabezpečuje prepojenie jednotlivých modulačných zdrojov s cieľovými parametrami syntetizátoru pre moduláciu. Matica pozostáva zo 6 modulačných slotov, z ktorých každý obsahuje parameter pre nastavenie zdroja modulácie, parameter pre nastavenie cieľa modulácie a parameter pre nastavenie hĺbky modulácie pre dané spojenie. Jednotlivé sloty sú navzájom nezávislé a sú dynamicky konfigurovateľné počas behu aplikácie. Aby bolo možné ku každému modulačnému zdroju pristupovať rovnakým spôsobom, je použitá dedičnosť v objektovo orientovanom návrhu. Každý modulačný zdroj dedí od triedy

CModulatorSource.

Pri generovaní jednotlivých vzoriek výstupu je nutné v čase posúvať aj modulačné zdroje a následne na základe ich výstupnej hodnoty vyhodnotiť dynamické zmeny jednotlivých parametrov syntetizátoru. Týmto spôsobom sa výsledná hĺbka modulácie určitého parametra získa ako súčet hodnôt z jednotlivých modulačných slotov. Z tohto dôvodu má každý modulovateľný parameter limitovanú maximálnu hĺbku modulácie (rôzna pre rôzne ciele modulácie). Ak výsledná hodnota modulácie presiahne tento limit je zarovnaná na hodnotu limitu.



Obr. 7.17: Zjednodušená bloková schéma modulačnej matice

Na obrázku 7.17 je zobrazená modulačná matica s 3 aktívnymi spojeniami. Prerušovanou čiarou sú znázornené práve realizované prepojenia (dynamicky konfigurovateľné). Frekvencia filtra je modulovaná pomocou LFO1 a LFO2 a frekvencia prvého oscilátora pomocou LFO2. Pre jednoduchosť na obrázku nie sú znázornené všetky modulačné zdroje a ciele. Vzhľadom k tomu, že modulačné zdroje pracujú na relatívne nízkych frekvenciách (do 100 Hz), nie je nutné ich stav posúvať s každým spracovaním výstupného vzorku generovaného signálu. Vzorkovacia frekvencia modulačných zdrojov je 10-krát menšia oproti vzorkovacej frekvencii generovaného výstupu syntetizátoru. Touto modifikáciou sa ušetrí veľká časť výpočtového výkonu, ktorý je nutné vynaložiť na vyhodnotenie modulačnej matice. Pre nízke frekvencie výstupov jednotlivých modulátorov sa zníženie vzorkovacej frekvencie výrazne neprejaví na výslednej kvalite zvuku. Jedinou výnimkou je frekvenčná modulácia medzi oscilátormi, kde sú frekvencie jednotlivých signálov výrazne vyššie. Pri tejto modulácii dochádza, znížením vzorkovacej frekvencie, k určitej strate kvality výstupného audio signálu, no táto strata je kompenzovaná zvýšenou vzorkovacou frekvenciou jadra syntetizátoru. Takýto spôsob implementácie tiež dodáva FM modulácii špecifický organický charakter. V práci je momentálne implementovaná len tzv. kladná modulácia. To znamená, že hodnota určitého parametra sa moduláciou môže iba zvýšiť. Podobne ako pri udalosti zmeny parametrov je nutné brať ohľad na špecifické hodnoty modulácií jednotlivých hlasových modulov. Toto sa týka hlavne modulácie frekvencie filtra pomocou generátoru obálky, ktorý má každý hlas svoj vlastný. Výstup generátoru obálky pre modulovanie frekvencie filtra, priamo do modulačnej matice nevstupuje, ale je nutné s týmto zdrojom pri určovaní výslednej hĺbky počítať.

Kapitola 8

Generovanie melódie

Táto kapitola sa zaoberá rozšírením vytvoreného syntetizátoru o spracovanie hlasového vstupu. Je v nej popísaný návrh a implementácia nástroja, ktorý umožňuje z hlasového alebo tiež textového vstupu vytvoriť výstupný súbor, ktorý obsahuje synteticky vygenerovanú melódiu vo formáte MIDI. Túto melódiu je následne možné pomocou syntetizátoru prehrať. Ako implementačný jazyk pre tento modul bol zvolený jazyk Python. Na analýzu hlasového signálu je využitý fonémový rozpoznávač, ktorý je vyvíjaný na Fakulte informačných technológií v Brne. Výstupom tohto programu je súbor, ktorý obsahuje jednotlivé rozpoznané fonémy a k nim časové značky. Takto spracovaný hlasový vstup je následne transformovaný na požadovanú melódiu. Keďže fonémový rozpoznávač je presnejší pri rozpoznávaní jadier jednotlivých slabík (a, e, i, o, u), je celé generovanie melódie postavené práve na nich. Generovanie je tvorené niekoľkými procedúrami, ktoré popisujú nasledujúce sekcie a je riadené niekoľkými parametrami. V prípade textového vstupu nie je predspracovanie nutné. Tento modul je momentálne implementovaný len ako experimentálny a je schopný pracovať iba v režime off-line.

8.1 Spracovanie vstupu

Slúži na vytvorenie postupnosti znakov, ktoré sú dôležité pre samotné generovanie výslednej melódie. Spôsob je závislý na tom aký vstupný formát sa použije. Generátor melódií je aktuálne schopný akceptovať 2 formáty.

