

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE

FAKULTA FILMOVÁ A TELEVIZNÍ

Studijní program:
Filmové, televizní a fotografické umění a nová média

Studijní obor:
Teorie filmové a multimediální tvorby

DISERTAČNÍ PRÁCE

**TYOLOGIE A MORFOLOGIE ZVUKOVĚ-
DRAMATURGICKÝCH PROSTŘEDKŮ ELEKTROAKUSTICKÉ
HUDBY**

MgA. Ing. Ondřej Urban

Vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Syrový, CSc.

Oponenti práce: Prof. Ivan Kurz, Ing. Čestmír Kadlec

Datum obhajoby:

Přidělovaný akademický titul: Doktor (Ph.D.)

Praha 2007

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

FILM AND TV SCHOOL

Program of study:
Film, Television and Photographic Art and New Media

Field of study:
Theory of Film and Multimedia Creation

DOCTORAL THESIS

**TYOLOGY AND MORFOLOGY OF SOUND-
DRAMATURGICAL MEANS OF ELECTROACOUSTIC
MUSIC**

MgA. Ing. Ondřej Urban

Tutor: Prof. Ing. Václav Syrový, CSc.

Opponents: Prof. Ivan Kurz, Ing. Čestmír Kadlec

Date of defence:

Degree to be reached: Doctor (Ph.D.)

Prague 2007

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem doktorskou disertační práci s názvem

„Typologie a morfologie zvukově-dramaturgických prostředků elektroakustické hudby“

vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne 12. 4. 2007

.....

podpis autora

Upozornění

Využití a společenské uplatnění výsledků disertační práce nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy tj. souhlasu autora a AMU v Praze.

Poděkování

Děkuji svému školiteli, Prof. Ing. Václavu Syrovému, CSc., za podporu, trpělivost a cenné rady v celém průběhu mého doktorského studia i při psaní a dokončování této disertační práce.

Dále chci poděkovat za podporu mým milým kolegům z kolektivu pracovníků Zvukového studia HAMU.

V neposlední řadě chci poděkovat svým blízkým, především rodičům, za trpělivost a podporu zejména během intenzivního dokončování disertační práce.

V Praze dne 11. 4. 2007

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá typologií zvukově-dramaturgických prostředků elektroakustické (EA) hudby. Důraz je kladen především na signály uměle generované. Neklade si za cíl být vyčerpávající publikací na téma „jak na to“. Opírá se o historické souvislosti objevů na poli elektroniky, mechaniky, akustiky, elektroakustiky a zabývá se vývojem nového fenoménu hudby 20. století – zvukové syntézy, užití v hudební tvorbě. Shrnuje základní typy metod umělého generování signálu, způsoby jejich užití a programování. Všímá si vývoje elektronických hudebních nástrojů, jejich role z hlediska přínosů pro tvorbu v různých žánrech soudobé elektronické hudby. Uvádí základní jevy související s vjemem uměle generovaného signálu a dále pak vybrané problémy dramaturgie a instrumentace EA hudby.

Abstract

This doctoral thesis has the main purpose in typology of sound-dramaturgical means of electroacoustic music. The main accent is put on synthesized signals. The goal of this thesis is not to be a „how to“ publication. It is based on historical context and discoveries in the field of electronics, mechanics, acoustics, electroacoustics and focuses on the evolution of new phenomena in music of 20th century – sound synthesis, used in music production. The summary of basic methods of sound synthesis is made, as well as of the ways how to program and use them. It looks to the history of electronic music instruments and their role in variety of contemporary electronic music styles. The basic phenomena of synthesized sound perception are described and also selected problems of dramaturgy and orchestration methods are discussed.

OBSAH

Úvod	1
1. Vývoj technologických prostředků elektroakustické hudby	5
1.1 Nejstarší počátky hudební elektroniky	5
1.2 Magnetický záznam zvuku jako nový tvůrčí prostředek EAH	10
1.3 Nástup napěťového řízení syntezátorů	15
1.4 MIDI standard jako prostředek komunikace v hudební elektronice	19
1.5 Digitalizace elektronických nástrojů na úrovni generování signálu	21
1.6 Nástup počítačů a specializovaných programů	22
1.7 Matematické modelování	24
1.8 Integrace technologických prostředků, DAW	26
2. Teorie zvukové syntézy	30
2.1 Pojem zvukové syntézy	30
2.1.1 Imitativní role zvukové syntézy	32
2.1.2 Inovativní role zvukové syntézy	35
2.2 Teorie uměle generovaného zvukového signálu	36
3. Typologie metod zvukové syntézy	40
3.1 Součtová (aditivní) syntéza	40
3.2 Rozdílová (subtraktivní) syntéza	42
3.3 Modulační metody syntézy	47
3.4 Tvarová syntéza	50
3.5 Modelující metody zvukové syntézy	53
3.5.1 Vlastnosti a možnosti matematického modelování	53
3.5.2 Obecný model akustického nástroje	54
3.5.3 Klasická metoda matematického modelování	56
3.5.4 Modální syntéza	58
3.5.5 Syntéza McInthyre, Schumacher a Woodhouse	60

3.5.6	Syntéza vlnvodů	61
4.	Fyziologické a psychoakustické jevy při vjemu umělého signálu	64
4.1	Ochuzující jevy	64
4.2	Obohacující jevy	67
4.3	Binaurální slyšení	68
5.	Typologie zvukových objektů	69
5.1	Jednoduchý objekt	70
5.2	Složený objekt	72
5.3	Jednoduchá grupa	73
5.4	Složená grupa	73
6.	Vybrané problémy dramaturgie a instrumentace EAH	74
6.1	Omezení realizace EAH zvukovým záznamem	77
6.2	Prvky a formy realizace EAH	79
6.2.1	Vertikální struktura EA kompozice	79
6.2.2	Horizontální struktura EA kompozice	80
	Závěr	82
	Seznam použité literatury	83

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Seznam ukázek na přiloženém CD_____	P1
Příloha 2	Zvukový mastering_____	P2
	P2.1 Technologie výroby kompaktní desky (CD)_____	P3
	P2.2 Procesy a nástroje zvukového masteringu _____	P4
	P2.2.1 Korekční úpravy_____	P4
	P2.2.2 Dynamické úpravy_____	P6
	P2.2.3 Generátory užitečných zkreslení (excitery)_____	P8
	P2.2.4 Harmonické syntezátory_____	P8
	P2.2.5 Dozvukové procesory_____	P9
	P2.2.6 Denoising, declipping a declipping_____	P9
	P2.2.7 Měření signálových veličin a monitoring_____	P9
	P2.3 Uspořádání operací při masteringu_____	P10

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>A/D</i>	<i>Analog to Digital Converter</i>	<i>analogově–digitální převodník</i>
<i>ADSR</i>	<i>Attack-Decay-Sustain-Release</i>	<i>generátor obálky se čtyřmi parametry</i>
<i>AM</i>	<i>Amplitude Modulation</i>	<i>amplitudová modulace</i>
<i>ASIO</i>	<i>Audio Streaming Input/Output</i>	<i>technologie zpracování digitálních zvukových signálů, vyvinuta firmou Steinberg</i>
<i>AU</i>	<i>Audio Unit</i>	<i>standard rozhraní zásuvných (plug-in modulů) firmy Apple v aplikaci Logic</i>
<i>BPF</i>	<i>Band Pass Filter</i>	<i>filtr typu pásmová propust</i>
<i>CCRMA</i>	<i>Centre for Computer Research in Music and Acoustics</i>	<i>centrum pro počítačový výzkum v oblasti hudby a akustiky ve Stanfordu (USA)</i>
<i>CPU</i>	<i>Central Processing Unit</i>	<i>centrální procesorová jednotka (procesor)</i>
<i>CV</i>	<i>Control Voltage</i>	<i>řídící napětí</i>
<i>D/A</i>	<i>Digital to Analog Converter</i>	<i>digitálně–analogový převodník</i>
<i>DAW</i>	<i>Digital Audio Workstation</i>	<i>digitální pracovní stanice pro zpracování zvukového signálu</i>
<i>DCA</i>	<i>Digitally Controlled Amplifier</i>	<i>digitálně řízený zesilovač</i>
<i>DCB</i>	<i>Digital Comunication Bus</i>	<i>digitální komunikační rozhraní elektronických nástrojů firmy Roland (předchůdce MIDI komunikace)</i>
<i>DCF</i>	<i>Digitally Controlled Filter</i>	<i>digitálně řízený filtr</i>
<i>DCO</i>	<i>Digitally Controlled Oscillator</i>	<i>digitálně řízený oscilátor (generátor)</i>
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i>	<i>digitální signálový procesor</i>
<i>EG</i>	<i>Envelope Generator</i>	<i>generátor obálky</i>
<i>FIR</i>	<i>Finite Impulse Response</i>	<i>konečná impulzní odezva (např. digitálního filtru)</i>
<i>FM</i>	<i>Frequency Modulation</i>	<i>frekvenční modulace nebo též název pro zvukovou syntézu</i>

<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>	<i>grafické uživatelské rozhraní</i>
<i>HPF</i>	<i>High Pass Filter</i>	<i>filtr typu horní propust</i>
<i>KBD</i>	<i>Keyboard</i>	<i>klávesnice nebo klaviatura</i>
<i>KS</i>	<i>Karplus-Strong</i>	<i>Karplus-Strong algoritmus modelování strun</i>
<i>LFO</i>	<i>Low Frequency Oscillator</i>	<i>generátor pomalých kmitů</i>
<i>LPF</i>	<i>Low Pass Filter</i>	<i>filtr typu dolní propust</i>
<i>JMSC</i>	<i>Japan MIDI Standards Comitee</i>	<i>japonský kontrolní orgán MIDI standardu</i>
<i>MIDI</i>	<i>Musical Instruments Digital Interface</i>	<i>digitální komunikační rozhraní hudebních nástrojů</i>
<i>MM</i>	<i>Mathematical Modelling</i>	<i>matematické modelování</i>
<i>MMA</i>	<i>MIDI Manufacturers Comitee Association</i>	<i>komise sdružení výrobců MIDI zařízení</i>
<i>MSW</i>	<i>McInthyre, Schumacher, Woodhouse</i>	<i>jedna z metod matematického modelování zvuku nazvaná podle svých autorů</i>
<i>NAMM</i>	<i>National Association of Music Merchants</i>	<i>výstava hudebních nástrojů v Los Angeles</i>
<i>PCM</i>	<i>Pulse Code Modulation</i>	<i>pulzně-kódová modulace, neboli nahrazení spojitého průběhu signálu sledem diskrétních hodnot – digitálních kódů</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop</i>	<i>smyčka fázového závěsu</i>
<i>PM</i>	<i>Phase Modulation</i>	<i>fázová modulace</i>
<i>PPM</i>	<i>Peak Program Meter</i>	<i>měřič špičkové úrovně signálu</i>
<i>PW</i>	<i>Pulse Width</i>	<i>šířka pulzu</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>	<i>modulace šířky pulzu</i>
<i>RC</i>	<i>Resistor – Capacitor</i>	<i>pasivní rezonanční el.obvod nebo vnější síť aktivního obvodu, sestavená z rezistorů a kapacitorů (kondenzátorů)</i>

<i>RTAS</i>	<i>Real Time Audio Suite</i>	<i>standard rozhraní zásuvných modulů firmy Digidesign v aplikaci Pro Tools</i>
<i>RM</i>	<i>Ring Modulation</i>	<i>kruhová modulace</i>
<i>SDS</i>	<i>Sample Dump Standard</i>	<i>doplněk MIDI normy pro přenos zvukových vzorků mezi samplery</i>
<i>TDM</i>	<i>Time Division Multiplex</i>	<i>systém multiplexu s časovým dělením firmy Digidesign v systémech Pro Tools HD</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>	<i>univerzální sériový komunikační protokol digitální techniky</i>
<i>VA</i>	<i>Virtual Acoustic</i>	<i>virtuální akustická syntéza firmy Yamaha</i>
<i>VCA</i>	<i>Voltage Controlled Amplifier</i>	<i>napětově řízený zesilovač</i>
<i>VCF</i>	<i>Voltage Controlled Filter</i>	<i>napětově řízený filtr</i>
<i>VCO</i>	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>	<i>napětově řízený oscilátor (generátor)</i>
<i>VST</i>	<i>Virtual Studio Technology</i>	<i>standard rozhraní a technologie zpracování zvukových signálů pro zásuvné moduly vyvinuté firmou Steinberg</i>
<i>VSTi</i>	<i>VST instrument</i>	<i>virtuální nástroj využívající VST rozhraní</i>

ÚVOD

Elektronická hudba a hudba konkrétní bývá často souhrnně nazývána hudbou elektroakustickou (dále EAH). Jde velmi zjednodušeně řečeno o ten způsob hudebního vyjádření, kde figuruje více či méně signál uměle generovaný a/nebo uměle (pomocí technologických prostředků) tvůrčím způsobem upravený. Použití elektroniky pouze ve fázi zpracování zaznamenaného signálu, nebo také ve fázi jeho primárního generování, zaznamenává neustálý rozvoj jak v rovině čistě technologické, tak i ve vývoji hudebního myšlení tvůrců EAH. Cesty, které ukázal např. Karlheinz Stockhausen, byly směřováním k budoucímu stavu věci - do tvorby EA a elektronické hudby vstupuje partner, protihráč, pomocník i diktátor, a tím je počítač. S trochou nadsázky by se dalo říci, že platí vztah: Stockhausen + Computer = Kraftwerk (němečtí průkopníci elektronického a industriálního směru populární hudby 70. a 80. let dvacátého století). S nástupem počítače vstupují do popředí pojmy jako je minimalismus, industrialismus. Elektronická hudba byla odlidštěna. Ve fázi syntézy a zpracování uměle generovaných zvuků je to od počátku vývoje čistě strojová záležitost s vlivem lidského faktoru na úrovni ovládání nebo v lepším případě tvůrčí činnosti s pomocí techniky. Ve fázi tvůrčí činnosti, které říkáme hudební kompozice, to již dnes tak jednoznačně neplatí. Účel často světí prostředky, „tvůrci“ jsou ve skutečnosti obsluhujícím personálem moderní techniky, protože bez pohybu myši po obrazovce počítače to zatím nejde, často používané hudební a zvukové postupy se ještě více opakují, protože už nikoho nenapadne, že „to jde“ také jinak.

Dovolil jsem si tuto filosofickou úvahu rozvinout hned na úvod. V žádném případě nehodlám posuzovat přínos nebo naopak kritiku té či oné hudební skupiny či hudebního směru. Cílem je zobecnit platné (a naštěstí neměnné) principy akustiky, elektroakustiky a elektroniky s ohledem na tvůrčí přístup k EA hudbě. Snažil jsem se shrnout vše potřebné pro pochopení principů umělého generování zvuku, pro tvůrčí práci s ním a v neposlední řadě pro zušlechtění obrovských zvukových možností současné hudební elektroniky pro příjemce nejcitlivějšího a nejzranitelnějšího - lidské ucho. Věřím, že i člověk bez technického vzdělání najde v publikaci „to své“ a zamyslí-li se před otočením knoflíku, stiskem tlačítka nebo provedením počítačové operace, co se v tu chvíli alespoň v hrubých obrysech v jádru chladného stroje odehrává, pak má jeho práce smysl. Je už jedno, jestli se vydá cestou pokračovatelů Schaeffera,

Xenakis a již zmíněného Stockhausena, nebo nastoupí cestu komerční kariéry v elektronickém popu. Hlavní je, aby jeho práce byla nejen kvalitně řemeslně provedená, ale také tvůrčí.

To, co považujeme za hudbu elektroakustickou, můžeme v zásadě rozdělit na dva hlavní typy, jak vyplývá z historického vývoje této hudební oblasti:

1. **hudba konkrétní** – jejím primárním zvukovým materiálem jsou přirozené zvuky, tedy zvuky vokální, instrumentální, přírodní nebo industriální. Materiál reálného světa je uchopen procesem záznamu signálu (analogovým či digitálním) a dále metodami zpracování signálu. Jedná se zejména o úpravu dynamiky, mixáž, kmitočtové úpravy, efekty, obrácení smyslu přehrávání, změnu ladění apod. Významným činitelem při zpracování přirozených zvuků je fenomén stříhu zvukové informace, ať už pro účely zajištění nezbytné technologické čistoty (např. na začátku či na konci znění) nebo prodloužení/zkrácení zvukové informace, např. při tzv. samplingu. Nové možnosti digitálního záznamu a zpracování audiosignálu dovolují manipulaci s obecným zvukovým materiálem snadno a rychle.

2. **hudba elektronická** – materiálem je uměle generovaný zvuk. Ke svému vzniku využívá buď diskrétní přístroje a obvody, jako jsou generátory tvarových kmitů, filtrační a modulační obvody apod. Separaci jednotlivých funkčních bloků odstranil nástup syntezátorů. K hudbě elektronické je dále zapotřebí obdobných metod zpracování signálu jako v případě hudby konkrétní.

Především je nutné podotknout, že uvedené dělení, vyplývající z historických souvislostí, pozbývá na valném významu s nástupem výpočetní techniky. V elektroakustických kompozicích současnosti můžeme vysledovat buď snahu po stylové čistotě co do volby materiálu zvukové informace na straně jedné nebo snahu o zobecnění materiálových zdrojů a vytvoření jakési univerzální koncepce na straně druhé. Z širšího úhlu pohledu se však striktní dělení na hudbu konkrétní a elektronickou jeví jako zastaralé. Přirozený signál totiž vstupuje do procesu zvukové syntézy (sampling), kde je dále zpracováván již čistě elektronicky. Zvuk přirozený a elektronický se svými parametry mohou navzájem ovlivňovat (modulace), mohou do sebe dokonce přecházet v horizontálním (fading) nebo vertikálním (morphing) směru. Elektronicky generovaný signál, který byl dlouho vnímán jako odlidštěný a sterilní, lze dnes postavit na úroveň zvuku přirozeného, při zachování obdobných algoritmů

zpracování. Také přirozený zvuk (např. tón hudebního nástroje, výbuch) lze značně stylizovat a vzdálit od své původní podoby. Snad jen při tvorbě zvukových koláží platí stále snaha o zachování věrnosti své předloze a identifikovatelnosti zvukového materiálu. Obecně pojatá hudba elektroakustická si však s klasickým způsobem dělení nevystačí.

Úspěšněji lze dělit hudbu elektroakustickou na studiovou, tedy tu, která je realizována v podmínkách specializovaného pracoviště a vzniklá kompozice jej opouští v definitivním tvaru. Opačný přístup představuje EA kompozice, která je určena pro živou produkci (live music). Kombinací připravených postupů a algoritmů jsou dány předpoklady vývoje zpracování zvuku, vstupními parametry je však hra na skutečný hudební nástroj. Živý hráč (nebo více hráčů) je tak v přímé interakci se zvukovým výstupem např. počítačové pracovní stanice, kterou obsluhuje buď samotný interpret, autor nebo jiná pověřená osoba. Do provedení skladby také vstupuje větší či menší podíl improvizace, takže výsledná podoba skladby je vždy originálem. Otázkou zůstává, zda-li je živá hra na syntezátor na koncertním pódiu živým provedením EA kompozice či nikoliv. Pokud nevystupuje syntezátor čistě v imitativní roli jako náhražka akustického nástroje, pak lze také hovořit o určitém typu „live“ EA produkce.