V prípade textu je spracovanie pomerne priamočiare. Textový vstup sa v cykle prechádza znak po znaku a filtrujú sa z neho znaky, ktoré sa pri generovaní melódie nevyužijú. Znaky, ktoré sa používajú sú definované množinou jadier fonémou $c = \{a, e, i, o, u\}$ a množinou pomocných znakov $p = \{?, !, ., ;, \}$. Pomocné znaky u textového vstupu slúžia na odvodenie rytmických vlastností melódie.

Pri spracovaní hlasového signálu je prístup odlišný. Z výstupu fonémového rozpoznávača (obr. 8.1) sa najprv vyberú položky, ktoré obsahujú nejaké jadro z množiny c . Následne sa v tejto množine položiek unifikujú časové značky (duplicitné položky sú odstránené) a hľadá sa najvhodnejší časový krok, ktorý by odpovedal časovej mriežke definovaného tempa melódie. Po nájdení spoločného kroku sa všetky časové značky normalizujú na násobky tejto hodnoty. Finálnou procedúrou je zlúčenie časových údajov spolu s jednotlivými jadrami fonémov tak, aby vytvorili prúd znakov z množiny c alebo p . Časové vzdialenosti jednotlivých jadier sú vyjadrené pomocou určitého počtu vložených pomocných znakov. Ich počet je odvodený pomocou časového kroku, ktorý sa aplikoval pri normalizácii.

```

000000 6900000 spk -71.169678
6900000 7500000 g -10.347260
7500000 8200000 d -12.244209
8200000 8800000 i -10.014458
8800000 10200000 s -17.316658
10200000 11000000 t -11.812798
11000000 11600000 l -17.070068
11600000 12400000 n -11.106750

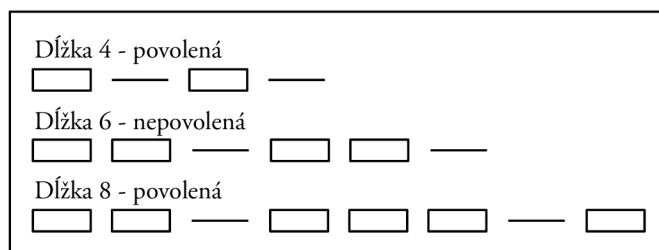
```

Obr. 8.1: Príklad súboru s fonémovou segmentáciou

8.2 Prevod na noty

Prevod spracovanej postupnosti hodnôt na noty využíva slovníkovú metódu a niekoľko doplnkových pravidiel, ktoré upravujú výslednú melódiu. Slovník je inicializovaný pred samotným generovaním pomocou nastavenia a každému prvku priraduje 1 tón stupnice. Nástroj pracuje s klasickými molovými alebo durovými stupnicami, ktoré obsahujú 7 tónov. Výber stupnice je možné zmeniť pomocou nastavenia. Pre jednoduché spracovanie sú tóny stupnice v celom module prezentované poradovým číslom (1-7).

V dôsledku toho, že syntetizátor, ktorý bol implementovaný v rámci tejto práce, je určený pre elektronickú hudbu, je rytmus generovaný týmto nástrojom vždy 4/4. Z toho vyplýva, že je možné generovať melódie, ktoré majú dĺžku rovnú násobkom čísla 4 (počítajú sa aj pauzy). Príklady vhodných a nevhodných dĺžok melódie zobrazuje obrázok 8.2. Prázdne obdĺžniky predstavujú tón, pre jednoduchosť ľubovoľný a čierne čiary predstavujú pauzu. Dĺžka melódie predstavuje súčet výskytov oboch elementov.

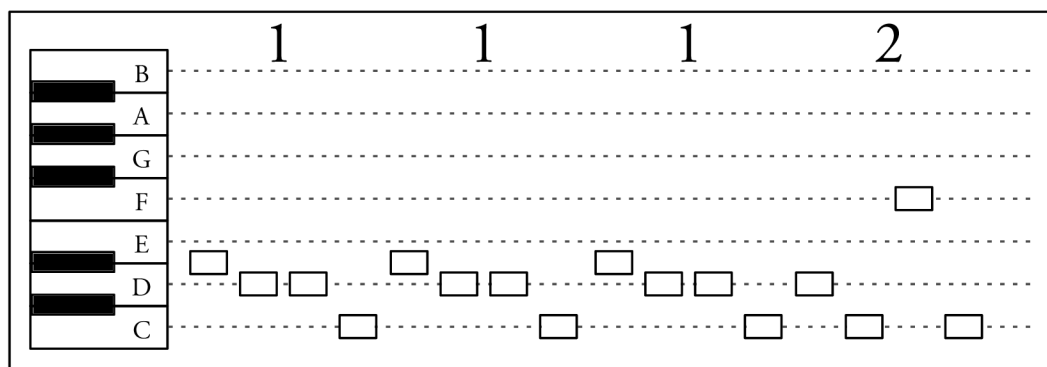


Obr. 8.2: Príklady rôznych dĺžok melódie

Ak je požadovaná dĺžka melódie väčšia ako dĺžka postupnosti získanej zo vstupného súboru, je táto postupnosť periodicky opakovaná, až kým sa nedosiahne potrebná dĺžka. Aby si poslucháč dokázal melódiu ľahko zapamätať, je nutné v nej určité postupnosti elementov opakovať. Opakovanie je definované pomocou vzoru, ktorý rozdeľuje melódiu na 4 (počet odvodený od rytmu) menšie časti. Použiteľné vzory sú:

- [1, 1, 1, 2] • [1, 1, 2, 2]
- [1, 2, 1, 2] • [1, 1, 2, 3]
- [1, 2, 1, 3] • [1, 2, 3, 4]