Pro kompoziční práci s tradičními akustickými nástroji máme k dispozici řadu učebnic a příruček. To, že publikace tohoto typu pro umělé signály chybí, je dáno hned několika fakty. Zaprvé, množinu akustických nástrojů je možno do velké míry brát jako uzavřenou, konečnou. Objevují se sice nové nástroje, převážně se ale jedná o modifikace a technické zdokonalování existujících druhů. Naproti tomu vznikají stále nové nástroje elektronické, ať už v hardwarové či softwarové podobě. Zadruhé, práce s tradičními hudebními nástroji akustického typu se opírá o dlouhý historický vývoj, který prochází napříč hudebními slohy a dosáhl v jistém ohledu svého vrcholu v romantické epoše. Instrumentace EAH s využitím hudební elektroniky je obecně využívána teprve bezmála půl století a většina pouček pro využití umělých zvuků vychází buď ze zásad klasické instrumentace v imitativním zaměření (náhrada nebo obohacení klasického instrumentáře např. v populární a užitě hudbě) nebo je dílem intuice a dílčích poznatků jednotlivých autorů – realizátorů v inovativní a experimentální tvorbě. Zejména druhá oblast využití hudební elektroniky trpí tak nedostatkem obecně platných zásad pro úspěšnou instrumentaci.

Učebnice tradiční instrumentace obsahuje zpravidla vždy nejprve kapitoly nauky o hudebních nástrojích z historického pohledu, dále z hlediska akustiky vzniku tónu, jejich konstrukce a použití. V následujícím textu se tedy nejprve zaměříme na historické předpoklady vývoje technologických prostředků realizace EAH (kap. 1). Elektroakustická hudba je vždy spjata se stavem vývoje a dostupností technologických prostředků a vymožeností. Realizaci hudby elektroakustické také chápeme jako uzavřený tvar, který je snad možné někdy v budoucnu modifikovat, ale její vznik je provázán vždy s aktuálním stavem techniky. V obecněji pojaté kapitole 2 se pak budeme zabývat teorií uměle generovaného zvukového signálu ve vztahu k lidskému vnímání. Dále se seznámíme s jednotlivými metodami zvukové syntézy (kap. 3), jejich společnými rysy a odlišnostmi, výhodami a nevýhodami pro konkrétní použití. V kapitole 4 provedeme shrnutí základních jevů fyziologie a psychologie slyšení a vjemu umělého signálu. V kapitole 5 bude popsán princip typologie zvukových objektů, které definoval Vladimír Lébl, doplněný o nové poznatky.

V kapitole 6 se zaměříme na vybrané jevy a příklady využití umělých signálů v izolované i kombinované podobě s využitím poznatků předchozích kapitol, nikoli však z pohledu kompozičního, ale realizačního.

První příloha disertační práce obsahuje seznam zvukových ukázek na přiloženém CD a druhá příloha se věnuje popisu důležité oblasti zpracování zvukové nahrávky – zvukovému masteringu.

1. VÝVOJ TECHNOLOGICKÝCH PROSTŘEDKŮ ELEKTROAKUSTICKÉ HUDBY

1.1 Nejstarší počátky hudební elektroniky

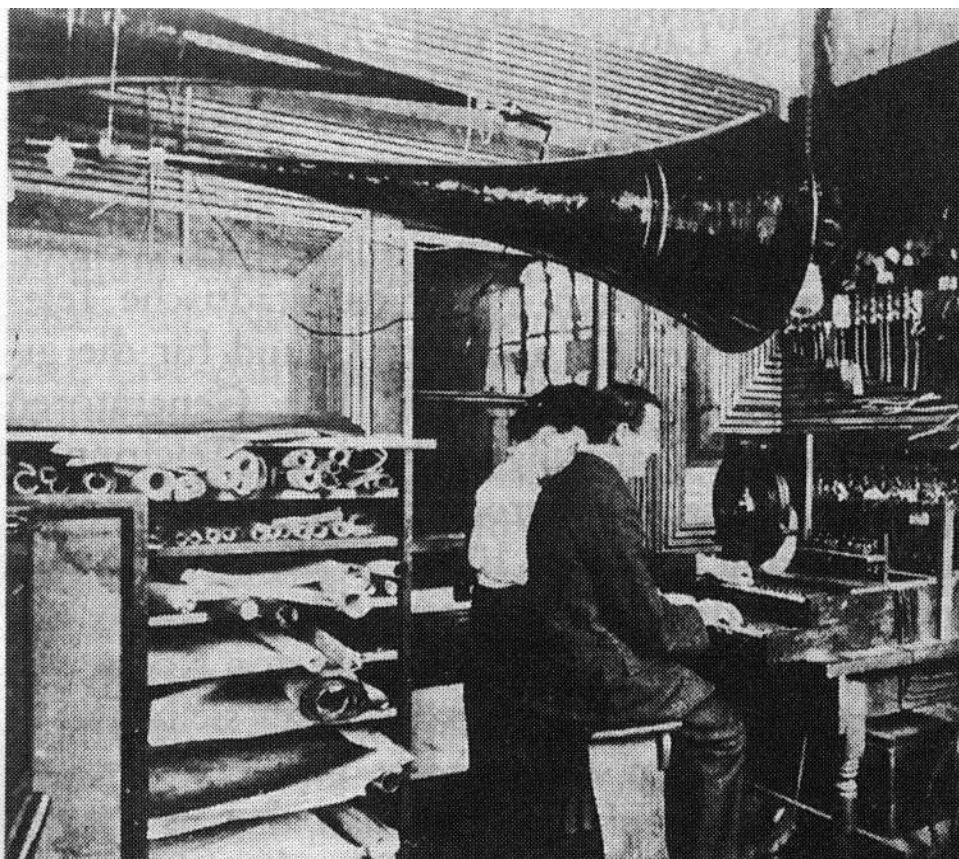
Vývoj EA hudby byl již od prvopočátků pevně spjat s vývojem a výzkumem nových technologií. Je to logické – výzkumné týmy, často na půdě univerzitních center, přinášely do klasického pojetí role hudebního nástroje a do známých principů tvorby tónu akustickou cestou nové směry. Aplikovaly objevy z oblasti elektroniky, elektroakustiky a výpočetní techniky do praxe experimentálních skladatelů a ti zpětně ovlivňovali na základě svých zkušeností vývoj těchto nových metod. Máme ovšem na mysli tu fázi vývoje hudební elektroniky a souvisejících oborů, které činily nové objevy exkluzivním zbožím pro nemnoho vyvolených. Od 70. let 20. století se hodnota a ojedinělost technologických prostředků postupně začala devalvovat a stala se masově dostupnou. To umožňuje na jednu stranu tvorbu hudby s využitím elektroniky prakticky každému, na straně druhé díky procesu automatizace a zvukové uniformity dává vznikat obrovskému množství netvůrčích, nerůznorodých a neoriginálních elektroakustických skladeb.

Historii tvorby zvuku pomocí elektronických obvodů lze vnímat z mnoha hledisek: částečně jako vývoj ryze technologický, hudební, společenský, estetický, filosofický atd. Vývoj elektronického zvuku je spjat z životním stylem, přemýšlením o světě. Je plný (jako jiná vědecká odvětví) slepých uliček, převratných objevů a nekonečného objevování nových možností. Postihnout všechny důležité a převratné objevy v této oblasti je nad rámec této publikace. Proto si všimneme pouze významných milníků, které jsou pro historii EA hudby nejdůležitější a které jsou její pomyslnou osou.

Před uvedením historického přehledu bude nutné důsledně odlišit tři přístupy generování zvukového signálu s využitím elektřiny: **elektrický**, **elektroakustický** (někdy též nazývaný jako elektrofonický) a ryze **elektronický**. Elektrické nástroje využívají elektrické energie, případně indukované energie magnetické, k rozechvívání pružných mechanických struktur jako budícího impulzu s krátkodobým nebo dlouhodobým trváním. Příkladem může být elektrický zvonek, který je rozezvučen pohybem kladívka ve střídavém magnetickém poli elektrické cívky. Nástroje elektroakustické využívají

mechanické vybuzení (např. trsnutí o strunu elektrické kytary), následná přeměna a zesílení zvukového signálu se děje pomocí elektroakustického měniče (snímače) s připojeným zesilovačem a obvodu pro úpravu tvaru signálu. Nástroje elektronické se vyznačují tím, že ke své funkci využívají elektronické obvody složené z polovodivých součástek diskrétních (elektronka, tranzistor) nebo integrovaných (integrovaný obvod, procesor). Zvukové kmity zde vznikají čistě elektronicky, bez přítomnosti mechanického pohybu.

Pravděpodobně nejstarší zmínkou o využití elektřiny pro tvorbu zvuku je elektrické cembalo (**Clavesin électrique**) z roku 1759, které sestrojil Jean-Baptiste de La Borde. Byl to nástroj, který využíval elektrostatické síly k rozeznění zvonků. Od té doby bylo učiněno ještě několik dalších pokusů, např. se zvuky obloukových lamp atd. Skutečně revolučním a pro další vývoj elektroakustické hudby nejpodstatnějším je však patrně **Tellharmonium** (také známo pod názvem **Dynamophon**) Dr. Thadeusse Cahilla (1867 – 1934) na obr. 1.1. Jedná se totiž o první nástroj, který využívá principů zvukové syntézy, i když není označován jako syntezátor. Vychází z principu součtové syntézy dle tzv. Fourierovského principu v reálném čase, tedy vytváří složitější tvarové průběhy signály skládáním harmonických složek. Nástroj patentovaný roku 1896 se dočkal své realizace r. 1900 a veřejného uvedení r. 1906. Ve své podstatě se jedná o obří několika set-tunový elektrický generátor, který pomocí součtu mnoha generovaných harmonických signálů skládá výsledný zvukový signál na principu aditivní (součtové) syntézy. Byl vybaven dvěma klaviaturami, rejstříkovými sklopkami a ke své obsluze vyžadoval přítomnost jednoho až dvou klávesových hráčů. Byla vyvinuta telefonní síť „Tellharmony“, která umožňovala obyvatelům New Yorku naslouchat hudbě, hrané živě na Tellharmonium. Těžkopádnost a obří nároky na chod celého zařízení znamenaly brzký zánik tohoto monumentálního nástroje. Jeho princip však využil později Laurence Hammond ve svých elektrofonických varhanách.



Obr. 1.1 Tellharmonium neboli Dynamophon Thadeusse Cahilla – lit. [20]

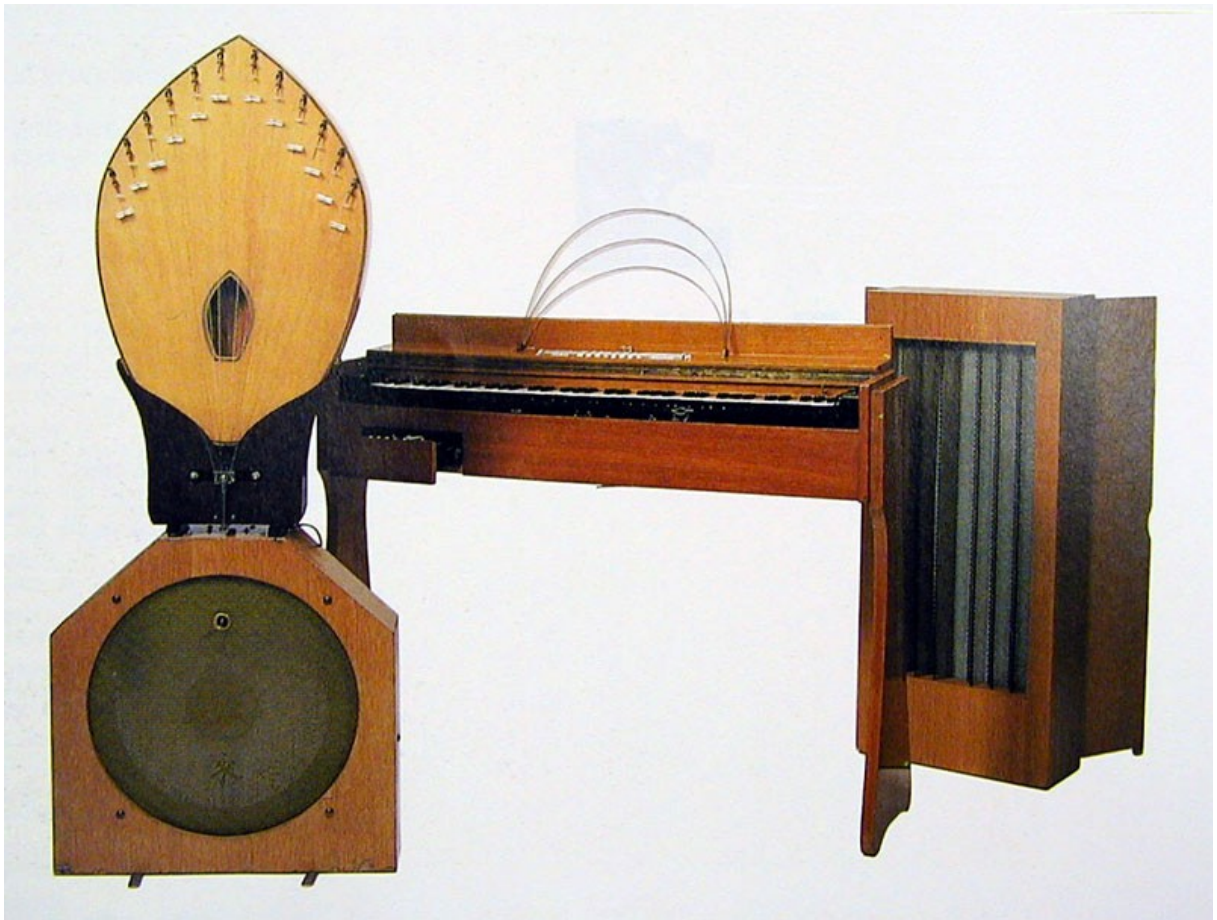
Skutečný nástup elektroniky v hudbě je datován ke dni objevu elektroniky ve funkci diody (Ambrose Fleming, 1904) a zesilovací triody (Lee de Forest, 1906). Obvody využívající elektroniky mohly zesílit zvuk již existujících nástrojů (např. kytary nebo klavíru). Nově vznikající nástroje s využitím elektronických obvodů pro samotný proces generování zvuku často využívaly tradiční rozhraní pro jejich ovládání (struník, klaviatura atd.). Jedním z nástrojů, který se tomuto principu vymykal a přišel se zcela do té doby neznámým způsobem ovládání, byl **Aetherophon** neboli **Theremin** z roku 1919. Jeho tvůrcem byl Leon Sergejevič Těremen. Theremin (obr. 1.2) pracoval na principu záznějů dvou elektronických generátorů ultrazvukových kmitočtů a ovládal se bezkontaktně pomocí dvou rukou hráče. Vzniklý zázněj, tedy jeden z rozdílových tónů generátorů pevného a proměnného kmitočtu, ležel již ve slyšitelné oblasti a byl výstupním signálem nástroje. Byl vybaven dvěma anténami, z nichž jedna ovládala výšku tónu, druhá pak jeho hlasitost. S příchodem Thereminu je také spjat nástup umělců-virtuózů, kteří ovládli nově vznikající nástroje a s velkým úspěchem na ně koncertovali po celém světě. V případě Thereminu jmenujme osobnost houslistky Clary Rockmore.



Obr. 1.2 Aetherophon neboli Theremin se svým vynálezcem – lit. [22]

Dalším významným nástrojem nového druhu byly **Martenotovy vlny** z r. 1928, které vynalezl Maurice Martenot. Zvukové schopnosti Martenotových vln (obr. 1.3) nebyly nikterak převratné, nicméně monofonní nástroj s klaviaturou s prioritou nejnižšího tónu a speciálním ovladačem v podobě kroužku na prst, jezdícího pod klaviaturou, přišel také s novými výrazovými možnostmi, podobně jako Theremin. Martenotových vln si také povšimli mnozí skladatelé (např. Paul Hindemith, Olivier Messiaen, Arthur Honegger, Edgard Varése a další), kteří pro tento nástroj psali své skladby.

Z téhož roku (1928) pochází také **Trautonium**, zkonstruované Friedrichem Trautweinem. Byl to nástroj s rozdílovou syntézou s využitím formantových filtrů. Hrál se na něj pomocí páskového ovladače a nožních pedálů. Na úspěchy Trautonia, které využíval ve svých skladbách i živých vystoupeních mj. Paul Hindemith, navazuje **Mixturové Trautonium** Oscara Saly z let 1949 až 1952.



Obr. 1.3 Martenotovy vlny – lit. [23]

Z dílen vynálezců Edouarda Couplexe a Josepha Giveleta pochází nástroj s prostým označením **Couplex-Givelet**. Jeho premiéra se odehrála roku 1929 na pařížské výstavě. Je to první nástroj označovaný jako syntezátor. Bylo možno vytvářet širokou škálu nových zvukových barev, ale nástroj sám nebyl určen pro živou hru. Byl to automat, který pouze přehrával naprogramovanou hudbu. Vlastního komerčního uplatnění se však nedočkal, stejně jako ostatní zástupci nově vznikajících principů umělého generování zvuku té doby.

To se podařilo až Laurenci Hammondovi v roce 1935. Ten přišel s nástrojem, který vycházel z principu Tellharmonia, ovšem v několikanásobně zmenšené podobě. Znamé varhany **Hammond B-3** (obr. 1.4) a jejich další nástupci předznamenaly budoucí směr vývoje elektronických a elektrofonických nástrojů. Kromě elektrické kytary a baskytary byly „hammondky“ na dlouhou dobu kralujícím klávesovým nástrojem v populární hudbě, jazzu, rocku, ačkoli byly původně konstruovány jako náhražka klasických píšťalových varhan. Jejich uplatnění je přesto velmi široké a bez nadsázky lze říci, že v oblasti rockové hudby představovaly první klávesový nástroj, který mohl konkurovat výrazovými

možnostmi i hlasitostí reprodukce (díky přebuzenému elektronkovému zesilovači) dlouho vládnoucí elektrické kytáře.



Obr. 1.4 Varhany Hammond B-3 – lit. [21]

1.2 Magnetický záznam zvuku jako nový tvůrčí prvek EAH

Zhruba od čtyřicátých let se všechny nástroje s různými principy syntézy zabydlely spíše ve studiích a většího rozmachu se nedočkaly. Bylo to mj. díky obrovským nárokům na prostor, protože nástroje té doby byly značně objemné a širšímu poli zájemců nedostupné. Navíc byly tyto víceméně laboratorní nástroje díky nedokonalé možnosti ovládní v reálném čase nepoužitelné na živém koncertě. Vzniká fenomén konkrétní a elektronické hudby, která je tvořena pomocí přirozených nebo umělých signálů, vícestopých magnetofonů, stříhu a efektovéch úprav. Namísto složitých syntetizérů se často používaly samostatné

generátory jednoduchých kmitů nebo šumu, dále filtry, modulátory atd. Jednotlivé fáze zpracování zvuku byly roztrženy mezi jednotlivé funkční bloky složitěho řetězce elektronických obvodů. Takové vybavení si mohla dovolit jen specializovaná studia. Za všechny jmenujme např. Paříž, New York, Kolín nad Rýnem. Všechna tato studia přišla se zcela novým principem komponování hudby a její interpretaci mimo reálný čas, bez přítomnosti hráče na pódiu ve smyslu klasického koncertního pojetí. Nástrojem je celé studio a jeho výbava, autor má poměrně jasnou představu o svém uměleckém záměru (také na základě vlastních zkušeností) a jeho partner - tzv. realizátor, se snaží tyto představy naplnit pomocí technologických postupů, které ovládá. V tomto historickém pojetí se jedná o klasický přístup k EA hudbě. Dnes se zdá být již překonán, neboť autoři jsou nejčastěji také realizátory a veškeré technologické pomůcky pro úspěšnou tvorbu jsou dostupné prakticky každému. Podívejme se však, jaké nové možnosti přinesl magnetofon do procesu kompozice a realizace tzv. elektroakustické hudby.

Magnetofon byl vyvinut jako zařízení, které kromě primárního účelu zaznamenat a opět přehrát uloženou zvukovou informaci umožnilo také provádět do té doby nezvyklé a technologicky nerealizovatelné manipulace s obecným zvukovým materiálem. Jedná se o německý vynález z doby před 2. světovou válkou, který využíval k záznamu zvuku řízenou magnetizaci odvíjejícího se ocelového drátu. Ten byl později nahrazen páskem a po skončení války se začal rychle rozšiřovat nejen do studií, ale i do běžných domácností. Vynález magnetofonu jakožto přemazatelného typu záznamu přinesl nové možnosti a dva zásadní přínosy do světa, ve kterém se doposud zvukový záznam zaznamenával pouze mechanickou cestou, bez možnosti obnovení média (přemazání).