Vzor definuje štruktúru melódie a je ho možné chápať ako pohľad so zvýšenou mierou abstrakcie. Interpretácia vzoru sa vzťahuje k samotnej dĺžke melódie. Vzor [1, 1, 1, 2] pri melódii s dĺžkou 16 znamená, že sa opakuje fráza elementov 3-krát po sebe a následne sa na konci melódie zmení. Počet elementov vo fráze je presne štvrtina z celkovej dĺžky melódie, v tomto prípade je táto hodnota rovná číslu 4. Pre lepšiu predstavu je stav situácie znázornený na obrázku 8.3. Použité vzory opakovania boli odpozorované zo známych hudobných diel a základov kompozície hudby. Potom ako sa melódia prispôsobí zvolenému vzoru, nasleduje fáza aplikovania pravidiel, ktoré danú melódiu upraví tak, aby znela príjemnejšie a prirodzenejšie.



Obr. 8.3: Znázornenie melodického vzoru

V teórii hudby existuje istá sada pravidiel alebo zásad, ktoré je vhodné pri skladaní melódii dodržať. Melódia napísaná s prihliadnutím na tieto pravidlá znie príjemne, ale na druhej strane má tendenciu poslucháča rýchlo unúdiť. Z tohto dôvodu slúžia tieto zásady skôr ako oporné body, ktorých sa skladateľ môže a nemusí držať. Do generátoru boli zahrnuté nasledujúce pravidlá:

- Melódia začína I/VIII alebo V tónom stupnice. Toto pravidlo zabezpečí uvedenie poslucháča do príslušnej tóniny. Väčšina populárnych melódií začína práva takto.
- Melódia končí I/VIII tónom stupnice. Týmto sa dosiahne dojem úplnosti a uzavretosti melódie.
- V melódii sa vytvoria s určitou pravdepodobnosťou (5%) inverzie (tón posunutý o oktavu vyššie alebo nižšie). Takto si melódia udrží pozornosť poslucháčov, pretože posun tónu je pomerne výrazný, pritom nenaruší harmóniu. Pravdepodobnostné uplatnenie inverzií bolo zvolené preto, lebo sa viac hodí pri dlhších frázach.

Ďalšie pravidlá ako napr. maximálna dĺžka intervalu medzi susednými notami neboli zavedené, pretože v elektronickej hudbe nie sú na tieto vlastnosti kladené také prísne obmedzenia [2].

8.3 Humanizácia

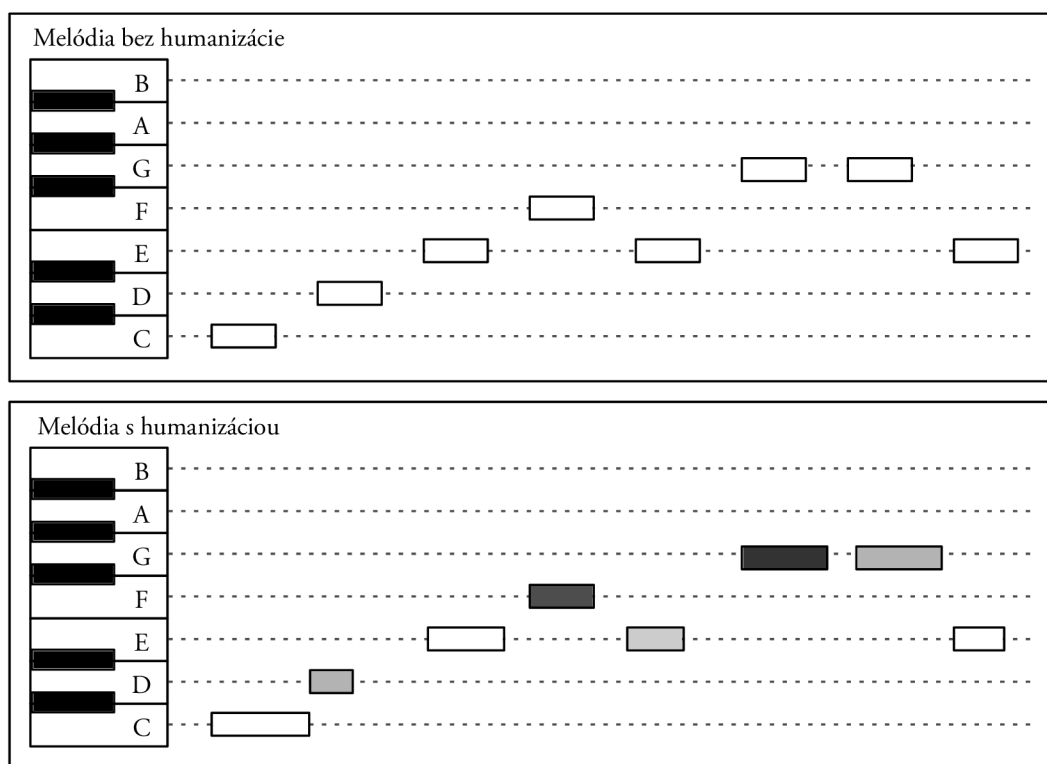
Synteticky vygenerovaná melódia znie pre človeka príliš monotónne a neprirodzene. Skutočná hra na ľubovoľný nástroj nie je nikdy dokonalá aj napriek tomu, že ju realizuje profesionálny

umelec. Práve tento nedostatok sa snaží zmierniť modul, ktorého činnosť je popísaná v tejto sekcii. Výsledný efekt tejto procedúry nie je úplne ideálny, ale vo väčšine prípadov ušetrí užívateľovi určité množstvo práce v prípade, že sa usiluje vytvoriť realistický dojem.