1. Magnetický záznam umožnil poměrně snadno (ve srovnání s mechanickým záznamem na voskový váleček nebo gramofonovou desku) pořizovat záznam živé hudební produkce nebo jakékoli jiné zvukové informace i v amatérských podmínkách. Navíc je možno magnetický záznam snadno přemazat a provoz takového systému je méně finančně náročný.

2. Možnosti magnetického záznamu se neomezují jen na pouhý záznam, ale magnetofon se může stát kompoziční pomůckou pro tvorbu jinak nedosažitelných zvukových kresek. Jmenujme alespoň ty nejzákladnější:

a) Změna výšky tónu / rychlosti přehrávání

Tento jednoduchý efekt využívá změn výšky tónu se změnou rychlosti posuvu pásku magnetofonu. Např. zdvojnásobení rychlosti posuvu znamená transpozici všech kmitočtových složek zaznamenaného signálu o oktávu výše a změnu tempa rytmické struktury do polovičních hodnot. Rychlost posuvu pásku lze měnit buď skokově nebo plynule (varispeed). Nechtěná změna rychlosti nedokonalých magnetofonů na počátku vývoje se projevovala ve zvuku buď pomalými změnami intonace (wow) nebo rychlými, v podobě kmitočtového vibrata (flutter)

b) Střih pásku

Tématu střihu pásku a jeho užití by bylo možno věnovat celou samostatnou kapitolu. My se zde zmíníme alespoň o tom způsobu, který se v historii EA hudby využíval jako nový prvek při její realizaci. Kromě tradičního pojetí střihu hudby či mluveného slova jakožto prostředku pro formální výstavbu konečného zvukového snímku (vynecháním nepovedených částí záznamu a navázáním těch zdařilých) a jeho čištění (vystřihnutím nechtěných ruchů v pauzách záznamu) je možno dělit složitější zvukové objekty a signály na drobnější úseky, měnit pořadí a smysl jejich přehrávání (reverse) atd. Limitujícím faktorem nejmenšího dělení je taková délka pásku, se kterou lze uvedené manipulace ještě provádět, aby byl magnetický pásek po slepení mechanicky stabilní.

c) Změna směru posuvu pásku

Bylo možno obrátit směr posuvu pásku (obrácením cívek pásku monofonního celostopého nebo stereofonního půlstopého záznamu) pro získání do té doby nerealizovatelných efektů. Tento efekt popírá princip kauzality času, přesněji řečeno obrací orientaci časové osy. Např. dozvuková část signálu předchází signálu samotnému, transienty na počátcích perkusních signálů se přesouvají na jejich konec atd.

d) Uzavřená smyčka

Slepením dvou konců kratšího úseku pásku a jeho přehráváním vzniká smyčka. V závislosti na zvukovém materiálu, který je na pásku zaznamenan, může vzniknout např. jev nekonečného tónu, opakující se metroritmický model (pattern). Toto přísné a identické opakování nebylo

možno dosáhnout žádným jiným způsobem. Metoda repetitivního přístupu je aplikována do oblasti kompozice EA hudby často jako formotvorný prvek a je jednou ze základních odlišností od živé hry minimalistických figur-opakování předepsaného vzorce či motivu je při živé interpretaci nedokonalé. Stroj je naopak schopen přehrát zaznamenaný signál opakovaně bez znatelných odchylek.

e) Vrstvení zvukové informace

Magnetofon při přemazávání již nahraného materiálu nejprve maže původní signál mazací hlavou. Jestliže vyřadíme mazací hlavu z činnosti, je možno zvukovou informaci vrstvit na předchozí záznam. Proces směšování je nedokonalý, neboť dochází ke značnému poklesu kvality zaznamenaného signálu, zejména v souvislosti s nasycením magnetické vrstvy pásku a rostoucím šumem. Nicméně i tento primitivní způsob znamenal v historii EA hudby důležitý moment realizace.

f) Umělá ozvěna

Známy efekt slábnoucího se opakování signálu (echo) je možno realizovat jednou záznamovou a větším počtem reprodukčních hlav. Rychlostí posuvu, případně vzdáleností hlav od sebe, lze měnit délku jednotlivých zpoždění. Přimícháním zpožděného signálu ke vstupnímu lze získat jev nekonečného opakování. Často se pro tento efekt využívala uzavřená smyčka.

g) Vícestopé magnetofonové techniky

Jedním z nejvýznamějších objevů v oblasti záznamu zvukové informace jsou techniky vícekanálové (vícestopé) zvukové informace. Samotný princip rozdělení magnetického pásu na separátní stopy ještě neznamena žádný převratný vynález. Důležitým počinem bylo ovšem umožnění přehrávat a zaznamenávat zvukové signály nezávisle na sobě. Klíčovým pojmem, který s objevem vícestopých technik souvisí a pronikl postupně do praxe nahrávání především populární hudby je metoda tzv. **playbacku**. Díky této metodě je možno vytvořit jediným hudebníkem iluzi mnohačleného orchestru. Nástroje se do jednotlivých stop natáčejí postupně, s využitím přehrávání předchozích vrstev pro zachování jednotného tempa a rytmu. Jednotlivé stopy lze mazat po úsecích a nezávisle na sobě (tzv. elektronický střih). Playback přináší do tvorby hudební nahrávky nový fenomén. Spoluhráči se ve studiu často nemusí ani

potkat, jsou postupně přizváni na zaznamenání „svých“ stop a celé dílo vzniká vlastně virtuálně, mimo reálný čas. V osmdesátých letech 20. století dosáhl klasický vícestopý záznam na široký magnetický pás (ve studiových podmínkách např. se šířkou 2 palce pro 24 nezávislých stop) svého vrcholu a byl postupně nahrazen vícestopým záznamem na pevný disk (**Hard-Disc recording**). Všechny dříve ověřené principy playbackového nahrávání zůstaly zachovány, navíc se ovšem s prudkým rozvojem výpočetní techniky objevilo nepřehledné množství dalších možností jak v oblasti manipulace se zvukovými záběry na jednotlivých stopách, tak s možnostmi zpracování signálu pomocí efektů přímo v počítači.

Ať už klasický jedno- až dvoustopý magnetofon nebo využití vícestopého záznamu, všechny techniky realizace EA hudby byly prakticky odkázány na studiové podmínky. Zdroje signálu, jak už bylo řečeno, pocházely buď z oblasti přirozených zvuků (hudebních či nehudebních) nebo byly generovány čistě elektronickou cestou, případně s využitím elektroakustických nástrojů. Dalo by se říci, že z dnešního pohledu primitivní a těžkopádné elektronické nástroje vystupovaly převážně v roli zdrojů primárních zvukových signálů pro další zpracování metodami magnetického záznamu, střihu a mixu, efektových úprav atd. Naproti tomu se některé nově vyvinuté elektronické nástroje objevovaly také na koncertních pódiiích.

Ruku v ruce s trendem tzv. studiových syntezátorů byl vyvinut např. nástroj, který nebyl určen pro živou hru, ale pro detailní programování ve studiu. Hovoříme o syntetizéru **RCA Mark II**, uvedenému v r. 1959 v Columbia-Princeton Electronic Music Center. Nástroj, jehož hra byla automatizována pomocí děrných pásů, zabíral sice celou místnost, ale předurčil budoucí rozvoj automatizace elektronické hudby. Samotný princip automatizace nebyl ničím objevným a známe jej již z dob daleko před vynálezem elektřiny. Z dílen hodinářů pocházely různé hrací strojky, orchestriony nebo také automatizovaný klavír (Pianola). Nový byl jednak samotný princip tvorby zvuku, ale také fakt, že pokyny pro automatizovanou hru stroje bylo možno stále snadněji obměňovat, do automatizované hry zasahovat a interakcí člověk-stroj alespoň do určité míry zpřístupňovat nedůvěřivému publiku.

Dalším důležitým milníkem ve vývoji elektroniky v hudebním nasazení byl vynález tranzistoru v letech 1947–1948. Kromě jiného znamenal objev polovodičů postupnou miniaturizaci obvodů syntézy a širšímu poli zájemců z řad

hudebníků a experimentátorů se rýsovala reálná šance na budoucí existenci a využití snadno přenosných nástrojů pro živou hru. Díky postupné miniaturizaci technologických prostředků syntézy bylo také možno obměňovat vzájemné propojení samostatných funkčních bloků za předpokladu kompatibility řídicích signálů. Vzniká pojem tzv. modulárního syntezátoru, který přichází také s nezbytným standardem napěťového řízení. Za všechny, kteří se zmíněnou oblastí modulárního principu zabývali, jmenujme osobnost Haralda Bodeho, který se právě o rozvoj napěťového řízení syntezátorů zasloužil.

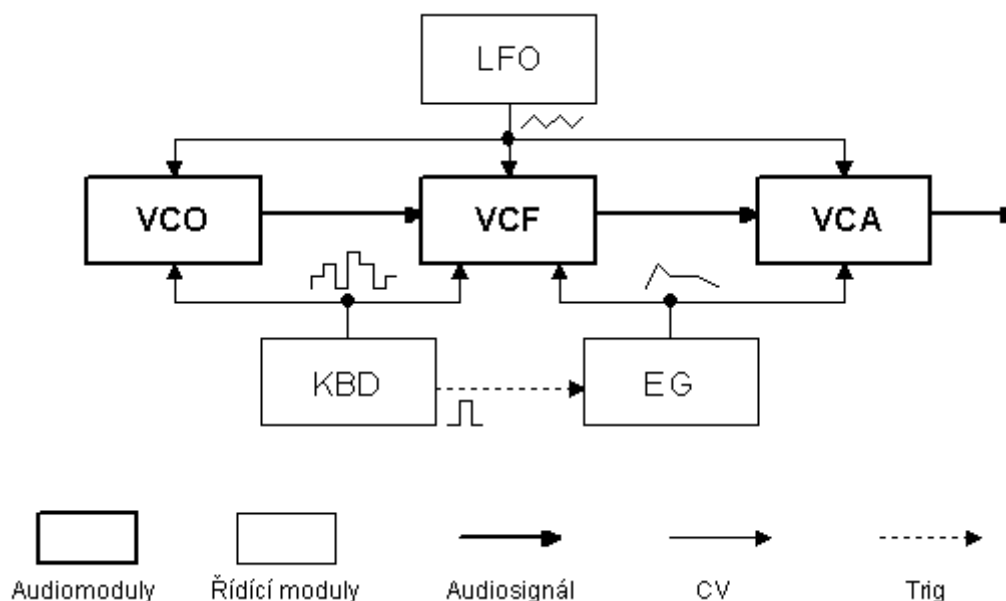
1.3 Nástup napěťového řízení syntezátorů

Princip napěťového řízení syntezátorů je vlastně nejstarším hudebním komunikačním systémem, který byl standardizován. Pokusy s propojováním obvodů elektronických hudebních nástrojů se datují již od poloviny 50. let. Šlo především o simultánní spouštění zvukových signálů z různých nástrojů a tím znásobení zvukových možností. Řešil se také vhodný způsob propojení syntezátorů s počítači pro automatizaci hry a ovládání velkého množství přístrojů. Motivace vzniku MIDI normy jakožto následníka napěťového řízení byly obdobné, přestože její objev umožnil teprve nástup číslicové techniky. Z tohoto hlediska lze dnes princip napěťového řízení syntezátorů zařadit mezi tzv. pre-MIDI systém.



Obr. 1.5 Modulární syntezátor Moog 55 – lit. [26]

Princip napěťového řízení lze ukázat na příkladu nejjednodušší struktury jednohlasého analogového syntezátoru se subtraktivním způsobem syntézy dle obr. 1.6. Syntezátor se skládá z modulů, které jsou buď pevně propojeny, nebo je lze libovolně propojovat mezi sebou. Někdy se vyskytují kombinace obou způsobů. Moduly subtraktivního syntezátoru lze rozdělit na audiomoduly a řídicí moduly. Vzniká tak modulární koncepce syntezátorů a jejím hlavním představitelem byl **Moog System 55**, viz. obr. 1.5.



Obr. 1.6 Základní řetězec analogového syntezátoru s rozdílovou syntézou

Mezi základní audiomoduly patří napěťově řízený oscilátor (*VCO*), napěťově řízený filtr (*VCF*) a napěťově řízený zesilovač (*VCA*). Řídicí moduly můžeme dále rozdělit na generátory a procesory. Mezi generátory řídicích signálů patří „pomaluběžný“ oscilátor (*LFO*), který produkuje modulační signál s frekvencí převážně v subsonické oblasti, dále pak generátor obálky (*EG*). Generátor obálky generuje časově proměnné napětí pro řízení *VCF* a *VCA* a je spouštěn impulzem z klaviatury. Bylo možno nastavovat časové konstanty *EG* - náběh (*attack*), pokles (*decay*) a doznění (*release*), a dále úroveň poklesu (*sustain*). Mezi procesory typu převodník patří zejména klaviatura syntezátoru (*KBD*), která převádí akci hráčovy ruky na sérii diskrétních úrovní řídicího napětí (*CV*). Zároveň spouští generátor obálky pomocí signálu Trig (*trigger*). Generátor obálky a pomaluběžný oscilátor vytvářejí spojitě řídicí napětí.

Poněkud obšírně jsme se zabývali strukturou analogového syntezátoru s napěťovým řízením. Více se rozdílové syntézy ještě dotkneme v kap. 3.2, nicméně na příkladu nejjednodušší realizace řetězce obvodů jsme ukázali

možnosti řízení parametrů syntézy v reálném čase. Z historického kontextu vyplývá, že vzniká fenomén jednotného jazyka komunikace různých nástrojů mezi sebou. Nástroje tak přestávají být uzavřenými systémy, ale stávají se prvky komplexní soustavy různých propojených přístrojů a nástrojů. To představuje velký pokrok z hlediska zjednodušení ovládání a umožnění vzniku automatizované hry. Jediným omezením je však nekompatibilita rozsahu a škálování napěťových úrovní zejména spojitých napětí pro řízení výšky tónu u nástrojů různých firem.

Nejjednodušším příkladem přístroje pro automatizovanou hru by mohl být tzv. sekvencer (dnes spíše označení pro složitý počítačový hudební program). Jedná se o elektronické zařízení (sekvenční elektronický obvod), které v určitých časových okamžicích, daných časovou konstantou (frekvencí) taktovacích hodin přepíná postupně nastavené hodnoty napětí pro řízení např. VCO. Současně je v každém kroku generován signál Gate, který determinuje nástup a ukončení tónu v čase. Kromě hodnoty výstupního napětí jednotlivých kroků je možno měnit délku jednotlivých impulzů posloupnosti. Počet kroků se pohyboval mezi 8 a 32 a jednotlivé kroky byly cyklicky přehrávány v různých smyslech – vpřed, vzad, kombinovaně, náhodně apod.

Kromě složitých a nákladných modulárních koncepcí napěťově řízených syntezátorů se objevily i jednodušší typy s předem danou nebo alespoň částečně proměnnou strukturou propojení jednotlivých funkčních bloků. Typickým a pravděpodobně nejslavnějším zástupcem tohoto typu nástroje s pevnou strukturou propojení, který prolomil do té doby panující bariéru nedostupnosti hudební elektroniky širšímu poli zájemců, je legendární **Minimoog** z roku 1971. Ve skutečnosti to však nebyl první počín tohoto druhu. K širšímu uplatnění dostupných prostředků syntézy s napěťovým řízením v reálném čase přispěli také Donald F. Buchla a Paolo Ketoff.

Donald F. Buchla postavil svůj nástroj v roce 1964 a ten znamenal pro vývoj hudební elektroniky důležitý zlom – elektronické hudební nástroje se z exkluzivního prostředí zvukových laboratoří dostávají mezi „obyčejné smrtelníky“ a ve zjednodušené, ale stále výrazově bohaté podobě nabízejí nové možnosti generování zvuku umělou cestou. Také Paolo Ketoff v témže roce aplikoval princip napěťového řízení parametrů syntézy do syntezátoru nedomulární koncepce s názvem **Synket**.

Opravdovým bestsellerem se však stal skutečně již zmíněný Minimoog v roce 1971 (obr. 1.7). Tento nástroj předurčil také další významné prvky, objevující se na nástrojích vyráběných po celou řadu následujících let. Jsou jimi např. typická kolečka pro řízení hloubky modulace výšky tónu pomocí *LFO* a také tzv. ohýbání výšky tónu (*Pitch Bend*) v reálném čase během hry.



Obr. 1.7 Minimoog – lit. [24]

Jedná se o jednohlasý syntezátor se třemi nezávislými oscilátory a dalšími obvody. Struktura jejich propojení je sice neměnná, ale poskytuje širokou zvukovou variabilitu především díky unikátnímu *VCF* typu *LPF* se strmostí 24 dB/okt. Minimoog byl vyráběn celých 11 let s minimálními obměnami a stal se vzorem mnoha následovníků především z řad konkurence.

Na dlouhou dobu se syntezátory se subtraktivní (rozdílovou) syntézou staly nejprodávanějšími elektronickými hudebními nástroji. Druhá polovina sedmdesátých let 20. století je poznamenána tzv. japonskou invazí. Principy, ověřené převážně americkými výrobci (kromě firmy Moog též např. *SCI* – *Sequential Circuits*), byly brzy zvládnuty a prakticky realizovány v dílnách japonských výrobců hudební elektroniky. Osu produkce japonských ostrovů v tomto průmyslovém odvětví tvoří značky *Korg*, *Yamaha*, *Roland*, později také

Casio a Kawai. Je také nutno podotknout, že nově vznikající nástroje byly ve valné většině určeny pro klávesové hráče, tzn. byly vybaveny tradiční klaviaturou různého tónového rozsahu. Aby se odstranila právě ona determinovanost tónu a jeho zvukových parametrů, byly do nástrojů integrovány různé pomůcky, jako např. zmíněná kolečka či různé jiné ovladače (např. páskové, dechové, nožní apod.).

Počátky digitalizace v hudební elektronice se začaly komerčně uplatňovat na přelomu 70. a 80. let dvacátého století. Pravděpodobně nejdůležitějšími obvody pro nasazení v syntezátorech byla polovodičová paměť a A/D i D/A převodníky. Tyto obvody umožňují do té doby nerealizovatelné uložení nastavení zvukových parametrů do paměti a jejich pozdější vyvolání. Nástroje, které využívají z hlediska zvukové syntézy klasický, tedy subtraktivní princip, se stávají nástroji hybridními. Mají analogovou tvorbu tónu mocí generátorů tvarových kmitů, filtrů a zesilovačů, pro řízení parametrů však používají analogové ovladače s možností uložení parametrů (**Memorymoog**, **Korg Polysix**) nebo plně číslicové ovládání pomocí numerické klávesnice a displeje LED (**Roland Jupiter-6** nebo **Juno-60**). Princip napěťového řízení se však stále více stával záležitostí vnitřního a neměnného propojení syntezátorů a neumožňoval vzájemnou komunikaci různých typů nástrojů. Nástup číslicové techniky na úrovni řízení předznamenal vznik nového standardu, který velkou měrou zasáhl do historie hudební elektroniky i studiové techniky.

1.4 MIDI standard jako prostředek komunikace v hudební elektronice

MIDI (Musical Instruments Digital Interface - číslicové rozhraní hudebních nástrojů) vzniklo z potřeby vytvořit univerzální komunikační protokol, který by umožňoval spolupráci nástrojů a přístrojů hudební elektroniky na vyšší úrovni, než je propojování funkčních bloků kaskády audioobvodů v algoritmu syntézy. Základní motivací vzniku takového sjednocujícího systému byla snaha znásobit množství zvukových barev paralelním propojením nástrojů (nejčastěji klávesových syntezátorů), přičemž by nástroje sdílely stejné řídicí informace odvozené z pohybu hráčovy ruky na klaviatuře. Po připojení na počítač by byla umožněna i automatizace hry, tedy dálkové řízení nástrojů.

Rozvoj číslicové techniky přispěl k rozšíření možností, jak vzájemnou komunikaci mezi nástroji uskutečnit. Vznikaly různé paralelní systémy, které se

ovšem pro svoji složitost nestaly standardem. Většího úspěchu dosáhly sériové datové přenosy, které pomohly definovat *MIDI* jako nový, mezinárodně uznávaný standard. Přímým předchůdcem *MIDI* byl systém *DCB* firmy Roland. První náměty ke vzniku *MIDI* normy byly prezentovány v roce 1981 na výstavě *NAMM* v USA zástupci firem Sequential Circuits Inc., Oberheim a Roland. Později se připojily také firmy Yamaha a Kawai. Konečná verze *MIDI* byla uvedena 5.8.1983 v podobě *MIDI* normy 1.0. V roce 1985 vyšla podrobná *MIDI* norma, která protokol upřesňuje a řeší tak některé počáteční problémy s nekompatibilitou mezi výrobky různých firem.

MIDI norma se velmi rychle rozšířila a dodnes je tímto rozhraním stále vybavena prakticky většina profesionálních elektronických hudebních nástrojů. Za dodržování *MIDI* normy a za její další vývoj jsou zodpovědné normativní orgány *MMA* (*MIDI* Manufacturers Committee Association) a *JMSC* (Japan *MIDI* Standards Committee).

Samotný protokol *MIDI* však přenáší pouze řídicí signály pro spouštění tónů, řízení parametrů syntézy atd. na principu sériového asynchronního přenosu v proudové smyčce. Zvuková informace se v reálném čase nepřenáší. Přenos zvukových signálů byl umožněn pouze mimo reálný čas a to díky jednomu z mnoha dodatků normy s názvem *SDS* pro přenos zvukových vzorků mezi samplery.

Omezením *MIDI* je především jeho nízká přenosová rychlost. Jelikož na jednom fyzickém okruhu (portu) *MIDI* propojení lze přenášet informace na šestnácti různých kanálech, musí docházet nutně ke zpoždění vlivem rozkladu přenášených dat. Je nutné si uvědomit, že iluze současného nástupu tónů, spouštěných pomocí *MIDI* povelů, je dána omezenou rozlišovací schopností lidského sluchu z hlediska časových prahů. Při využití *MIDI* pro přenos velkého množství dat např. při změnách hodnoty nějakého kontinuálního kontroléru se může sběrnice snadno zahltit a základní hudební informace o spouštění tónu tak zpožďovat. Problémy pramenící z nedostatečné přenosové kapacity *MIDI* rozhraní lze v zásadě řešit dvěma způsoby: efektivní filtrací přenášených dat, tj. zamezením přenosu informací, které se v dané chvíli nepodílejí na řízení parametrů např. připojeného syntezátoru, nebo využitím modernějšího a tudíž rychlejšího způsobu přenosu.

Ani v současné době se však nedá říci, že by *MIDI* protokol byl překonaný. I nově vznikající standardy komunikace a přenosových protokolů mezi nástroji a

přístroji EAH zahrnují principy *MIDI* normy, byť na jiné kvantitavní i kvalitativní úrovni. Původní limitace *MIDI* rozhraní při přenosu velkého množství hudební informace (zpoždování, vypadávání hlasů atd.) jsou již úspěšně odstraněny přenesením obdobného protokolu vzájemné komunikace elektronických hudebních nástrojů na rychlejší rozhraní, jako je např. *IEEE 1394* (M-Lan, FireWire), *USB*, *VST Link*, Ethernet apod. Z hlediska kompatibility lze propojovat i starší nástroje s novějšími, přesto *MIDI* norma jako taková již pravděpodobně dosáhla svého vrcholu. Samotné povely *MIDI* byly zachovány, ale jsou nejčastěji sdíleny jako část přenášených dat spolu s digitálním přenosem zvuku v reálném čase pomocí výše zmíněných fyzických rozhraní.

1.5 Digitalizace elektronických hudebních nástrojů na úrovni generování signálu

Doposud jsme si všímali klasického, tedy analogového způsobu generování signálu s využitím digitální techniky pro usnadnění propojování, ovládání a uchování jejich nastavení. Prakticky paralelně s rozvojem komerčně dostupných nástrojů se zhruba od konce šedesátých let 20. století konaly první pokusy s čistě digitálním způsobem syntézy, prozatím na úrovni výzkumných objevů. Jednalo se o různé principy syntézy, počínaje Fourierovskou harmonickou syntézou na základě analýzy přirozených zvuků hudebních nástrojů a konče metodami založenými na modelování akustických jevů v hudebních nástrojích. Problémem však zůstávala velká výpočetní náročnost a tudíž byly zkoumané metody těžko nasaditelné pro hru v reálném čase. Mezi přední ústavy, zabývající se výzkumem počítačového generování zvuku, patřil a dodnes patří např. pařížský IRCAM nebo univerzita ve Stanfordu. Právě odtud pochází mj. princip generování signálu pomocí frekvenční modulace (*FM*), vyvinuté Johnem Chowningem na počátku sedmdesátých let 20. století a později úspěšně nasazený v syntezátorech řady DX firmy Yamaha.

Osmdesátá léta s sebou tedy přináší jednak nasazení nových principů syntézy, již zmíněného nového protokolu komunikace (*MIDI*), ale také počátek uniformity zvuku elektronických hudebních nástrojů. Zdá se, že s ubýváním počtu ovládacích prvků syntezátorů ubývají také zvukové a výrazové možnosti, byť stav technologie pokročil opět podstatně vpřed. Určitou zásluhu na tom mají také samotní uživatelé, kteří nechtějí složitě programovat, ale především hrát. Fenomémem zvuku konce 80. a prakticky celých 90. let je také nový přístup k

principu generování zvuku elektronickou cestou – sampling. Vznikají buď otevřené systémy, do kterých lze uživatelem nahrát jakýkoli zvuk a ten následně spouštět pomocí klaviatury či jiného hudebně-technologického rozhraní, nebo systémy zcela uzavřené, omezené na využití továrních sad zvukových barev bez možnosti detailního programování. Bohužel tento fakt poznamenal vývoj hudebního cítění zejména v oblasti populární hudby a odsunul většinu kreativně smýšlejících uživatelů do ústraní, mimo hlavní proud průmyslu s hudební elektronikou.

1.6 Nástup počítačů a specializovaných programů

Nasazení výpočetní techniky v procesu generování zvukového signálu v reálném čase bylo zprvu nerealizovatelné. Počítače tedy dlouhou dobu vystupovaly pouze v roli řídicího centra, který umožňoval dálkově spouštět zvuky na připojených nástrojích, např. s využitím *MIDI*. Také jednoúčelové přístroje využívaly mikroprocesory. Vznikají přístroje typu automatický bubeník (Rhythm Computer) nebo sekvencí (již ne pouze krokový, jako u analogových syntezátorů, ale s možností tzv. lineárního záznamu, tj. bez nutnosti složitého programování zvukových událostí v přesně vymezeném časovém rastru). Mikroprocesory se také začínají postupně prosazovat nejprve v pomocných obvodech generátorů tvarových kmitů u syntezátorů s rozdílovou syntézou, v obvodech správy paměti rejstříků a uživatelského rozhraní, ale také přímo v procesu syntézy (např. v *FM*).

Počítačové stanice jakožto centra hudebních studií pro tvorbu EAH se podle svého určení a použitého programového vybavení v průběhu vývoje formovala takto:

1. **Sekvencery** – jejich úkolem je záznam řídicích informací o nástupu tónů, parametrů zvukové syntézy, nastavování a kontinuální změny úrovně hlasitosti pro automatizaci mixu pomocí jednotného komunikačního rozhraní, např. *MIDI*. Sekvencery se vyskytují buď v podobě lineární, tzn. podobné principu záznamu do vícestopého magnetofonu s libovolným umístěním časových událostí, nebo v podobě nelineární, tzv. patternově orientované. Pattern představuje určitý rytmický, melodický nebo harmonický model, který lze kdykoli zopakovat v různých modifikacích výšky tónu (transpozice), časového trvání, obměny vnitřního časového

dělení (rytmu) apod. Skládáním jednotlivých patternů v horizontálním i vertikálním směru vzniká jakási mozaika výsledné kompozice.

2. **Kompoziční programy** – na základě naprogramovaných nebo zcela náhodných výpočetních algoritmů vzniká výsledná kompozice pod dohledem realizátora. Často se vyskytují programy, které jsou schopné formovat podobu časového vývoje struktury kompozice v reálném čase a to na základě vstupních signálů – zvukových, *MIDI* a jiných řídicích povelů. Takováto umělá inteligence vystupuje jako spoluhráč např. při živé (live) produkci.

3. **Notační programy** – jedná se o specializované programy pro tvorbu grafického zápisu hudby. Zadávání hudebních informací do partitury probíhá buď mimo reálný čas, např. pomocí klávesových zkratk, nebo na základě analýzy vstupního audio nebo *MIDI* signálu.

4. **Editační a databázové programy** – tato skupina počítačových aplikací vystupuje v pomocné úloze pro usnadnění tvorby EAH. Pomocí počítače lze dálkově upravovat (editovat) např. parametry zvukových rejstříků připojených syntezátorů, spravovat banky programů, ukládat je a zpětně vyvolávat

5. **Programy pro zvukovou syntézu a analýzu** – jedná se o specializované programy pro umělé generování zvuku v reálném čase i mimo něj v různých principech syntézy. K dispozici jsou také programy pro analýzu a měření vlastností zvukového signálu.

6. **Programy pro zpracování *MIDI* signálů** – tato oblast využití počítačů souvisí se zpracováním a transformací toku *MIDI* dat v reálném čase. Může se jednat např. o filtraci *MIDI* dat, analýzu přenášených informací, generování *MIDI* povelů na základě libovolné vstupní informace (např. pohyb tanečníka v prostoru, různé podoby rozhraní pro neklávesové ovládání syntezátorů, převod zvukových signálů na *MIDI* apod.)

7. **Programy pro zpracování a záznam audio signálů** – tato oblast nasazení počítačů v hudební elektronice představuje přímou náhradu překonaného vícestopého záznamu na magnetofonový pás pracovní stanicí pro Hard Disc recording. Zvukové signály jsou digitalizovány a poté uloženy na pevný disk nebo jiné médium uvnitř počítače. Zaznamenané zvukové informace lze přehrávat, navzájem směšovat, zpracovávat pomocí

algoritmů zvukových efektů, ale také analyzovat a převádět mezi různými zvukovými formáty atd. Programy pro Hard Disc recording se podobají sekvencerům s lineárním způsobem zápisu dat a zásadní posun oproti klasickému analogovému záznamu je možnost manipulace s umístěním zvukových záběrů na časové ose a také absence poklesu zvukové kvality zaznamenaného signálu stárnutím média.

Uvedené dělení vychází z nejpoužívanějších aplikací výpočetní techniky v oblasti hudební elektroniky. Existovaly však i programy, které kombinují více funkcí a oblastí do jedné. Od 80. let dvacátého století dochází k postupnému spřístupňování zejména softwarových metod syntézy širšímu poli zájemců, které byly nejprve čistě výzkumnou záležitostí. Mezi takové metody patří zejména matematické modelování fyzikálních dějů přirozených i elektronických nástrojů, realizované buď s pomocí specializovaného hardware (fyzických nástrojů) nebo počítačových programů.

1.7 Matematické modelování

Metoda matematického modelování zvuku se dočkala své praktické, komerčně dostupné podoby v listopadu 1993 při svém uvedení na hudebním veletrhu v Tokiu. Nástroje pocházejí z produkce firmy **Yamaha** a mají označení **VL-1** a **VP-1**. V průběhu dalších let byla vyvinuta další řada nástrojů, nabízející princip VA syntézy širšímu okruhu zájemců. Co však předcházelo praktické realizaci výsledků dlouhého vědeckého výzkumu a vývoje, se nyní pokusme stručně shrnout. Z hlediska historického členění není matematické modelování samostatnou kapitolou. Pokusy s modelováním akustických soustav probíhaly na různých úrovních prakticky paralelně s hlavním proudem výroby komerčních syntezátorů.

Samotný princip matematického modelování (dále jen *MM*) nelze chápat jako uzavřenou metodu. Je to celý soubor metod, vyvinutý vědeckými týmy během několika desetiletí. Díky jejich matematické povaze a obtížnosti byly tyto metody dlouhý čas odkázány pouze na výzkumné laboratoře. Teprve v polovině osmdesátých let se díky stavu vývoje výpočetní techniky podařilo realizovat praktické výsledky. Je však nutno zmínit, že algoritmy *MM*, se kterými pracují např. VA syntetizéry firmy Yamaha, jsou značně zjednodušeny vůči jejich laboratorním předchůdcům.

Jednotlivé koncepty před *MM* můžeme vysledovat už v pojednáních o povaze zvuku v devatenáctém století. "Teorie zvuku" Lorda Rayleigha z roku 1890 je velmi pozoruhodnou publikací, která detailně popisuje principy chvění předmětů a popisuje matematické vztahy fyziky vibrací v otevřeném prostoru, tubusech a krabicích. Na základě těchto a dalších poznatků byly ve třicátých letech 20. století vytvořeny analogové elektronické modely mechanismů lidského hlasového ústrojí. Větší zlom od tohoto objevu nastal až na počátku počítačové éry.

John Kelly a Carol Lochbaum z laboratoří Bell Telephone byli první, kteří adaptovali fyzikální model lidského hlasového ústrojí do digitální zvukové syntézy. Max V. Mathews pořídil v r. 1960 unikátní záznam písničky „Bicycle Built for Two“, kterou "zazpíval" tento nový digitální hlasový syntetizér.

V roce 1967 vytvořili Lejaren Hiller, James Beauchamp a Pierre Ruiz na počítači Illiac na univerzitě v Illinoa první modely experimentálních hudebních nástrojů. Současně vytvořil svůj vlastní model též profesor Ercolino Ferretti, který pracoval na Harvardské univerzitě a MIT. Povzbuzen předběžnými výsledky, založil v r. 1967 Massachusettskou společnost Ferretti-Lay a to s cílem obchodního využití počítačové hudby. Hlavním investorem projektu byl jistý Michael Lay, výrobce kukuřičných lupínků. Technické potíže, se kterými se tito průkopníci setkali - málo akustických dat, pomalé počítače, primitivní programovací možnosti - způsobily rozpad společnosti a celkový neúspěch v roce 1970.

O deset let později, kdy se technické podmínky výzkumu přeci jen zlepšily, pokračovali v prosazování metod *MM* vědci Annie Luciani a Claude Cadoz ze skupiny ACROE v Grenoblu, bez ohledu na jejich obrovskou výpočetní náročnost. Nebyl to však jejich jediný příspěvek. Fyzikálně-matematický model, který uvažovali, se měl chovat jako nástroj, na který se dá hrát a to včetně negativních vlastností. Například vysoké tóny vyžadují větší fyzické úsilí, než tóny nízké. Menší mechanický "cit" při ovládání běžných elektronických nástrojů měl být odstraněn pomocí složitého rozhraní člověk/stroj v podobě klaviatury s digitálně řízenými servomotory (kladoucími hráči při hře odpor) a joysticky.

Dalším důležitým mezníkem ve vývoji *MM* byl objev Karplus-Strong (*KS*) algoritmu hraných strun, pocházející ze Stanfordského střediska pro počítačový výzkum v hudbě a akustice (*CCRMA*). Poznáním, že *KS* algoritmus je formou vlnodového filtru (viz. dále), začlenil Julius Smith a jeho kolegové z *CCRMA*

tento algoritmus do rámce všeobecnější teorie a rozšířil jej o modely bicích, dechových a smyčcových nástrojů. Julius Smith realizoval syntézu založenou na *MM* na pracovištích tehdy začínající společnosti NeXT Computer, kde částečně pracoval. Ve Smithově odkazu pokračoval také jeho žák Perry Cook.

V roce 1992 zpřístupnila CCRMA programy na matematické modelování na principu vlnovodu široké vrstvě zájemců prostřednictvím sítě Internet. O něco dříve uzavřela společnost Yamaha s organizací CCRMA tajnou dohodu o obchodním využití metody *MM*. Zajímavostí je fakt, že výzkumní pracovníci střediska IRIS v Itálii - zvláště pak Andrea Paladin a Davie Rochesso - realizovali program, rovněž na principu vlnovodu, prostřednictvím firmy Bontempi/Farfisa, a to o celý rok dříve, než firma Yamaha. Podrobněji se podíváme na jednotlivé principy a přístupy matematického modelování v kap. 3.5.

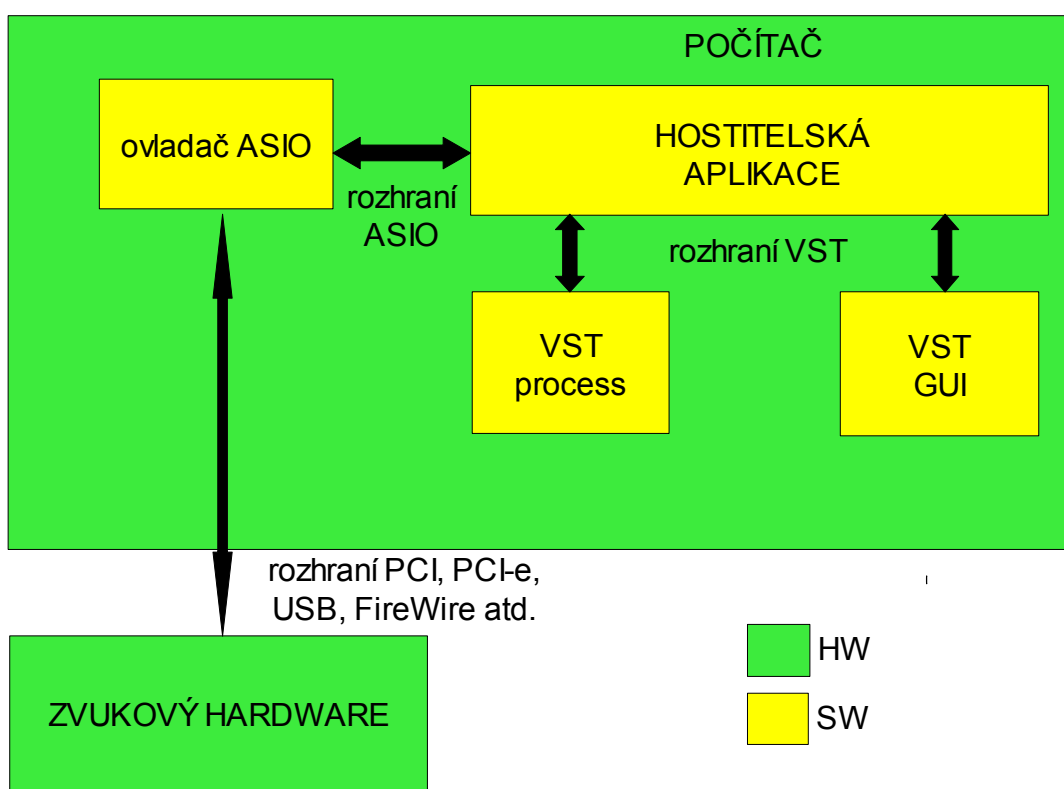
1.8 Integrace technologických prostředků, *DAW*

Prudký rozvoj výpočetní techniky a její stále větší dostupnost nejširšímu poli zájemců začíná nabývat obrovských rozměrů zejména na počátku devadesátých let 20. století. Vzniká fenomén integrovaného hudebního pracoviště (*DAW* – Digital Audio Workstation), nejprve pro profesionální studia, později též díky stále nižší pořizovací ceně nejen programů, ale i nezbytného hardware i pro soukromé osoby z řad tvůrců EAH i jiných hudebních žánrů.