Pomocou MIDI rozhrania je možné ovplyvňovať niekoľko parametrov, z ktorých sa niektoré často využívajú pre účely humanizácie. Aby bol tento proces automatizovaný, boli zvolené parametre, ktoré je možné humanizovať pomocou pseudonáhodnej postupnosti:

- Velocity - určuje hlasitosť noty.
- NoteStart - počiatočný čas MIDI udalosti pre notu.
- NoteLength - dĺžka noty.

Všetky tieto vlastnosti je možné dynamicky modifikovať pomocou pseudonáhodnej postupnosti a maximálneho rozsahu prípustnej zmeny alebo tiež hĺbky. Pre generovanie pseudonáhodných čísel, boli použité štandardné nástroje z modulu `random`. Modifikácie vyššie zmienovaných parametrov sa aplikujú vždy na každú notu vstupnej melódie. Praktické znázornenie humanizácie triviálnej melódie je zobrazené na obrázku 8.4 [2].



Obr. 8.4: Humanizácia jednoduchkej melódie

Biele obdĺžniky predstavujú jednotlivé noty. Bez humanizácie všetky noty začínajú s rovnakým časovým oneskorením a majú rovnakú dĺžku. Ich hlasitosť je tiež zhodná, čo je naznačené odtieňom farby. Po humanizácii sú noty rôzne dlhé, ich začiatky sú posunuté (vychýlené z ideálnej časovej mriežky) a ich hlasitosť je tiež rozdielna.

8.4 MIDI rozhranie

Výslednú melódiu je nutné previesť do formátu MIDI udalostí a k tomuto účelu slúži jednoduché rozhranie, ktoré využíva knižnicu pre vytváranie MIDI súborov. Použitá knižnica je voľne šíriteľná (OpenSource) a dostupná na webe. Rozhranie preloží jednotlivé noty, ktoré si so sebou nesú časový údaj začiatku a ich dĺžku na 2 MIDI udalosti. Prvou je udalosť KeyDown a druhou KeyUp. Tieto udalosti spolu s potrebnými atribútmi sa následne uložia do výsledného MIDI súboru. Výstupný súbor obsahuje jednu MIDI stopu a má definované tempo, ktoré závisí od konfigurácie generátora.

Kapitola 9

Testovanie

Táto krátka kapitola popisuje spôsob, akým bol navrhnutý nástroj pre zvukovú syntézu testovaný. Overovanie funkčnosti prebiehalo pri rôznom nastavení parametrov, rôznej kombinácii kláves a vstupných udalostí. Syntetizátor bol tiež testovaný interpretáciou MIDI klipov. Keďže sa jedná prakticky o umelecký nástroj, ktorý nie je napodobeninou žiadneho reálneho inštrumentu, je exaktné vyhodnotenie kvality pomerne obtiažne. Kvalita syntetizátorov akým je tento, sa určuje veľmi problematcky, pretože silno závisí na subjektívnom postoji jednotlivých užívateľov. Každý umelec má svoje špecifické techniky a nástroje, ktoré s obľubou používa. Tiež je možné pozorovať určité zvyklosti pri práci s užívateľským rozhraním a spôsobe ovládania funkčných blokov nástroja. Existujú užívatelia, ktorí nepreferujú značné inovácie v spôsobe ovládania, ale skôr dávajú prednosť štandardom. Porovnanie jednotlivých syntetizátorov sa tiež líši pri rôznych hudobných žánroch. Táto skutočnosť pramení z toho, že nie každý nástroj je vhodný na syntézu všetkých typov zvukov.

Na základe týchto skutočností bolo testovanie implementovaného syntetizátoru riešené formou dotazníku. Vo väčšine prípadov však neboli dostupné možnosti odpovede, ale priestor pre vlastnú odpoveď užívateľa na špecifickú otázku. Hlavnými časťami dotazníku boli nasledujúce body:

- Hodnotenie kvality zvuku syntetizátoru
- Možnosti zvukovej syntézy
- Užívateľské rozhranie a spôsob ovládania
- Chýbajúce časti
- Pozitívne a negatívne vlastnosti
- Modul pre generovanie melódií

Pre účely zozbierania dát bol prototyp vytvoreného nástroja poskytnutý skupine užívateľov, ktorí sa venujú tvorbe elektronickej hudby rôznych žánrov. Takto sa získali rôzne pohľady na vytvorený hudobný inštrument. Podobným spôsobom sa testujú aj syntetizátory v praxi, kde sa väčšinou usporiada súťaž, v ktorej sa hodnotia rôzne vlastnosti jednotlivých nástrojov. Užívatelia mali dostatok času (cca 2 týždne) nato, aby sa so syntetizátorom zoznámili a napísali svoje poznatky, ktoré boli následne ručne vyhodnotené. Výsledky sú stručne zhodnotené v sekcii 9.1. Užívateľom bol spolu s použiteľným VST pluginom dodaný aj návod na obsluhu z prílohy B.

9.1 Vyhodnotenie

Vyhodnotením dát zozbieraných od užívateľov sa získal obraz o aktuálnom stave implementácie, jej prednostiach, ale aj nedostatkoch. Vzhľadom k tomu, že je hodnotenie značne subjektívne, jeho výsledkom je skôr množina možných úprav ako pevne definovaný ďalší postup projektu.