Nelze opomenout také nezbytnou softwarovou podporu z řad vývojářů, které zásobují své zákazníky prakticky jakýmkoli principem umělého generování zvuku a to v různých podobách, včetně nezbytného aparátu pro záznam, střih, mix a efektové úpravy. Jako předchůdce prvních dostupných integrovaných pracovišť pro záznam, zpracování a syntézu zvukového signálu uvedme např. **Synclavier** firmy New England Digital z 80. let dvacátého století.

V kapitole 1.6 jsme uvedli různé oblasti využití počítačové techniky v tvorbě EAH. Současný stav vývoje (a patrně tomu bude i nadále) však uvedené rozdíly v rámci rezortního členění stírá. *DAW* aplikace jsou programy, které v sobě združují všechny známé metody zpracování přirozených i umělých zvuků na úrovni záznamu, střihu, efektových úprav, syntézy, analýzy atd. V souvislosti se zajištěním kompatibility přenášených zvukových i řídicích dat mezi jednotlivými prvky systému *DAW* bylo nutno definovat nové standardy komunikace v digitální hudební elektronice.

Příklad uspořádání *DAW* s využitím těchto standardů ukazuje obr. 1.8. Uvedená rozhraní se vyskytují buď v softwarové nebo hardwarové podobě. Popišme se si nyní jednotlivé součásti celého systému. Základním stavebním kamenem *DAW* je počítač pro univerzální použití, vybavený nezbytným programovým vybavením. Ten je v našem schématu nazván jako hostitelská aplikace, protože poskytuje hostitelské zázemí dalším pomocným programům, které se označují jako tzv. moduly plug-in, neboli zásuvné moduly. Jejich úlohou je rozšířit možnosti hlavního programu např. o nějaký nový způsob syntézy. Při zachování standardu komunikace mezi hlavním programem a modulem plug-in je možno využívat programy od různých výrobců. V našem příkladu je vnitřním softwarovým rozhraním protokol *VST* a to na úrovni vlastního přenosu zvukových a řídicích dat (*VST process*) a na úrovni grafického ovládání (*VST GUI*). Dále je nutno zajistit komunikaci mezi hlavní aplikací a zvukovým hardware (vstupně výstupní převodníky zvukových signálů).



Obr. 1.8 Příklad uspořádání *DAW* s využitím moderních komunikačních rozhraní

Aby bylo možno kombinovat různé hlavní aplikace a různé druhy zvukového hardware od různých výrobců, bylo nutno definovat standard *ASIO*, který zaručuje přenositelnost zvukového hardware mezi počítačovými platformami. O vlastní komunikaci ovladače *ASIO* se zvukovým hardware se

stará fyzické rozhraní (např. vnitřní sběrnice PCI, vnější *USB* nebo *FireWire*). Standardy *VST* a *ASIO* definovala firma Steinberg, ale existují i konkurenční protokoly. Na úrovni propojení plug-in modulů jsou to např. *RTAS*, *AU*, *TDM*.

Výhodou současných protokolů komunikace je kompatibilita zásuvných modulů různých výrobců s používanými hostitelskými aplikacemi. Samotná hlavní aplikace *DAW* obsahuje v podstatě všechny zmíněné typy určené počítačových programů pro tvorbu EAH. Např. firma Steinberg nabízí již mnoho let program **Cubase**, který je nazýván „Integrovaným hudebním produkčním systémem“. Nabízí možnosti sekvencí, Hard-Disc recording, editační nástroje pro zpracování zvukových a *MIDI* dat on-line i off-line, dále virtuální hudební nástroje ve formátu *VSTi*, zvukové procesory *VST*, notační funkce, mixážní pult atd. Všechny funkce jsou uživateli dostupné pohodlně v rámci jediné počítačové stanice, bez nutnosti složitějšího propojování fyzických přístrojů. Jako uživatelské rozhraní se kromě klasického způsobu ovládání monitor–klávesnice–myš (nebo jiné polohovací zařízení) mohou využít např. řídicí klaviatury a různé hudební ovladače. Z *DAW* se tak vlastně stává hudební nástroj s libovolným principem syntézy zvukového signálu, limitované pouze programovým vybavením a výkonností použitého procesoru.

V oblasti zpracování zvukových signálů v reálném čase se v současné době u *DAW* setkáváme se dvěma přístupy:

1. **systemy se zpracováním pomocí CPU** – hostitelská aplikace i zásuvné moduly využívají výpočetní potenciál hlavního procesoru (v případě víceprocesorových systémů několika) pro univerzální použití. Část výkonu procesoru počítačové stanice je tak využito pro výpočty algoritmů syntézy a jiných procesů reálného času. Tato metoda se nazývá **Native Signal Processing**.

2. **systemy se zpracováním pomocí DSP** – hostitelská aplikace komunikuje kromě zvukového hardware také se speciálními procesorovými systémy uvnitř nebo vně počítače s využitím standardních fyzických rozhraní (např. *FireWire*). Procesy výpočtů zpracování zvukových signálů nebo části z nich tak probíhají v procesorech typu *DSP*, které jsou pro daný způsob využití přímo navrženy a není zatěžován *CPU*. Tomuto způsobu zpracování zvuku se říká *DSP-based Processing*. Speciálním využitím *DSP* procesorů je jejich nasazení v hardwarových nástrojích s virtuální syntézou. Samotné nástroje na první pohled vypadají jako běžný

syntezátor s tradičními ovládacími prvky, uvnitř se však skrývá jeden nebo více *DSP* a řídicí *CPU*, namísto specializovaných obvodů zvukové syntézy, což umožňuje pohodlnou a rychlou změnu např. simulované metody syntézy pomocí načtení jiného řídicího programu.

3. hybridní *DSP* a *CPU* systémy – principem je přerozdělování výpočetní kapacity různého počtu *CPU* a *DSP* různým algoritmům zpracování signálu. Příkladem může být současné využívání zásuvných modulů zpracování ve standardech *RTAS* a *TDM* v systému Pro Tools firmy Digidesign. Procesy *TDM* jsou zpracovávány v *DSP*, které jsou osazeny přímo ve zvukovém hardware, zatímco moduly *RTAS* využívají výpočetní kapacitu *CPU* počítače a jsou tudíž např. na typu použitého zvukového hardware nezávislé.

* * *

Současný stav techniky tedy v zásadě nepřináší nové metody syntézy, spíše jsou aplikovány všechny doposud známé metody novým způsobem a to v podobě virtuální, tedy bez využívání klasických elektronických obvodů. Je mnoho hudebníků, kteří kvůli obavám z možné nestability počítačových systémů odmítají jejich používání např. v oblasti live produkce a spoléhají se na tradiční hardwarové prostředky hudební elektroniky. V oblasti studiové praxe je však *DAW* klíčovým a často jediným prvkem všech operací, spojených s tvorbou hudební *EA* kompozic. Přesto i dnes naleznou klasické elektronické nástroje s různými metodami zvukové syntézy své uplatnění a hned tak z instrumentáře elektronické hudby nevymizí, často mj. z úcty k tradici, k jejich objevitelům anebo třeba jedinečným způsobům jejich ovládní na straně jedné a celkového zvukového projevu na straně druhé.

2. TEORIE ZVUKOVÉ SYNTÉZY

2.1 Pojem zvukové syntézy

Pojem „syntéza“ je dle slovníku cizích slov vykládán takto: první výklad ji definuje jako „shrnutí, sjednocení v celek“ (opak analýzy, která představuje rozbor), ve druhém významu znamená „chemické slučování, tj. reakce nebo technologický pochod, při kterém z látek jednodušších vzniká sloučenina nebo složité chemické látky (syntetické)“. Pokusme se nyní využít uvedenou definici s ohledem na syntézu zvuku.

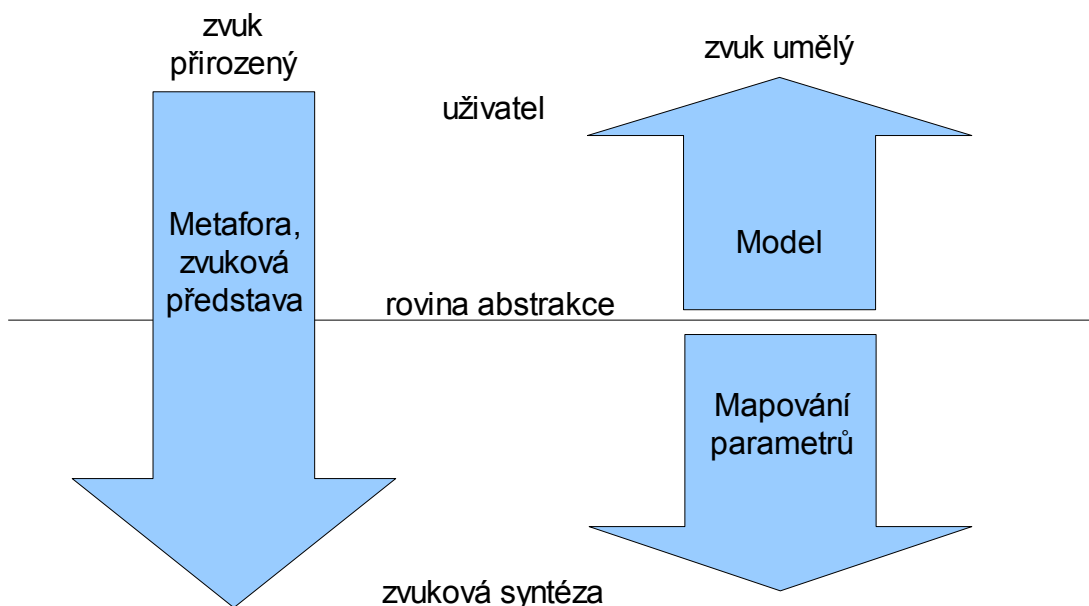
Je zřejmé, že z obou uvedených výkladů lze vycházet. Začněme tím druhým: **syntezátor** (syntetizér, syntetizátor, syntezer a jiné podoby názvu přístroje, který provádí zvukovou syntézu) je ve své podstatě zařízení, které z jednodušších zvukových signálů a pomocí dílčích operací vytváří signály složitější, komplexní. Tento princip ctí součtová syntéza. Uvedený první výklad pojmu lze aplikovat s tím, že zvukový syntezátor shrnuje základní parametry vyladěného tónu (výška, síla, barva) do výsledného řetězce tzv. audioobvodů, jejichž společné působení v pevném nebo variabilním propojení vytváří uměle (elektronickou cestou) výsledný zvukový signál. Tato definice je zase nejbližší struktuře analogového syntezátoru s rozdílovou syntézou, která vychází z fyzikálního modelu obecného akustického nástroje, viz. 3.5.2.

Poněkud obecnější definice praví, že zvuková syntéza je libovolný proces (mechanický, elektronický), který vede k vytvoření předvídatelného nebo nepředvídatelného zvukového výsledku. Ve smyslu takto zobecnělého pohledu je možno mezi syntezátory zahrnout např. lidské hlasové ústrojí. Tento příklad nevolíme zcela náhodně. Je jisté, že lidský hlas jakožto prvek komunikace člověka s okolním světem představuje významný biologický aparát, jehož zvukově-výrazové možnosti jsou značné. Hlasový projev je kultivován řečí, jazykem daného národa, využíván k uměleckému sdělení (recitace, zpěv atd.). Je také sdělovacím prostředkem emocí, projevů radosti (smích), strachu, úzkosti, smutku (pláč). Melodika řeči (průběh změn základní frekvence hlasu) určuje citové a významové posuny slovního sdělení. Stylizací barvy hlasu lze např. imitovat reálné i vymyšlené zvuky, imitovat projev hlasu jiné osoby, karikovat skutečnost. Je tedy zřejmé, že lidské hlasové ústrojí, jakožto orgán zvukového výstupu každého zdravého jedince lidského druhu, je syntezátorem v obecném slova smyslu.

Pro úvod této kapitoly jsme popis příkladu syntézy zvuku mimo svět hudební elektroniky zvolili záměrně. Je však nutné si uvědomit, že v příkladu lidského hlasové ústrojí hraje důležitou roli také další smyslový orgán – tím je ústrojí sluchové. Lidský sluch je zpětnovazební smyčkou lidského hlasu. To, co říkáme, současně též slyšíme. Již od narození se tyto dva smysly navzájem ovlivňují. Člověk sám sebe v hlasovém projevu slyší, získané informace se v mozku ukládají v podobě **modelů**, na základě nichž se opět ovlivňuje projev hlasu. Tento uzavřený kruh, jehož funkce v průběhu lidského života formuje naše vědomí na základě slyšeného z okolního světa, včetně sama sebe, vytváří modely, které nejsou ovšem statické, ale vyvíjejí se. Pokud se přirozená zpětná vazba např. vrozenou poruchou přeruší (hluchota či hluchoněmost), chybí nezbytná kontrola a modely se vytváří narušené, formované vlivem poruchy a to odlišně od zdravých jedinců.

Vraťme se však ještě k původnímu záměru nalézt definici zvukové syntézy. S poučením z obou uvedených výkladů pojmu se pokusíme nalézt takový, který by vyhovoval současnému pojetí zvukové syntézy univerzálně, tedy pro všechny podoby, žánry a způsoby realizace elektroakustické hudby. Zvuková syntéza je především pojem pro umělé generování zvuku se záměrem využití v elektronické hudbě. S ohledem na fakt, že primárním zdrojem signálu se může stát prakticky jakýkoli zvukový signál, tedy buď přirozený nebo uměle generovaný, stávají se prostředkem syntézy i operace elektronického zpracování signálu. V nejuniverzálnějším výkladu tedy definujeme zvukovou syntézu jako proces generování a zpracování zvukového signálu technologickými prostředky, v různých formách a žánrových určeních tzv. elektroakustické hudby. Význam a rozsah uvedených technologických změn přesahuje míru pouhého zpracování zpracování informace. Je formotvorným a stylizačním prvkem, který na základě ustálených i nově objevovaných metod zpracování odlišuje elektroakustickou hudbu od hudby tradiční, akustické. Elektronika v analogové i digitální podobě ve službě výrazného modifikátoru mikrostruktury signálového materiálu (např. barvy zvuku) a formy výsledného tvaru kompozice (např. metody opakování a nasazení zvukové informace do přesně vymezeného rozsahu časové osy skladby) vystupuje nejen jako nezbytný technologický proces, ale jako řízený sled stylizačních prvků pro vytvoření díla jinými prostředky nedosažitelnými. Z toho úhlu pohledu lze také nalézt zásadní rozdíly v kompozici a interpretaci tradičního akustického projevu hudebních nástrojů a elektroakustických zvukově dramaturgických prostředků.

Znázorníme-li schematicky, jakým způsobem přistupuje uživatel-realizátor k procesu zvukové syntézy, dojdeme k následujícímu zobrazení:



Obr. 2.1 Postavení zvukové syntézy vůči jejímu uživateli

Na pomyslném rozhraní člověka a procesu zvukové syntézy leží rovina abstrakce, která je styčným bodem parametrů syntézy na straně jedné a lidského smýšlení a uměleckém záměru na straně druhé. Zvukové představy se snažíme formovat na základě zkušenosti s konkrétním typem syntézy a množinou předvídatelných výsledků nebo na základě modelů, které se ukládají a formují po celou dobu našeho života. Mohou to být modely získané poslechem nebo znalostí např. konstrukce přirozených nástrojů u virtuálních syntéz.

Než přistoupíme k výkladu obecné teorie zvukového signálu se zaměřením na uměle generované signály a jejich užití, vysledujme některé základní předpoklady role zvukové syntézy a její odlišnosti od přirozeného vzniku zvuku v hudebních nástrojích. V historii zvukových syntéz můžeme vidět celou řadu různých pohledů na jejich principy a užití. V obecné rovině lze pojmout roli uměle generovaného signálu buď jako imitativní nebo inovativní.

2.1.1 Imitativní role zvukové syntézy

Imitativní role syntezátorů vychází z osvojení si poznatků z oblasti akustiky hudebních nástrojů. Nabyté znalosti, opírající se buď o fyzikální příčinnost vzniku tónu přirozenou cestou nebo o navození co největšího dojmu a iluze znění

akustického nástroje, rozdělují imitativní princip syntézy na další dvě podskupiny:

a. objektivní neboli funkčně–imitativní

Při tomto přístupu k algoritmu syntézy sledujeme přímou souvislost uměle generovaného signálu s jeho akustickou předlohou již ve fázi vzniku tónu. Pravděpodobně nejdokonalejším způsobem, který vychází z tohoto přístupu, je matematické modelování fyzikálních struktur, zjednodušeně nazývané virtuální zvuková syntéza (více viz kapitola 3.5). Na základě matematických rovnic, popisujících děje kmitání a vlnění v akustických soustavách, je vytvořen model, který se snažíme realizovat v reálném čase nebo mimo něj jako jeho kopii, s pomocí výpočetní techniky. Díky tomu, že většina akustických jevů u přirozených akustických nástrojů je již dobře popsána a stav vývoje digitální techniky vyhovuje nasazení výpočtů složitých rovnic v reálném čase, lze většinu nástrojů touto cestou věrně napodobit. Samotná role virtuální zvukové syntézy nemusí (a také to její vývoj potvrzuje) znamenat zánik akustických nástrojů. Spíše než o nahrazení nástrojů s akustickým principem tvorby tónu jde o převzetí principů hudební akustiky a její uchopení stylizačními a novátorskými postupy tvůrce – umělce. Příkladem takového přístupu je např. transformace klasických modelů hudebních nástrojů do technicky nerealizovatelných forem, jako je třeba skleněná flétna o délce několika metrů s buzením pomocí smyčce místo proudění vzduchu.

Při modelování využíváme mnoho zjednodušujících faktorů, zejména s ohledem na realitivně omezené vnímání lidského sluchu. Při vzniku tónu na akustických nástrojích totiž probíhá mnoho procesů současně, mnohé z nich je však možno zanedbat, protože se buď na tvorbě zvuku podílejí jen okrajově a jejich vliv je možno zanedbat, nebo je jejich význam a účinek potlačen některými jevy na úrovni fyziologické akustiky a psychoakustiky, jako je např. maskování apod. Pro snazší implementaci modelu ve výpočetní technice také můžeme využívat některých analogií a náhradních schémat akustických obvodů, jako je např. uplatnění teorie vlnovodů pro modelování obecných soustav s rozprostřenými parametry.

b. subjektivní neboli zvukově–imitativní

Tento přístup k metodám umělého generování signálu vychází z faktu, že vjem barvy hudebního signálu a dalších jeho charakteristik lze navodit pomocí

zástupných procesů, které nevycházejí z principu tvorby tónu na simulované předloze a jsou nezávislé na použité metodě jejich generování. První fáze napodobení zvuku akustického nástroje touto cestou je analýza zvukového projevu (tedy nikoli fyzikální příčinnosti) a nalezení vhodných simulačních algoritmů syntézy pro vyjádření co největšího počtu charakteristických parametrů zvuku. Jako příklad uveďme analýzu kmitočtového spektra pomocí Fourierovy transformace, sledování průběhu amplitudové obálky apod. Zkoumání simulovaných signálů probíhá buď v objektivní rovině přímým měřením jeho charakteristik nebo na základě modelů vnímání (subjektivně). Tento druhý případ se opírá o zkušenosti jedince, který umělé napodobení nástroje vytváří a který bere v potaz i jakési univerzální povědomí cílových posluchačů, které uvedený záměr pochopí a přiřadí slyšenému umělému zvuku správnou předlohu. V této souvislosti uveďme i těsně sousedící skupinu uměle generovaných signálů, které si z akustické předlohy půjčují jen omezenou množinu parametrů zvukového signálu, v extrémním případě např. pouze amplitudovou obálku. Zvuk pak může mít „smyčcový“ nebo „bicí“ charakter, s ohledem na průběh jeho obálky, bez zkoumání spektrálního složení. To je mj. důvod, proč si při porovnávání a hlubšímu zkoumání obecných zvukových signálů nevystačíme se statickým Fourierovským rozkladem na jednotlivé harmonické složky, ale signály podrobujeme analýze v dynamickém pojetí.

Uvedené členění se zdá být logické a jednoznačné, uvedeme ale hned dva typy umělého generování hudebního signálu, které do takto vymezeného rozdělení nazapadají jednoznačně.

Prvním z nich je rozdílová syntéza, která vlastně sama o sobě (jak bude uvedeno dále v kap. 3.2) vychází z fyzikálního modelu akustického nástroje. Její imitační užití však naráží na mnoho omezení, která v době jejího prudkého rozmachu v 70. letech nebyla podstatná (bylo to něco nového) nebo vyplývala ze stavu vývoje techniky té doby (nebylo nic lepšího). Jisté je, že užívané zvukové průběhy signálu rozdílové syntézy pokrývají pouze základní potřeby imitace akustických nástrojů, syntezátory disponují pouze generátory zjednodušených obálek, filtry mají jednoduchou kmitočtovou charakteristiku atd. Historický vývoj po úspěšné aplikaci matematického modelování akustických nástrojů v reálném čase však odsouvá tento typ syntézy spíše do zvukově-imitativní.

Druhou metodou, která se dělení metod zvukové syntézy na imitativní a inovativní poněkud vymyká, je lineárně tvarová syntéza neboli sampling. Při

samplingu totiž neimitujeme zvuk akustického nástroje žádným složitým výpočetním algoritmem, ale zaznamenáváme zvuk napodobované předlohy samotný. Ten je pak opětovně přehráván, pro navození dojmu živé hry. Pro odstranění určité strohosti a dokonalého opakování, které použitou imitaci snadno odhalí, se dodávají do procesu syntézy další pomocné operace, které na principu „řízené nahodilosti“ odstraňují nežádoucí statické projevy samplingu. Lineárně tvarová syntéza tedy slouží k imitaci přirozených nástrojů a jiných zvuků, v procesu jejího zrodu však nedochází k uplatnění zástupných procesů simulace (např. v generátorech tvarových kmitů a filtrech), ale je přímo uplatněn sejmутý zvuk, který napodobujeme. Více o této metodě v kapitole 3.4.

Ukazuje se, že samotný princip syntézy je pouze jedním ze základních kamenů imitací či simulací akustických nástrojů (ale i jiných zvukových projevů reálného světa). Neméně důležitým faktorem je totiž také způsob hry, faktura, umělecké vyjádření, expresivita, možnost modulace znějícího tónu atd. Zvukové parametry syntézy na straně jedné a manuální schopnost jeho obsluhy nebo možnost automatizace řízení parametrů pomocí počítače na straně druhé vytváří rovinu uživatelského rozhraní, kterou je třeba pro úspěšné zvládnutí zcela pochopit a umět aplikovat prakticky. Ve snaze o co nejuvěrnější simulaci akustických nástrojů stále hraje největší omezující faktor rozhraní člověk/stroj. Je zajímavé, že většina elektronických hudebních nástrojů od minulosti až do současnosti je klávesovými nástroji, event. vybavenými dalšími přidruženými ovladači. Vyřešení dokonalé simulace rozhraní by vedlo k otázce, zda má ještě imitace či simulace smysl, či není-li efektivnější požit originální akustický hudební nástroj. Pokud ovšem vytváříme nové zvukové rejstříky z modelů reálných nástrojů s využitím např. extrémního nastavení parametrů, může mít pro daný typ nástroje specializovaný ovladač s co největším počtem ovládacích prvků své opodstatnění.

2.1.2 Inovativní role zvukové syntézy

Využití metod syntézy a zpracování signálu pro vytváření nových, dosud neznámých zvuků, se nazývá inovativním přístupem. Ovšem i na základě opakovaného užívání akustickému signálu zprvu nepodobných signálů může vést k utváření modelů vnímání tvůrců i posluchačů. Takovým zvukům pak můžeme přiřazovat určité slovní atributy, vyplývající buď z bezprostředního vnímání barvy zvuku nebo z porovnávání s uloženými modely z dřívějšího poslechu.

Hranice mezi imitacemi a „novými“ zvukovými signály není však ostrá. Jak jsme již řekli, určité syntetické zvukové signály v nás evokují určitý způsob slovního vyjádření jejich barvy nebo, na základě naší zkušenosti, též dalších parametrů zvuku, včetně analytického rozboru. Zvukové signály, vystupující v realizaci EAH, vnímáme jako směsi, které jsme schopni do určité míry rozebírat a vnitřně členit na jednodušší struktury. Podvědomě jim přiřazujeme atributy, převzaté z hodnocení barvy lidského hlasu, akustických nástrojů a vžitých představ o uměle generovaném signálu. Protože se však metody umělého generování a zpracování signálu neustále vyvíjí, zaznamenává také vývoj subjektivního hodnocení a posuzování barvy zvukového signálu v oblasti elektroakustické hudby neustálý přerod. Díky utváření takovýchto modelů lze také vytvářet plagiáty, tedy napodobeniny zvuků, vymyšlených někým jiným již před námi. Stačí pouze odhadnout užité prostředky zvukové syntézy, zejména díky určitým charakteristickým projevům té které metody. Přehnané nadužívání zvukových a výrazových prostředků shodných z předchozími se tak může snadno proměnit v klišé.

Oprostíme-li se od takovýchto vesměs negativních projevů masového rozšiřování technologických prostředků pro tvorbu EAH bez rozdílu žánrového zařazení, bude jistě účelné zkoumat hudební signál, pro pochopení metod jeho umělého generování, z objektivního úhlu pohledu a na základě teorie obecně pojatého hudebního signálu.

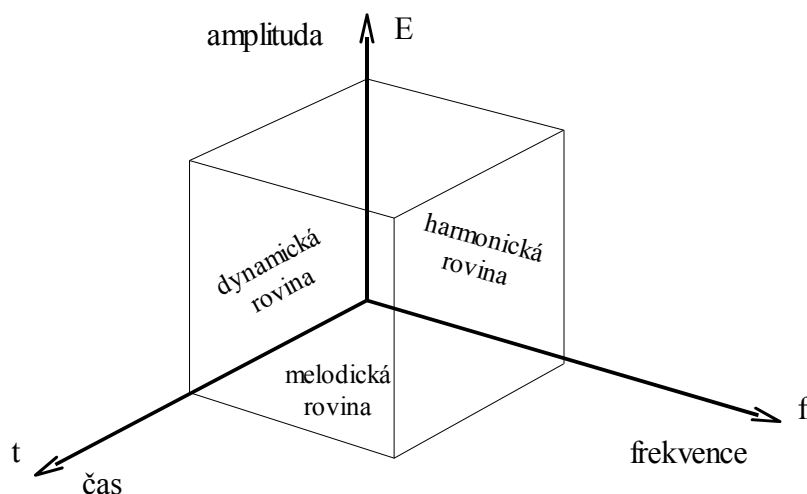
2.2 Teorie uměle generovaného hudebního signálu

Pro pochopení různých metod syntézy hudebního signálu je užitečné se zabývat analyticko-syntetickým hlediskem jeho zkoumání. **Analýza** hudebního (nebo také obecně zvukového) signálu je soubor operací, při kterých rozpoznáváme jednoznačné fyzikální vlastnosti signálu. Hudební signál je podroben analytickému aparátu, jehož výsledkem je soubor parametrů, který by co nejpřesněji popisoval uvažovaný hudební signál. Naproti tomu **syntéza** je proces zpětné rekonstrukce hudebního signálu pomocí operací, které vycházejí z výsledků analýzy. To je jeden z výkladů pojmu syntézy, ve kterém vystupuje syntéza jako ověřovací proces pro potvrzení pravdivosti analýzy.

S ohledem na elektronické generování hudebního signálu je možno aparát zvukové syntézy pojmout jako metodu, algoritmus umělého generování signálu. Přesto není analytický přístup k hudebnímu signálu nikterak zbytečný – tvoří

důležitou součást objektivizace parametrů hudebního signálu na základě subjektivních vjemů lidského sluchu. Slouží jako odrazový můstek mnohých metod umělého generování signálu i jako kontrolní algoritmus pro měření a morfologii.

Pro úspěšné a co nejpřesnější zkoumání charakteristik uměle generovaného signálu nám dobře poslouží **trojrozměrný prostor dynamického pojetí hudebního signálu**, viz. obr. 2.2. Prostor je vymezen třemi osami, a to času, dynamiky signálu (amplitudy) a frekvence. Statický přístup pojetí hudebního signálu bychom získali omezením na prostor dvourozměrný, vymezený pouze harmonickou rovinou.



Obr. 2.2 Trojrozměrný prostor dynamického pojetí hudebního signálu

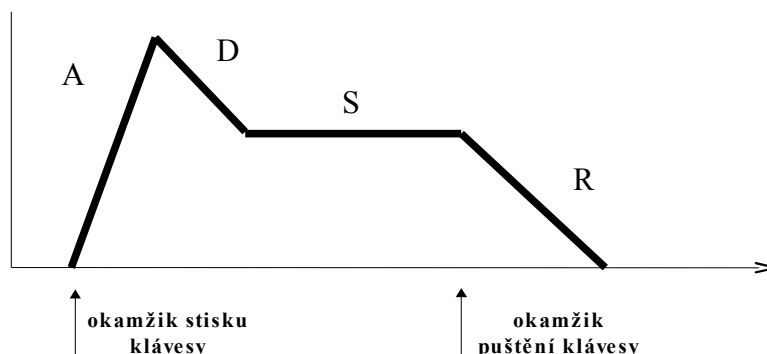
Jelikož se vlastnosti zvukového signálu v čase mění, je **čas** nezávislou proměnnou jeho parametrů. Závislými proměnnými jsou pak **dynamika** a **frekvence**. Průmět trojrozměrného zobrazení zvukového signálu do dynamické roviny určuje časový průběh, resp. časové změny amplitudy. Změnami amplitudy ve větším měřítku časového průběhu (nikoli v podobě střídání kladných a záporných výchylek kolem osy kmitů) lze proložit tzv. **časovou amplitudovou obálku** signálu. Zvukový signál $s(t)$ s časově proměnnou velikostí lze v dynamickém pojetí pomocí amplitudové obálky popsat takto:

$$s(t) = A(t)s_0(t)$$

kde $A(t)$ je amplitudová obálka signálu a $s_0(t)$ je nemodulovaný signál s konstantní amplitudou. Toto vyjádření amplitudové obálky signálu jakožto speciálního případu amplitudové modulace přímo odpovídá např. funkci generátoru obálky (EG) v rozdílové syntéze při aplikaci na obvod VCA.

Signály v závislosti na tvaru amplitudové obálky můžeme dělit na **neperkusní** a **perkusní**. Neperkusní signály vykazují tyto tři fáze svého časového průběhu: nakmitávací pochody, zakmitaný stav a dokmitávací pochody. U signálů perkusních chybí střední část, tj. zakmitaný stav. Nejčastěji se neperkusní signály spojují se subjektivním vjemem určité výšky znějícího tónu, kdežto u signálů perkusních bývá konkrétní výška tónu problematické určit. Samozřejmě i zde existují výjimky: zakmitaný stav neperkusních signálů nemusí být dlouhodobě stacionární a může vykazovat změny periody (frekvence). Naproti tomu v dokmitávacích procesech některých perkusních signálů lze určit přesně výšku tónu, tj. frekvenci jeho kmitů. Jako řídicí obvod v různých druzích syntézy zvuku slouží generátor obálky. Nejjednodušší příklad průběhu řídicího parametru v čase pro řízení např. výšky tónu, hlasitosti a pod. ukazuje obr. 2.3, ale existují i složitější typy.

Jednotlivé fáze obálky se nastavují pomocí času náběhu A (**attack**), překmitu D (**decay**) a dokmitu R (**release**). Úroveň výstupního signálu generátoru obálky po odeznění překmitové fáze se ustálí na hodnotě dané parametrem S (**sustain**).



Obr. 2.3 Průběh generátoru obálky typu ADSR.

Z hlediska frekvenčních vlastností hudebního signálu nás nejvíce zajímá **frekvenční spektrum**, tj. zobrazení frekvenční struktury. Každý obecný signál je totiž složen z většího počtu frekvenčních složek, které vnímáme jako jeden celek. Signály **periodické** vykazují určitou stálou frekvenci (říkáme, že jsou stacionární) a mohou být buď harmonické, tj. obsahují jedinou frekvenční složku harmonického (např. sinusového) průběhu, nebo komplexní, kde signál obsahuje více harmonických složek a to na celistvých násobcích frekvence nejnižší z nich, kterou nazýváme 1. harmonickou a která určuje přímo výšku tónu. Obsahuje-li

spektrum signálu harmonické složky, umístěné na frekvencích v iracionálním poměru k první harmonické, nazýváme tento signál jako **kvaziperiodický**. Stochastické neboli **náhodné** signály vykazují spojité spektrum a mají šumový nebo hlukový charakter. Příkladem může být bílý šum, který obsahuje všechny frekvenční složky. U stochastických signálů je sice konečný tvar spektra a i časového průběhu náhodný a tudíž není determinován, přesto lze jejich vlastnosti zkoumat s využitím výpočtu statistických veličin (např. spektrální hustoty atd.).

Spektrální složení signálu obecného tvarového průběhu určuje do jisté míry vjem jeho barvy naším sluchovým aparátem. Vztahy mezi objektivním a subjektivním popisem vlastností obecného signálu však není v přímé úměře, proto se v kapitole 4 blíže podíváme na problematiku vjemu umělého signálu.

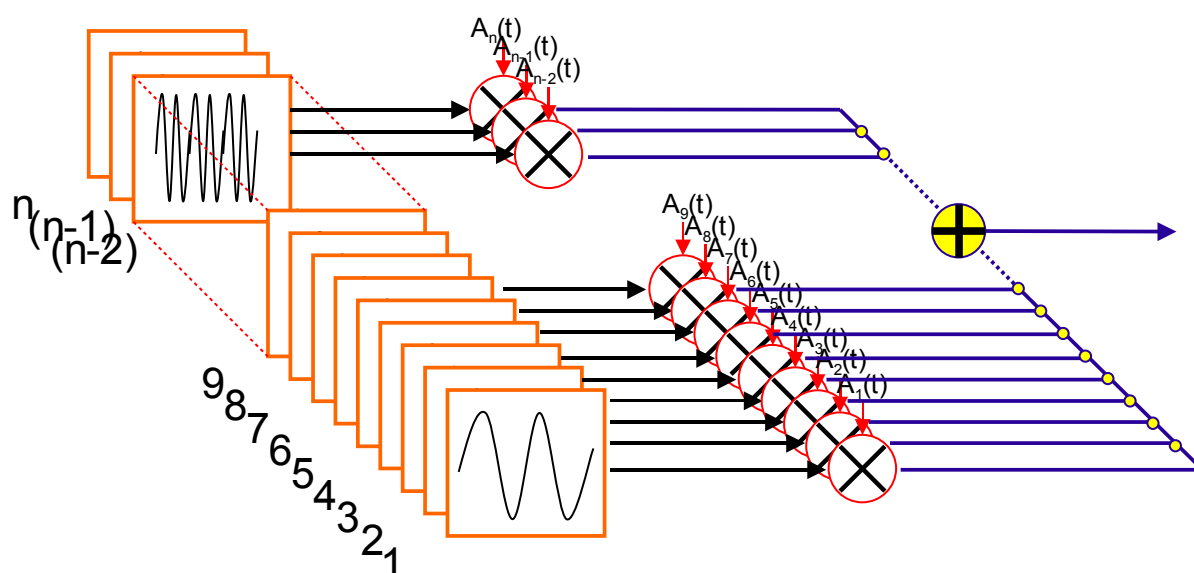
3. TYPOLOGIE METOD ZVUKOVÉ SYNTÉZY

Typologii zvukových syntéz lze provádět podle různých kritérií. Dle technické realizace je lze dělit např. na **analogové** (pracující se signály spojitého průběhu), **digitální** (se signály diskretizovanými) a **hybridní** (např. s analogovou tvorbou zvuku, ale digitálním ovládním), dále na **hardwarové** (realizované specializovanými elektronickými obvody, navrženými přesně pro daný způsob využití) nebo **softwarové** (využívající signálové procesory nebo procesory pro všeobecné použití, kde konečnou podobu syntézy determinuje teprve algoritmus výpočtu počítačového programu) atd. Obecně je možno syntézy zvuku dělit na **statické** či **dynamické** (dle vývoje časových závislostí parametrů zvuku). Možným dělením je také lineární či nelineární pojetí atd.

Pro úspěšnou typologii zvukových syntéz a jejich bližší popis využijeme vžitě dělení na metodu **součtovou**, **rozdílovou**, **modulační** (zejména *FM*), **tvárovou** (zejména lineární) a **modelující**. Toto dělení si více všímá použitého algoritmu a operací při generování a zpracování signálů a je tedy nezávislé na technické realizaci.

3.1 Součtová (aditivní) syntéza

Klasická součtová syntéza uplatňuje tzv. Fourierovský přístup, čili vytváří komplexní vlnové průběhy skládáním řady harmonických sinusových i neharmonických složek. Aditivní syntezátor je tvořen řadou sinusových oscilátorů a řízených zesilovačů. Při velkém počtu složek je zvuková variabilita této syntézy velká. Jednoduchým nastavením intenzitních poměrů harmonických složek lze vytvořit statické, ale velmi bohaté spektrum zvuku. Digitální technika umožnila zkonstruovat stabilní sinusové generátory, které navíc obsahují samostatné generátory obálek pro řízení amplitud harmonických dynamicky, v průběhu času. V takovém případě hovoříme o dynamické součtové syntéze. Nastavování jednotlivých generátorů obálek by bylo velmi pracné a zdlouhavé a tak mnohé nástroje využívají tzv. makropovely pro zjednodušení programování. Díky individuálnímu přístupu k jednotlivým harmonickým složkám lze simulovat např. ostré pásmové propusti nebo zádrže apod. Také je možno přecházet z jednoho nastavení všech harmonických na jiné a vytvořit tak efekt tzv. morphingu. Principiální schéma dynamické součtové syntézy ukazuje obr. 3.1. Je použito N harmonických složek a N generátorů amplitudové obálky.



Obr. 3.1 Schéma součtové syntézy s N harmonickými

Nefourierovský přístup k součtové syntéze je typický využitím sčítání komplexních, nikoli čistých sinusových složek. Tato podoba syntézy se však komerčně nerozšířila.

Výhodou součtové syntézy je velká zvuková variabilita a při velkém počtu harmonických možnost modelovat prakticky libovolné spektrum zvuku. Celý algoritmus syntézy je také plně kontrolován a zvukový výsledek tak naprosto přesně odpovídá předpokladům syntézy. Principy této syntézy se uplatňují také v procesu tzv. resyntézy zvuku např. akustického nástroje. Při resyntéze využíváme princip reciprocity a kompatibility ke klasickému Fourierovskému principu. Sejmутý zvuk je nejprve frekvenčně analyzován, čímž je zjištěno jeho spektrum. Na základě výše zmíněného Fourierovského přístupu se určí amplitudy jednotlivých harmonických, kde zjištěné spektrum je vlastně jejich obalovou křivkou. Následuje proces zpětné syntézy sečtením takto nastavených harmonických generátorů. Nevýhoda součtové syntézy vyplývá z její technické a tudíž ekonomické náročnosti. Pokud využíváme dostupnější statickou podobu syntézy, patří mezi základní omezení možnost modelovat pouze diskrétní spektra, kterým v časové oblasti odpovídají periodické průběhy.

Typickým zvukovým charakterem součtové syntézy je určitá zvuková strohost a státičnost, což nevádí u rejstříků varhanního typu, které jsou touto vlastností typické. Není-li možno modulovat amplitudy jednotlivých harmonických složek (dynamická syntéza), stává se zvuk do určité míry chladný až banální.