Väčšina užívateľov uviedla, že syntetizátor má veľmi kvalitný výstupný audio signál, ktorý sa môže zrovnávať s najlepšimi modelmi na trhu. Tiež si pochvalovali saturačný modul, ktorý dodá syntetizátoru analógový charakter. Niektorí užívatelia naznačili, že by bolo možné upraviť jeho implementáciu na stavovú. U oscilátorov dominovali modulácie FM a tiež Ring, no na druhej strane chýbali rozšírené možnosti nastavenia ako napr. nastavenie fázy, jemnejšie ladenie, či viac dostupných tvarov vln. Hodnotenie filtra dopadlo pomerne dobre, no do jeho vývoja by bolo nutné investovať viac času. Niektorým užívateľom pripadal jeho zvuk pri určitých frekvenciách trochu umelý. Granulárny modul bol cenený hlavne pri syntéze rôznych zvukov a ruchov prostredia. U tohto modulu užívateľom chýbala možnosť zmeny bázovej frekvencie podľa aktuálne hranej noty. Možnosti modulácie boli hodnotené ako uspokojivé a možná by bolo dobré umožniť moduláciu samotných LFO medzi sebou, ako vhodné rozšírenie. Ako značné mínus je hodnotený fakt, že syntetizátor nepodporuje viac MIDI udalostí (pitchbend, expression a iné).

Hodnotenie užívateľského rozhrania tiež nedopadlo najhoršie, no v tomto smere je syntetizátor najviac pozadu. GUI je síce jednoduché, čo väčšina užívateľov ocenila, no chýbajú možnosti ukladania nastavení, možnosť konfigurovať parametre na presné hodnoty a tiež nejaká stručná forma nápovede.

Generovanie syntetických melódií, podľa väčšiny užívateľov potláča individuálnu kreativitu, ale pre študijné účely by mohol byť tento modul pomerne užitočný.

9.2 Spotreba výkonu

Náročnosť na spotrebu výpočtového výkonu u digitálnych syntetizátorov nehrá až takú kľúčovú rolu. Väčšine užívateľov ide skôr o kvalitu výsledného zvuku, ako o nízku spotrebu. Výkonové optimalizácie sú samozrejme vítané, ak sa to výrazne neprejaví na kvalite výstupného audio signálu. Vyhodnotiť, či je daný nástroj príliš výkonovo náročný alebo nie, je pomerne komplikované. U implementovaného syntetizátoru závisí spotreba výkonu na nastavení a tiež spôsobe hrania, pretože to ovplyvňuje počet aktívnych hlasov modulu. Pre porovnanie existujú syntetizátory, ktoré majú nižšiu spotrebu (napr. Sylenth1 od Lennar Digital) a naopak existujú aj také, ktoré majú výrazne vyššiu spotrebu (napr. Diva od U-he). Táto práca nebola priamo zameraná na optimalizáciu výkonu, no napriek tomu, je celkom efektívne implementovaná. Oproti prvému prototypu je aktuálna verzia práce takmer 10-násobne efektívnejšia. Pre ďalšie zrýchlenie by bolo možné využiť sadu inštrukcií SSE.

Kapitola 10

Záver

V rámci tejto práce bol navrhnutý a implementovaný hybridný digitálny audio syntetizátor formou VST pluginu. Plugin bol testovaný na platforme Windows s použitím hosťovských aplikácií Cubase a Ableton. Tento nástroj je spolu s jeho užívateľským rozhraním možné použiť pri zvukovom dizajne, hudobnej kompozícii či živom vystúpení. Syntetizátor je polyfónny s možnosťou využitia 8 hlasov. Nástroj využíva moderné princípy a techniky pre tvorbu veľmi kvalitného výstupného zvukového signálu. Snaží sa spojiť do jedného celku to najlepšie z digitálneho a analógového sveta, čím umožňuje užívateľom jednoduchý prístup k hutnému syntetickému zvuku. Nástroj má veľmi dobrú perspektívu stať sa prototypom pre nový komerčne predávaný produkt.

Implementovaný nástroj bol tiež úspešne rozšírený o hlasový a textový vstup s využitím fonémového rozpoznávača. Výsledná podoba práce bola podrobená užívateľským testom, v ktorých dopadla pomerne úspešne. Odhalené nedostatky môžu byť predmetom pokračovania práce.

10.1 Hlavný prínos práce

Prínos práce spočíva vo vytvorení nového umeleckého nástroja pre digitálnu syntézu zvuku. Práca tiež umožňuje jednoduchý prístup ku granulárnej zvukovej syntéze. Experimentálny modul pre generovanie melódií, využíva hlasový alebo textový vstup na základe, ktorého generuje MIDI výstupný súbor. Z testovania vyplynulo, že tento modul by mohol slúžiť pre akademické účely ako učebná pomôcka. Automatické generovanie melódie by tiež mohlo byť použité pre generovanie dynamického zvukového doprovodu k počítačovým hrám.