Často se setkáváme se součtovou syntézou jako doplňkem jiné, zejména lineárně tvarové nebo rozdílové, kde se ve velké míře uplatní filtrace součtového spektra.

Jako příklad nástrojů se součtovou syntézou lze uvést nástroje Kawai K-5 a K-5000, Synclavier, Synergy apod. Aditivní syntéza jako doplněk našla své uplatnění také v samplerech E-mu Emax 1 a Korg DSS-1. Jednoduchá statická aditivní syntéza s devíti harmonickými se vyskytuje také u dnes již klasických varhan s fónickými koly na elektromagnetickém principu (Hammond) nebo u jejich elektronických následovníků. Princip sčítání hlasových řad různých výšek u píšťalových varhan lze též označit za speciální případ statické nefourierovské součtové syntézy. Také obecné směšování zvukových signálů je možno z pohledu zvukové syntézy pojmout jako obecnou nefourierovskou součtovou syntézu. Praktické zvukové ukázky jsou na **CD příloze (Tr1 až Tr3)**

3.2 Rozdílová (subtraktivní) syntéza

Podstatou této metody syntézy zvuku je filtrace komplexního signálu se spektrem bohatým na harmonické složky, nejčastěji pilového či obdélníkového průběhu a jejím výkladem se částečně zabývala již kap. 1.3 v souvislosti s popisem napěťového řízení. Svého největšího rozvoje dosáhla zejména v 60. a 70. letech dvacátého století v analogových syntezátorech. Metoda bývá proto také často označována jako analogová. Nástroje, zkonstruované pomocí analogových elektronických obvodů, sledují svojí strukturou základní princip tvoření zvuku akustickým hudebním nástrojem. Jelikož lze akustický nástroj modelovat spojením excitátor-oscilátor-rezonátor, lze na základě fyzikálních, resp. elektroakustických analogií napodobit zvuk takového nástroje elektronickými obvody. Zde je možné hovořit již o "fyzikálním modelování", což je ovšem termín, který se objevuje až ke konci 20. stol. v souvislosti s virtuální akustickou syntézou, kde by bylo lépe se přidržet označení "matematické modelování".

Nástroj s rozdílovou syntézou obsahuje ve funkci oscilátoru (*VCO*) nejčastěji *RC* generátor řízený napětím. Příklad sady dvou *VCO* s jejich typickými nastavitelnými parametry ukazuje obr. 3.2.

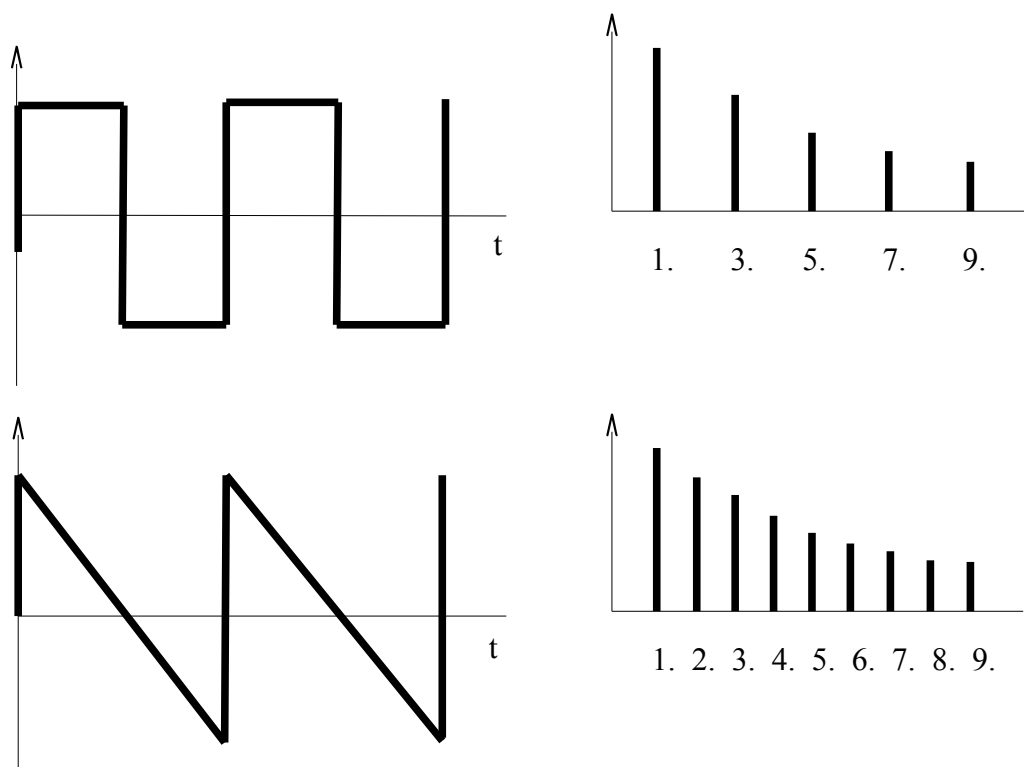


Obr. 3.2 Příklad uspořádání panelu dvou napětově řízených oscilátorů (VCO)

Obvod VCO generuje tvarové kmitů, obsahující řadu vyšších harmonických složek. Spektrum generovaných kmitů je dáno jejich tvarem, který je buď obdélníkový, pilový nebo trojúhelníkový. Napětově řízený oscilátor je přeladován řídicím napětím z klaviatury, která určuje výšku tónu. Kmitočet oscilátoru může být ještě rozmítán obvodem LFO, který slouží jako modulační sub-audio generátor s kmitočtem přibližně v rozsahu 0.02 až 20 Hz. Hloubka modulace je nastavitelná parametrem Pitch Mod. Vzniká efekt, který se v hudební terminologii nazývá kmitočtové vibrato. Syntezátory s větším počtem oscilátorů mohou produkovat více hlasů nebo je možno využívat pro jeden hlas několik oscilátorů pro dosažení bohatšího zvuku jejich spřažením (efekt Unisono). Někdy se vyskytuje i možnost vzájemné synchronizace oscilátorů. Příklady dvou nejběžnějších komplexních průběhů a jejich harmonického složení ukazuje obr. 3.3.

Kromě volby tvaru primárního vlnového průběhu se nastavuje hrubé a jemné ladění obou VCO absolutně i relativně vůči sobě (Detune). Šířka pulzu (PW) určuje střidu pulzního tvarového průběhu. Při nastavení hodnoty 50 % je střída 1:1 a signál je v tomto případě též označován jako obdélníkový. Jeho harmonické složení obsahuje pouze liché složky s klesající amplitudou nepřímo úměrně pořadovému číslu harmonické složky. Bohatší spektrum má druhý typický tvarový průběh – pilový. Obsahuje všechny harmonické složky, ovšem také s postupně klesající amplitudou nepřímo úměrně číslu harmonické. VCO jsou

konstruovány jako volně běžící, tzn. nejsou spouštěny obvody klaviatury nebo jiným spínacím obvodem.



Obr. 3.3 Harmonické složení dvou komplexních signálů VCO u rozdílové syntézy

Signál z generátorů se směšuje v sekci Mixer s bílým šumem a produkty kruhového modulátoru. Kruhový modulátor vytváří součtové a rozdílové tóny ze signálů obou VCO. Při nastavení relativního poměru frekvencí obou oscilátorů v neceločíselném (iracionálním) poměru vznikají kvaziperiodická spektra, vhodná např. pro simulaci bicích nástrojů (např. zvonů).

Základní generovaný audiosignál pokračuje dále do VCF. Zde dochází ke kmitočtové filtraci signálu nejčastěji pomocí filtru typu dolní propust (*LPF*), někdy též horní propust (*HPF*) nebo pásmová propust (*BPF*). Filtr má takovou přenosovou charakteristiku, že z komplexního signálu „odečítá“ určitou část spektra původního signálu z generátoru. Odtud plyne název subtraktivní syntézy. Mezní (někdy též překládaný doslovně jako ořezávací či odřezávací) frekvence (Cutoff Frequency) filtrů *LPF* a *HPF*, případně střední kmitočet filtru typu *BPF*, lze opět přeladovat řídicím napětím *CV*. To může přicházet z modulačního generátoru *LFO*, kterým lze filtr přeladovat periodicky kolem střední hodnoty (mezní frekvence). Filtr lze dále řídit klaviaturou a dosáhnout např. toho, že nižší tóny

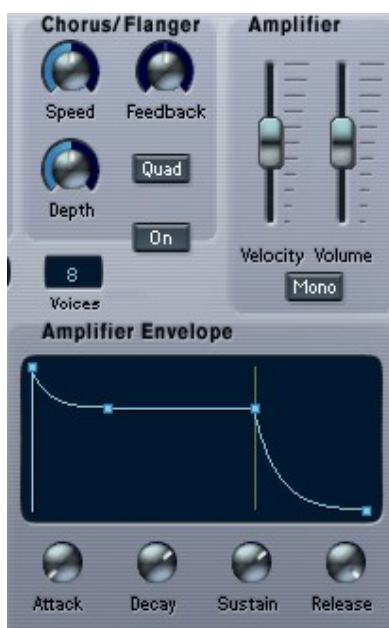
mají spektrum více zatlučené a směrem k vyšším tónům se zvuk přiosťruje (Key Tracking).



Obr. 3.4 Příklad uspořádání panelu napětově řízeného filtru (VCF)

Přeladováním filtru pomocí vlastního generátoru obálky (EG) typu A-D-S-R lze vytvořit obálku barvy zvuku. Řízení barvy zvuku v čase se nazývá souhrně spektrální modulace. Filtr analogového syntezátoru je aktivním elektronickým obvodem, nejčastěji druhého nebo čtvrtého řádu. Tak lze získat strmou přenosovou charakteristiku 12 nebo 24 dB/okt. Na většině VCF lze nastavit dále zpětnou vazbu a docílit zdůraznění frekvencí (Emphasis, Resonance) v okolí mezní frekvence a vytvořit tak tzv. kvazirezonanční vrchol. Extrémní nastavení tohoto prvku vede často k rozkmitání celého filtru, který se tak stává generátorem dalšího signálu. Tohoto jevu se využívá např. k tvorbě experimentálních zvukových barev.

Posledním funkčním blokem syntezátoru je VCA. Zde se vytváří jednak základní amplitudová obálka signálu a dále také modulací pomocí LFO tzv. tremolo, tedy periodická změna hlasitosti zvuku. Za VCA následuje výstupní zesilovač a signál lze přivést např. do směšovacího stolu nebo efektové jednotky k dalšímu zpracování. VCA v našem příkladu obsahuje zvukový procesor typu Chorus/Flanger.



Obr. 3.5 Příklad uspořádání panelu napěťově řízeného zesilovače (VCA)

Výhodou nástrojů s rozdílovou syntézou je jejich relativně snadné a přehledné nastavování, zvláště jsou-li ovládací prvky jednotlivých funkčních bloků uspořádány v tom pořadí, jak je zvuk vytvářen. Některé akustické nástroje je možno celkem uspokojivě simulovat. Je také narozdíl od součtové syntézy podstatně méně technicky náročná a naplňuje formální shodu s modelem vzniku tónu na hudebním nástroji, přestože tvorba tónu vzniká aktivním zpracováním v oblasti filtrace a zesílení tónu, narozdíl od akustického nástroje, který se vyznačuje aktivní generací tónu (např. buzení struny smyčcem). Nevýhoda rozdílové syntézy spočívá v omezených zvukových možnostech, které jsou víceméně dány spektrem primárního signálu z oscilátoru a zvukovou charakteristikou použitého filtru. Rozdílová syntéza sama o sobě je lineárním procesem, obdobně jako součtová syntéza, a její zvukové možnosti lze obohatit některým nelineárním obvodem, např. zmíněným kruhovým modulátorem pro kovově znějící zvuky apod.

Analogových syntetizérů byla vyvinuta celá řada, od nejjednodušších jednohlasých po plně polyfonní. Nástup digitální techniky se dotkl i rozdílové syntézy. Nástroje dostaly číslicovou paměť pro uložení nastavení ovládacích prvků, oscilátory byly vybaveny číslicovými děličkami kmitočtu a jejich stabilita zajištěna smyčkou fázového závěsu (PLL) s krystalovým rezonátorem. Takovéto hybridní analogově-digitální nástroje byly vyráběny až do konce 80. let. dvacátého století.

Jako typické zástupce velkého počtu analogových syntetizérů lze uvést např. slavné nástroje Roberta Mooga (MiniMoog, PolyMoog, Prodigy, Modular atd.), ARP (Axxe, 2600, Omni atd.), SCI (Prophet 5) a dále japonské nástroje firem Roland, Yamaha a Korg. V současné době jsou syntezátory s rozdílovou syntézou postavené s využitím analogových obvodů spíše vzácným zbožím pro hudební nadšence. Princip subtraktivní syntézy však využívá početná množina nástrojů s lineárně-tvarovou syntézou, kde se namísto klasických generátorů tvarových kmitů využívají generátory založené na čtení digitálního signálu z paměti. Filtrační část blokového uspořádání analogové syntézy (byť realizovaná digitálně) přežívá i v jiných typech syntéz a celý její řetězec bývá také často modelován pomocí virtuálních nástrojů. Zvukové příklady jsou na **CD (Tr4 až Tr7)**.

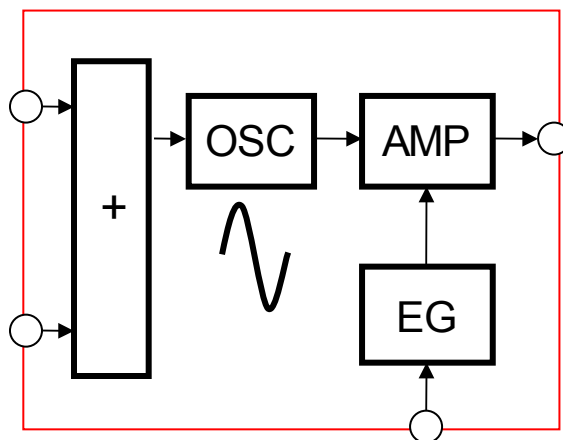
3.3 Modulační metody syntézy

Nejrozšířenější a nejznámější metodou syntézy, založené na principu modulace, tedy řízené změně některého z parametrů signálu signálem modulačním, je metoda frekvenční modulace. Kromě ní existuje ještě např. princip amplitudové modulace (*AM*), ale ten se příliš komerčně neuplatnil. Kruhová modulace je naproti tomu častým doplňkem např. rozdílové syntézy.

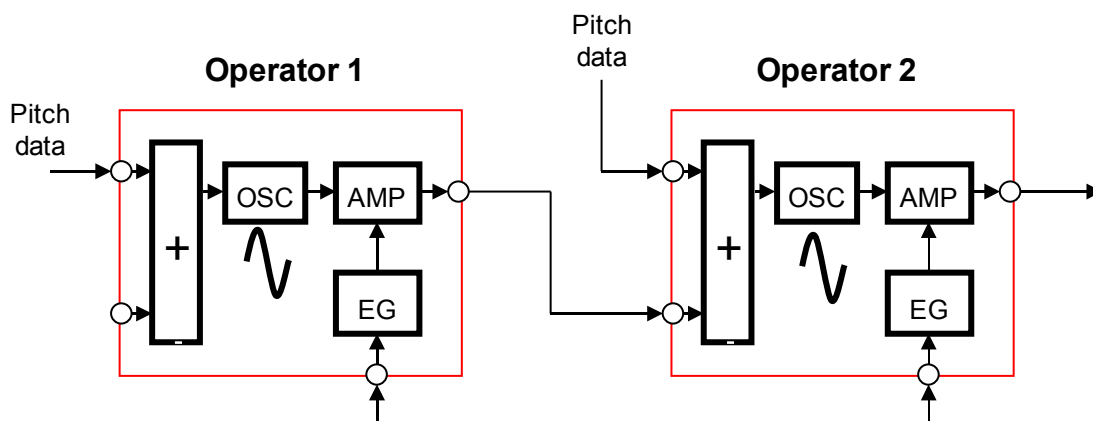
Princip frekvenční modulace, jakožto speciálního typu nelineárního směšování, je znám již od počátku vývoje radiového přenosu signálů. Její uplatnění v oblasti hudební elektroniky bylo dlouhou dobu spíše laboratorní záležitostí, ale díky počítačovým programům se metoda stávala dostupnou i širší veřejnosti. Největšího úspěchu však dosáhly *FM* syntetizéry Yamaha, postavené na bázi specializovaných LSI obvodů. Na rozdíl od ostatních modulačních metod dosáhla právě *FM* syntéza největšího komerčního uplatnění.

FM nástroje využívají jednoduché sinusové oscilátory, spojené do schématu - algoritmu. Základní řada Yamaha DX a TX syntezátorů v čele se svým nejslavnějším představitelem DX-7 využívá 32 algoritmů, v každém z nich je obsaženo 6 tzv. operátorů. Ty se skládají ze sinusového oscilátoru (*OSC*) a řízeného zesilovače (*AMP*) s vlastním generátorem obálky, viz obr. 3.6. Operátory se využívají ve dvou různých rolích: buď jako tzv. nosič (*carrier* - generátor nosné vlny) nebo jako modulátor. Jednoduchým spojením modulátoru a nosiče vzniká základní stavební kámen *FM* syntézy. Zvukové možnosti této jednoduché

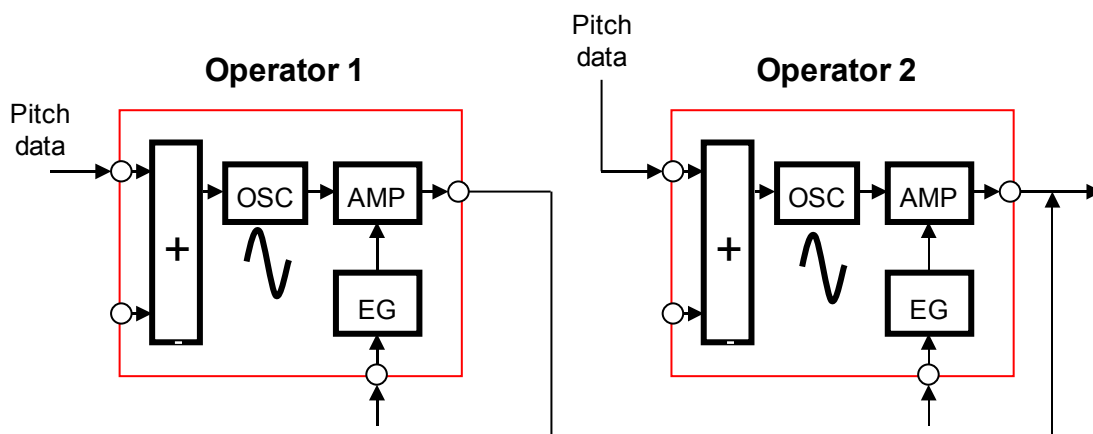
struktury, řízené v podstatě třemi základními parametry (kmitočet modulátoru, kmitočet nosiče a modulační index), jsou obrovské.