10.2 Možné pokračovanie práce

Vývoj nástrojov akým je tento, je väčšinou dlhodobější záležitosť. Vytvárajú sa nové verzie, ktoré disponujú doplnenými vlastnosťami, rôznymi vylepšeniami a opravou chýb. Z tohto dôvodu sú možnosti ďalšieho pokračovania práce pomerne široké. Na jednej strane je možné vylepšovať GUI, napríklad pomocou nového profesionálneho grafického dizajnu, doplniť možnosť ukladania nastavení syntetizátoru, pridať nápoved, alebo iné užívateľské štandardy. Na druhej strane sa ponúkajú možnosti lepšie prepracovať aktuálny zvukový modul a doplniť vlastnosti, ktoré postrádali užívatelia, ktorí sa zúčastnili testovania. Ďalšími dosť podstatnými oblasťami sú výkonové optimalizácie a prenositeľnosť na iné platformy. Čo sa týka generátora melódií, ďalší postup by sa mohol zamerať na on-line riešenie, pretože

aktuálna verzia v tomto režime nepracuje. Tiež by bolo vhodné doplniť pravidlá a možnosti konfigurácie, poprípade definovať určité štýly, na základe ktorých by sa generovala melódia. Štýl by sa mohol vzťahovať k hudobnému žánru alebo nástroju.

Literatúra

- [1] The Complete MIDI 1.0 Detailed Specification [online]. [cit. 16.1.2014].
URL <http://www.midi.org/techspecs/midispec.php>
- [2] Gilreath, P.: *Guide to MIDI Orchestration*. MusicWorks Atlanta, 2004, ISBN 978-0240814131, third edition.
- [3] Miranda, E. R.: *Computer Sound Design - Synthesis techniques and programming*. Focal Press, 2002, ISBN 978-0240516936, second edition.
- [4] Pekonen, J.: *Computationally Efficient Music Synthesis - Methods and Sound Design*. Diplomová práce, Helsinki University of technology, Červen 2007.
- [5] Russ, M.: *Sound Synthesis and Sampling*. Focal Press, 2009, ISBN 978-0240521053, third edition.
- [6] Snoman, R.: *The Dance Music Manual*. Focal Press, 2009, ISBN 978-0240521077, second edition.
- [7] Stilson, T.; Smith, J.: Analyzing the Moog VCF [online]. [cit. 16.1.2014].
URL <https://ccrma.stanford.edu/~stilti/papers/moogvcf.pdf>
- [8] Thede, L.: *Practical Analog and Digital Filter Design*. Artech House, 2004, ISBN 978-1580539159.
- [9] Wilmering, T.; Rehaag, T.; Dupke, A.: Pulsar Synthesis Revisited: Considerations for a MIDI Controlled Synthesiser [online]. [cit. 16.1.2014].
URL http://www.cmmr2012.eecs.qmul.ac.uk/sites/cmmr2012.eecs.qmul.ac.uk/files/pdf/papers/cmmr2012_submission_121.pdf

Dodatok A

Obsah CD

Na CD nosiči je možné nájsť kompletné zdrojové kódy práce, spolu s krátkym popisným súborom. Tento súbor obsahuje stručný návod ako prácu preložiť na výsledné .dll a tiež zoznam potrebných nástrojov k prekladu. V samostatnej zložke je rozšírenie práce implementované v jazyku Python a k nemu tiež stručný návod. Na CD sú tiež zložky, ktoré obsahujú príklady výstupov jednotlivých častí práce. Súčasťou nosiča je aj demonštračné video, ktoré vzniklo ako prezentácia práce. Poslednou časťou CD sú zdrojové kódy tejto dokumentácie v \LaTeX .

Dodatok B

Manuál

Tento dodatok popisuje stručný návod na použitie vytvoreného VST pluginu a zoznamuje užívateľa s jeho grafickým rozhraním. Návod je rozčlenený do viacerých sekcií, podľa jednotlivých hlavných blokov syntetizátoru.

B.1 Inštalácia a spustenie

Keďže výsledný VST plugin má formát dynamickej knižnice .dll je inštalácia pomerne jednoduchá. Knižnicu stačí nakopírovať do adresára, z ktorého hosťovská aplikácia (DAW - Digital Audio Workstation) načítava jednotlivé VST pluginy a po reštartovaní DAW by mal byť plugin viditeľný pre užívateľa a pripravený na použitie. Spôsob spustenia je ďalej špecifikovaný v návode na použitie pre dané DAW (používanie VSTi).

B.2 Oscilátory

Pohľad na sekciu oscilátorov v GUI zobrazuje obrázok [B.1](#). Syntetizátor má 2 nezávislé moduly s konfigurovateľnou hlasitosťou (Volume), tvarom výstupnej vlny (Shape) a možnosťou reštartovať označovanou tiež ako retrigger (prepínač nad parametrom Volume). U každého oscilátora je tiež možné nastaviť frekvenčný posun oproti aktuálnej hranej note pomocou parametrov Oct a Semi.

B.3 Grain modul

Blok granulárneho modulu zobrazuje obrázok [B.2](#). U tohto modulu je možné konfigurovať tvar zdrojového signálu (SrcShape), amplitúdovú obálku jednotlivých zrníčok (EnvShape), dĺžku trvania zrníčok (GrainSize), bazovú frekvenciu (PitchBase), variabilitu bazovej frekvencie (PitchVar), variabilitu hlasitosti (VolVar), variabilitu oneskorenia (DelayVar) a celkovú hlasitosť výstupného signálu modulu (Volume).

B.4 Filter

Modul filtra zachytáva obrázok [B.3](#). Filter má nastaviteľnú medznú frekvenciu (Cutoff), veľkosť rezonancie (Res) a charakter pomocou výberového menu (LP, BP alebo HP). Parametre Attack, Decay, Sustain a Release slúžia pre nastavenie priebehu modulačnej obálky,



Obr. B.1: Blok oscilátorov



Obr. B.2: Blok granulárneho modulu

ktorou je možné modulovať frekvenciu filtra. Hĺbku tejto kladnej modulácie určuje parameter Env. Zvolenie parabolického alebo lineárneho priebehu je dostupné z výberového menu (Lin, Par).



Obr. B.3: Blok filtra

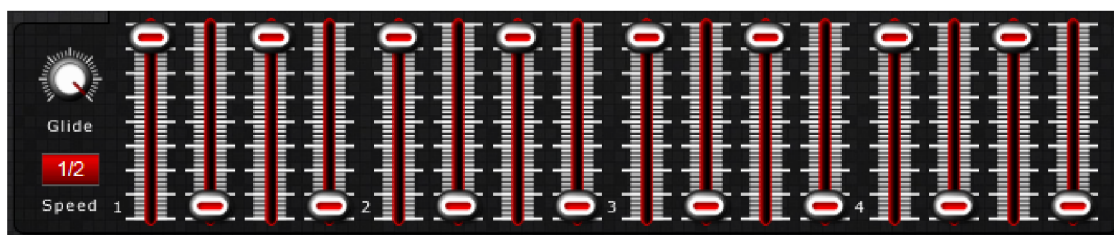
B.5 Modulátory

Plugin poskytuje užívateľovi 2 moduly LFO a 1 krokový modulátor, ktorý je tiež možné použiť ako globálny Gater efekt. U LFO je možné nastaviť frekvenciu (Freq) a pomocou výberového menu tvar signálu (Sin, Saw, Ramp, Square alebo Triangle). LFO pracujú ako voľné a ich stav sa MIDI udalosťami nemení. Moduly LFO zobrazuje obrázok B.4



Obr. B.4: Blok LFO modulátorov

Krokový modulátor (obr. B.5) pozostáva zo 16 segmentov a je synchronizovaný s tempom v DAW. Hlasitosť jednotlivých segmentov je možné dynamicky konfigurovať. Tiež je možné meniť dĺžku jednotlivých segmentov pomocou výberového menu (1/1, 1/2, 1/4, 1/8 doby). Možnosti nastavenia dĺžky segmentov sú odvodené od tempa hosťovskej aplikácie. Veľkosť vyhladenia modulačného signálu medzi jednotlivými stavmi je regulovateľná pomocou parametra Glide.



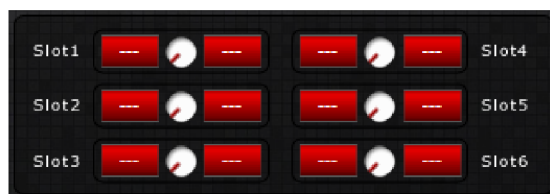
Obr. B.5: Blok krokového modulátora

B.6 Modulačná matica

Modulačnú maticu znázorňuje obrázok B.6. Pozostáva zo 6 nastaviteľných slotov, ktoré dovoľujú modulovať 5 modulačných cieľov (OSC1, OSC2, FM, Filter a Res) pomocou 3 modulačných zdrojov (LFO1, LFO2, Gater). Slot, ktorý nemá pridelený zdroj alebo cieľ je neaktívny. Hĺbku kladnej modulácie určuje parameter pridelený ku každému slotu.

B.7 Zosilňovač

Tento blok znázorňuje obrázok B.7. Služi pre tvarovanie amplitúdovej obálky výstupného signálu pomocou parametrov Attack, Decay, Sustain a Release. Podobne ako u generátora modulačnej obálky pre frekvenciu filtra je možné zvoliť lineárny alebo parabolický priebeh signálu (Lin, Par). Okrem týchto parametrov obsahuje ešte ovládacie prvky pre celkovú hlasitosť (Volume) a stereo hĺbku (Width) signálu syntetizátora.



Obr. B.6: Blok modulačnej matice



Obr. B.7: Blok zosilňovača

B.8 Efekty

Syntetizátor disponuje celkom 3 vstavanými efektmi, ktoré majú pevne dané zapojenie a umožňujú konfigurovať svoje parametre. Sekciu efektov zobrazuje obrázok B.8. Prvým efektom je Chorus, ktorý disponuje unikátnym modulačným zdrojom a umožňuje užívateľovi konfigurovať frekvenciu (Freq) a hĺbku modulácie (Depth) a celkový dopad efektu na výsledný signál (Mix). Chorus je možné v prípade potreby úplne vyradiť z činnosti. Ďalším efektom, ktorý syntetizátor užívateľovi ponúka je Delay, ktorý pracuje so zapojením PingPong. Delay nie je časovo synchronizovaný a je možné nastavovať jeho dĺžku v ms (Delay), veľkosť spätnej väzby (FeedBack) a podobne ako u Chorusu celkový mix efektu (Mix). Posledným efektom je efekt saturácie, ktorý dodáva výslednému zvuku analógový charakter. Užívateľ má možnosť zvoliť 1 zo 4 možných nastavení (Saturation, Tube, Sharp-Tube alebo Tape) a tiež veľkosť zosilnenia vstupného signálu pred vstupom do nelineárnej časti efektu (Drive).



Obr. B.8: Blok efektov

Dodatok C

Zoznam parametrov syntetizátoru

Typ	Názov	Popis
enum	ModSrc1	Zdroj modulácie pre modulačný slot 1
float	ModDepth1	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 1
enum	ModDst1	Cieľ modulácie pre modulačný slot 1
enum	ModSrc2	Zdroj modulácie pre modulačný slot 2
float	ModDepth2	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 2
enum	ModDst2	Cieľ modulácie pre modulačný slot 2
enum	ModSrc3	Zdroj modulácie pre modulačný slot 3
float	ModDepth3	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 3
enum	ModDst3	Cieľ modulácie pre modulačný slot 3
enum	ModSrc4	Zdroj modulácie pre modulačný slot 4
float	ModDepth4	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 4
enum	ModDst4	Cieľ modulácie pre modulačný slot 4
enum	ModSrc5	Zdroj modulácie pre modulačný slot 5
float	ModDepth5	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 5
enum	ModDst5	Cieľ modulácie pre modulačný slot 5
enum	ModSrc6	Zdroj modulácie pre modulačný slot 6
float	ModDepth6	Hĺbka modulácie pre modulačný slot 6
enum	ModDst6	Cieľ modulácie pre modulačný slot 6
enum	Waveform1	Tvar vlny pre oscilátor 1
enum	Octave1	Posun oktávy pre oscilátor 1
enum	Semi1	Posun tónu pre oscilátor 1
bool	Retrigger1	Resetovanie oscilátora 1
float	OSC1Vol	Hlasitosť oscilátora 1
enum	Waveform2	Tvar vlny pre oscilátor 2
enum	Octave2	Posun oktávy pre oscilátor 2
enum	Semi2	Posun tónu pre oscilátor 2
bool	Retrigger2	Resetovanie oscilátora 2
float	OSC2Vol	Hlasitosť oscilátora 2
float	FmModulation	Hĺbka FM modulácie medzi OSC1 a OSC2
bool	RingModulation	Ring modulácie medzi OSC1 a OSC2
enum	GrainWaveform	Tvar vlny zdrojového signálu pre granulárny modul
enum	GrainSize	Veľkosť zrníčka granulárneho modulu

enum	GrainShape	Tvar amplitúdovej obálky zrníčka
float	VolumeVariation	Variácia hlasitosti zrníčok
float	PitchVariation	Variácia frekvencie zrníčok
float	DelayVariation	Variácia oneskorenia medzi zrníčkami
float	PitchBase	Bázová frekvencia zrníčok
float	GrainVolume	Hlasitosť granulórneho modulu
float	FilterFreq	Medzná frekvencia filtra
float	FilterResonance	Rezonancia filtra
enum	FilterType	Charakter filtra
float	FilterAttack	Attack parameter pre modulačnú obálku filtra
float	FilterDecay	Decay parameter pre modulačnú obálku filtra
float	FilterSustain	Sustain parameter pre modulačnú obálku filtra
float	FilterRelease	Release parameter pre modulačnú obálku filtra
enum	FilterEnvShape	Tvar modulačnej obálky filtra
float	FilterEnv	Hĺbka modulácie filtra pomocou modulačnej obálky
float	LFO1Freq	Frekvencia pre LFO1
enum	LFO1Shape	Tvar vlny pre LFO1
float	LFO2Freq	Frekvencia pre LFO2
enum	LFO2Shape	Tvar vlny pre LFO2
float	AmpAttack	Attack parameter pre modulačnú obálku zosilňovača
float	AmpDecay	Decay parameter pre modulačnú obálku zosilňovača
float	AmpSustain	Sustain parameter pre modulačnú obálku zosilňovača
float	AmpRelease	Release parameter pre modulačnú obálku zosilňovača
enum	AmpEnvShape	Tvar modulačnej obálky zosilňovača
float	ChorusFreq	Frekvencia efektu chorus
float	ChorusDepth	Hĺbka efektu chorus
float	ChorusMix	Mix efektu chorus
bool	ChorusEnabled	On/Off pre efekt chorus
float	PPDelay	Veľkosť oneskorenia pre delay
float	PPFeedback	Veľkosť spätnej väzby pre delay
float	PPMix	Mix efektu delay
bool	PPEnabled	On/Off pre efekt delay
float	Drive	Veľkosť zosilnenia pri saturácii
enum	SaturationType	Nastavenie saturačnej krivky
float	StereoWidth	Stereo hĺbka výstupného signálu
float	Master	Celková hlasitosť výstupu
float	GaterTick0	Hodnota slotu 0 krokového modulátora
float	GaterTick1	Hodnota slotu 1 krokového modulátora
float	GaterTick2	Hodnota slotu 2 krokového modulátora
float	GaterTick3	Hodnota slotu 3 krokového modulátora
float	GaterTick4	Hodnota slotu 4 krokového modulátora
float	GaterTick5	Hodnota slotu 5 krokového modulátora
float	GaterTick6	Hodnota slotu 6 krokového modulátora
float	GaterTick7	Hodnota slotu 7 krokového modulátora
float	GaterTick8	Hodnota slotu 8 krokového modulátora
float	GaterTick9	Hodnota slotu 9 krokového modulátora

float	GaterTick10	Hodnota slotu 10 krokového modulátora
float	GaterTick11	Hodnota slotu 11 krokového modulátora
float	GaterTick12	Hodnota slotu 12 krokového modulátora
float	GaterTick13	Hodnota slotu 13 krokového modulátora
float	GaterTick14	Hodnota slotu 14 krokového modulátora
float	GaterTick15	Hodnota slotu 15 krokového modulátora
float	GaterGlide	Veľkosť vyhladenia výstupu krokového modulátora
enum	GaterStep	Čas trvania jedného stavu krokového modulátora
bool	GaterEnabled	On/Off pre efekt gater