Obr. 3.6 Struktura operátoru FM syntézy firmy Yamaha

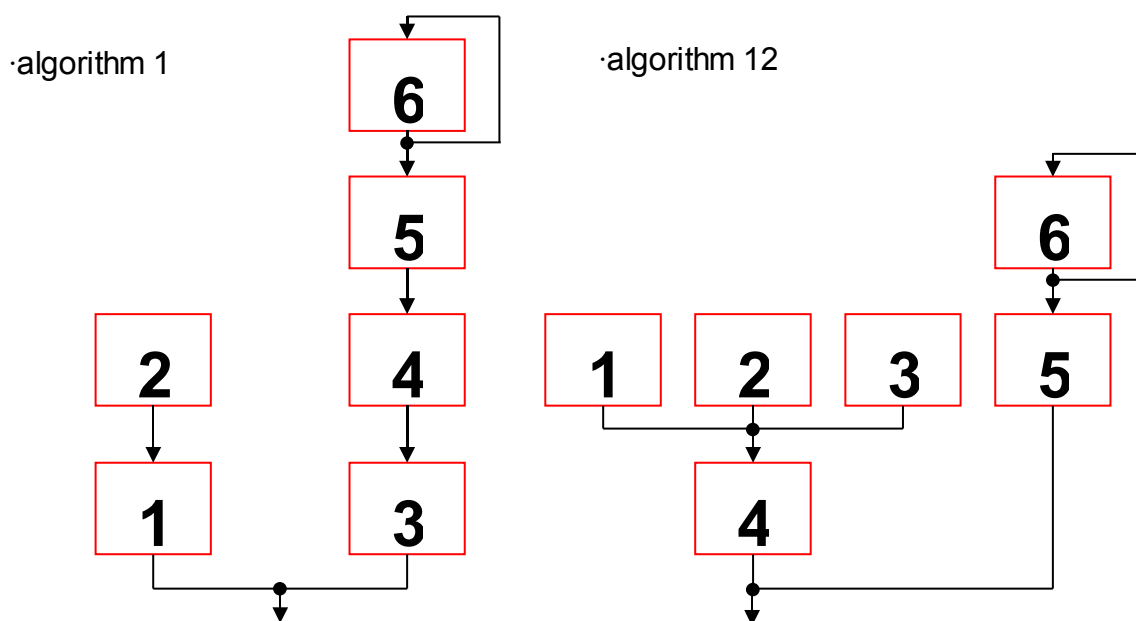


Obr. 3.7 Konfigurace propojení dvou operátorů FM syntézy v kombinaci modulátor-nosič



Obr. 3.8 Konfigurace propojení dvou operátorů FM syntézy v kombinaci nosič-nosič

Každý operátor má dva řídicí vstupy pro řízení frekvence. Připojuje se buď klaviatura pro běžné přeladování podél tónového rozsahu nebo je možno nastavit fixní frekvenci. Do druhého vstupu pro řízení výšky tónu je možno zapojit výstup jiného operátoru nebo vstup pomocného *EG* pro modulaci výšky tónu. Příklady dvou základních struktur demonstrují obr. 3.7 a 3.8 a **ukázky na CD (Tr8 a Tr9)**. Frekvence modulátoru i nosiče leží ve slyšitelném pásmu a jejich poměrem lze získat buď periodická spektra (celistvý poměr kmitočtů) nebo neperiodická, kovově znějící spektra (iracionální poměr). V některých algoritmech je uzavřena smyčka zpětné vazby, kdy nosič je sám sobě modulátorem, čímž vznikají zajímavé zvukové barvy. Obálka nosiče má vliv na amplitudu signálu, obálka modulátoru pak na barvu zvuku. Celá *FM* syntéza firmy Yamaha a její řízení se odehrává ve dvou mikroprocesorech, převodník digitálního signálu na analogový zvukový signál je zařazen až na výstupu nástroje.



Obr. 3.9 Příklad zapojení dvou algoritmů *FM* syntezátoru Yamaha DX-7

Na obr. 3.9 vidíme příklad dvou algoritmů syntézy *FM* na nástroji Yamaha DX-7 a na **CD** najdeme jejich zvukové ukázky v **Tr10** a **Tr11**. Některé *FM* nástroje Yamaha nabízely určité zjednodušení syntézy tím, že využívaly pouze 4 operátory uspořádané v osmi algoritmech, zato však bylo možno využít i jiné průběhy signálu, než sinusový. Volbu tvaru vlny v operátorech nabízely i modernější nástroje Yamaha (SY-77, SY-99, TG-77), kde navíc přistupují možnosti využít filtry a zesilovače, známé ze subtraktivní syntézy, zde samozřejmě simulované digitálně.

Výhodou *FM* syntézy jsou obrovské zvukové možnosti, dosažené relativně jednoduchými prostředky. Silnou stránkou *FM* syntézy jsou perkusní zvukové průběhy zvonového charakteru, různé ruchy či šumy apod. Nevýhodou je naopak to, že zvukový výsledek často nelze odhadnout (přestože rozložení a velikost modulačních produktů je možno přesně matematicky determinovat pomocí Besselových funkcí) a složitější *FM* zvuky není možné cíleně programovat bez důkladné znalosti syntézy. *FM* syntéza je totiž nelineárním procesem, který nemá u akustických nástrojů svůj ekvivalent. Další nevýhodou je pak také určitá digitální "chladnost" zvukového projevu *FM* nástrojů.

3.4 Tvarová syntéza

Princip tvarových metod přináší zcela jiný pohled na oblast umělého generování zvukového signálu. Viděli jsme, že všechny tři předchozí metody syntézy pracují ve frekvenční oblasti (součet, rozdíl a vznik nových spektrálních složek). Tvarové metody jsou založeny na generování a modifikaci časového průběhu, tedy tvaru generované vlny.

Metod tvarové syntézy je celá řada. Najdeme zde např. **nelineární tvarování** (zkreslení např. sinusového průběhu nelineárním obvodem), **aproximační** nebo **segmentační** metody (nahrazení např. sinusového průběhu jednoduššími parabolickými oblouky) nebo třeba **granulační** (rychlý sled různých tvarových průběhů na způsob skládání kontinuálního pohybu filmovými políčky). Výhodou takto používaných tvarových principů je to, že vždy lze několik parametrů změnit a výstavbu tvarového průběhu modulovat a dosáhnout tak podobných výsledků, jako třeba u *FM* syntézy. Většina těchto metod syntézy však nedošla širšího komerčního uplatnění. Vyjimku tvoří tzv. **lineárně-tvarová** syntéza neboli sampling.

Princip lineární tvarové syntézy není vlastně ničím jiným, než sejmutím, záznamem a zpětným přehráním libovolného audiosignálu vstupujícího do sampleru, jak se zařízení pro vzorkování zvuku nazývá. Převod analogového signálu na číslicový se děje v *A/D* převodníku. Ten se skládá ze vzorkovacího obvodu, odebírajícího ze vstupního signálu vzorky v pravidelných časových intervalech (tzv. diskretizace v čase), a kvantovacího obvodu, který těmto vzorkům signálu přidělí příslušný číslicový kód *PCM* podle intervalů, ve kterém se nalézá jejich absolutní hodnota. Časový průběh analogového signálu je tak převeden do posloupnosti čísel, která se ukládají do paměti k dalšímu zpracování.

Sejmuté vzorky vstupního signálu jsou pouhým "zmrazením" reálného zvuku, který může být kdykoli přehrán v nezměněné podobě. To se hodí pro využití sampleru např. při ozvučování filmů na spouštění zvukových efektů apod. Má-li se stát sampler hudebním nástrojem, je nutno se vzorky ještě dále pracovat. Pro přesvědčivé vyznění např. zvuku akustického nástroje je nutno vzorkovat více tónů podél tónového rozsahu, aby nedocházelo k nežádoucí transpozici formantových oblastí ve spektru originálního zvuku. Běžně se vzorkuje po malých či velkých terciích (4 nebo 3 vzorky v jedné oktávě). Sampler chybějící mezikroky v tónové řadě vygeneruje transpozicí navzorkovaných zvuků, která není v tak malém rozsahu rušivá.

Velký význam má v sampleru zpracování jednotlivých vzorků pomocí *DSP*. Jednou ze základních operací je smyčkování pro vytvoření libovolně dlouhého tónu. Dále je to normalizace úrovně, změna úrovně, transpozice, filtrace, obrácení smyslu přehrávání, časová komprese či expanze beze změny ladění apod. Takto lze pracovat na úrovni jednotlivých vzorků na různých samplerech různě. Samplery dále obsahují číslicově simulované audio-obvody a řídicí obvody podobné těm, které jsou využívány v rozdílové syntéze. Tím se stává sampler plnohodnotným syntetizérem s velkou zvukovou variabilitou. Některé samplery obsahují jako doplněk ještě další možnosti syntézy, jako je např. součtová či *FM*.

Výhodou samplingu je možnost simulace zvuku akustického nástroje. Nejedná se vlastně o simulaci v pravém slova smyslu (viz. kap. 2.1.1), neboť sampler reprodukuje zaznamenaný signál skutečného akustického (nebo jakéhokoliv jiného) nástroje. Zpracováním vzorků a parametry syntézy je možno odstranit do určité míry státnost pouhého zachycení reálného zvuku. Pro přesvědčivé vyznění hry simulovaného akustického nástroje je třeba zaznamenat velké množství vzorků, různých technik hry, nasazení tónu atd. Jejich vhodným kombinováním se lze pouze přiblížit zvuku skutečného nástroje, nikoli jej však nahradit.

Mezi typické představitele samplerů patřily nástroje japonské firmy Akai (model S-1000 již po dlouhá léta představuje určitou normu mezi HW samplery a také standard pro formát záznamu vzorků na velkokapacitní média, jako jsou např. disky CD-ROM), dále americké samplery E-mu (Emulator I, II, III a IV, Emax 1 a 2), Ensoniq (Mirage, EPS, ASR) nebo japonské nástroje Roland (S-550, S-750), Korg (DSS-1, DSM-1) a Yamaha (TX-16W, A-3000, A-4000, A-5000). Všechny tyto nástroje představují hardwarovou podobu realizace sampleru. V

současné době se zdají být klasické nástroje tohoto typu překonány a nahrazují je složité počítačové aplikace, které umožňují mnohem pohodlnější záznam, úpravy, archivaci a přehrávání zvukových vzorků. Za všechny jmenujme např. softwarový sampler Kontakt od firmy Native Instruments. Příklad zvukových možností samplingu najdeme na **CD (Tr12 až Tr14)**.

* * *

Existuje celá řada dalších kombinovaných metod zvukové syntézy, které dosáhly v průběhu svého vývoje většího či menšího komerčního úspěchu. Většina ostatních metod využívá nějakým způsobem principy známé z výše zmíněných syntéz. Jejich hybridním spojením vznikly syntézy, o jejichž nejtypičtějším zástupcích se alespoň stručně zmíníme.

Jednou z nich je **LA syntéza** firmy Roland. Lineární aritmetika, jak firma svoji metodu syntézy nazývá, spojuje princip rozdílové syntézy a vzorkování. LA syntéza pracuje s krátkými zvukovými vzorky akustických nástrojů a využívá té skutečnosti, že pro jejich přesvědčivou imitaci stačí právě těch několik desítek milisekund úvodního transientu zvuku, na které je lidské ucho nejcitlivější. Jádro zvuku je potom tvořeno analogovým, digitálně řízeným oscilátorem s pilovým či pulzním průběhem. Až 4 vlnové generátory, buď *PCM* (se vzorky) nebo analogové, z nichž každý má svůj generátor obálky, *LFO*, filtr a zesilovač, lze spojit do jednoho komplexního zvuku. Generátory jsou vždy po dvou konfigurovány v tzv. strukturách. Ty určují kombinaci *PCM* generátoru s analogovým, jejich směřování na dva výstupy syntetizéru a propojení s kruhovým modulátorem. *PCM* vzorky nelze filtrovat, využívají se pro svou ostrost a konkrétnost nasazení.

Prvním a nejznámějším LA nástrojem je Roland D-50. Používá 100 *PCM* vzorků a 8 struktur. Jeho následovníci jsou co do editačních možností zjednodušeny, využívají zato více vzorků (256) a struktur (13).

Dalším typem syntézy je tzv. **vektorová syntéza**. Nástroje s touto syntézou pracují s generátory převážně na bázi smyčkových vzorků. Vlastní princip vektorové syntézy spočívá v řízeném směšování max. 4 generátorů pomocí křížového ovladače (Joystick). Pohyby ovladače lze zaznamenat do paměti nástroje a ten je pak provádí automaticky. Výsledkem jsou dlouhé nebo naopak skokové přechody mezi jednotlivými složkami, navíc je možno takto získané vektorové sekvence smyčkovat. Obdobného výsledku by bylo možné

dosáhnout i na některých jiných syntetizérech vhodným naprogramováním generátorů obálek, vzhledem k jejich limitovaným možnostem však pouze omezeně.

Mezi nástroje s vektorovou syntézou patří např. Prophet VS dnes již neexistující americké firmy Sequential Circuits (SCI), dále Korg Wavestation a Yamaha SY-22, TG-33, SY-35 atd.

Jako další typ syntézy lze uvést **wavetable** syntézu firmy PPG (nástroj Wave), později Waldorf (MicroWave, Wave). Nástroje využívají krátké vzorky, často jen jedinou periodu zvuku, které jsou cyklicky čteny z paměti. Vlnové tabulky je mezi sebou možno přepínat, a to buď determinovaně pomocí řídicích obvodů nebo náhodně. Princip tvorby tónu v generátoru je podobný též granulárnímu principu. Nástroje dále využívají běžné filtry a zesilovače, známé z rozdílové syntézy. Zajímavostí je, že tyto jsou u výše zmíněných nástrojů PPG Waldorf řešeny analogově, digitální je pouze oscilátor.

Všechny kombinované a hybridní syntézy však nějakým způsobem kombinují a modifikují známé typy. S trochou nadsázky je možno říci, že téměř každý nástroj, vyrobený od 80. let minulého století až do současnosti, přichází se svou vlastní syntézou, alespoň jak uvádějí často jejich výrobci v reklamních materiálech. Většina komerčních nástrojů pro všeobecné použití (s důrazem na populární hudbu) posledních let pracuje na bázi ROM samplingu (vzorky uložené v paměti výrobcem, které nelze měnit) v kombinaci s filtry a zesilovači. Jejich struktura se tedy blíží nejvíce rozdílové syntéze s tím, že charakter zvuku je dán z velké části ROM vzorky a lze jej v dalších obvodech pouze dotvářet.

3.5 Modelující metody zvukové syntézy

3.5.1 Vlastnosti a možnosti matematického modelování

Především je nutno uvést základní motivaci vývoje virtuálních akustických nástrojů. Kupříkladu virtuální akustická syntéza (dále jen VA syntéza) firmy Yamaha (využitá v komerčně dostupných nástrojích série VL-1) je založena na matematickém modelu složité mechanicko-akustické soustavy, jakou každý akustický nástroj nebo lidské hlasové ústrojí bezesporu je. Model je tvořen soustavou rovnic, které popisují mechanické a akustické kmity nástroje při hře. Takovýto model, který sám o sobě není ničím jiným, než obrovským množstvím matematických vztahů, jakoby "ožívá" v momentě, kdy obdrží od obsluhy (tou

může být buď člověk nebo stroj - počítač) důležitá vstupní data - počáteční podmínky. Na základě získaných počátečních podmínek se uvede v činnost matematický model v podobě řádově miliónů výpočtů. Zde je nutné podotknout, že pro vytvoření matematického modelu je nutno vyjít z modelu fyzikálního. Přestože je tomu tak a v literatuře je princip syntézy někdy označován jako "fyzikální modelová syntéza", držíme se označení "matematické modelování". Přitom bude vždy zřejmé, že máme na mysli složitou matematickou soustavu, která popisuje chování soustavy fyzikální.

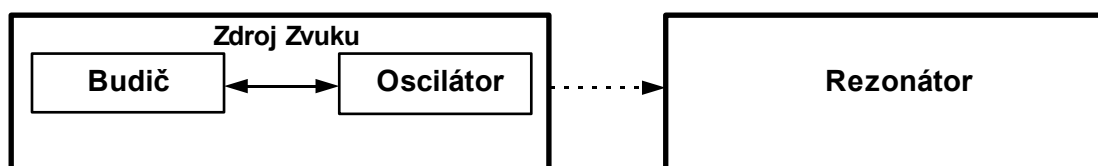
Výsledkem celého výpočetního procesu je tedy komplexní zvukový signál, který odpovídá modelovanému akustickému nástroji. Má-li probíhat celý tento proces v reálném čase, bez většího zpoždění, je nutno pro výpočty využít rychlé signálové procesory nebo dokonce multiprocesorový systém. Základní odlišností nástrojů s modelující syntézou od ostatních druhů syntezátorů je to, že se nesnaží napodobit zvuk reálného hudebního nástroje, jako je tomu např. u samplerů, ale že napodobují přímo jejich princip, jejich funkci. Tím se stala např. VA syntéza zajímavou pro mnoho zájemců díky možnosti napodobit velmi věrně zvuk některých nástrojů, pro které byl definován matematický model. Nelze se domnívat, že nástup VA syntézy měl mít za následek zánik některých skutečných hudebních nástrojů, které simuluje. Možnosti VA syntézy jdou za hranice reálného světa, což v praxi znamená, že lze modelovat i hudební nástroje, které reálně neexistují nebo lépe řečeno ani existovat nemohou. Příkladem může být skleněná flétna, dlouhá třeba 30 metrů a buzená obrovským smyčcem. Nebo kytara, která má struny dlouhé a silné, jako mostní závěsná lana atd. Zde je další význam VA syntézy: vedle imitativní role též role inovativní. Meze VA syntézy jsou dány samotným modelem a soustavou okrajových podmínek, pro které má celý matematický proces divergentní tendenci, tzn. pokud vede ke stabilním výsledkům. V těchto mezích je možno teoreticky modelovat vše, co dovolí fantazie uživatele.

Vraťme se ještě ke vztahu VA syntézy a samplingu. Když stiskneme klávesu na sampleru, je možno vyvolat přijatelné zdání jednoduchého tónu, zahráného na nástroj. Ovšem spojíme-li tóny do frází, melodií a akordů, je zřejmě imitace poněkud nepřesná. Ve výrazových prostředcích nástrojů, jako jsou např. saxofony, housle a kytary, je každý tón tvořen v hudebním kontextu. V průběhu fráze totiž zazní tón následně po jiném tónu a vede k dalšímu tónu nebo tichu (pomlce). Rezonance předchozích tónů se promítají do chování

následujících tónů. Přechodové jevy jako dýchání, cvakání kláves, klouzání prstů, nasazení apod. obohacují hudební frázi a ta dostává lidský, tudíž přirozený charakter. Na rozdíl od samplingu je VA syntéza vynikající v simulování přechodů mezi dynamikou a barvou zvuku. Kromě běžných výrazových nuancí je potenciál VA syntézy schopen simulovat i některé negativní projevy a nehody, které se mohou hráči na skutečný hudební nástroj při hře přihodit.

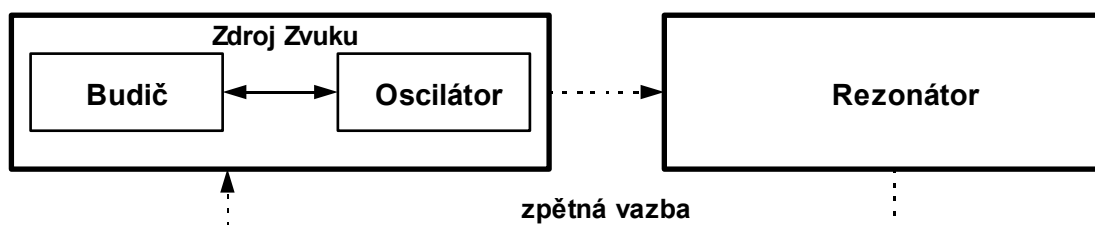
3.5.2 Obecný model akustického nástroje

Samotný princip VA syntézy vychází z obecného modelu akustického nástroje (obdobně jako rozdílová syntéza), který je tvořen budičem, oscilátorem (tyto dva prvky můžeme pro zjednodušení sloučit a nazvat je zdrojem zvuku) a rezonátorem. Interakce mezi zdrojem zvuku (např. struna, rozkmitaná smyčcem nebo trsnutím) a rezonátorem (tělo nástroje) je možno rozdělit na dva typy: tlumené a nucené kmity. V prvním případě neexistuje žádná nebo pouze jen slabá zpětná interakce mezi rezonátorem a zdrojem zvuku a přenos zvukové energie probíhá převážně jednosměrně. Celou situaci názorně ukazuje obr. 3.10.



Obr. 3.10 Tlumené kmity

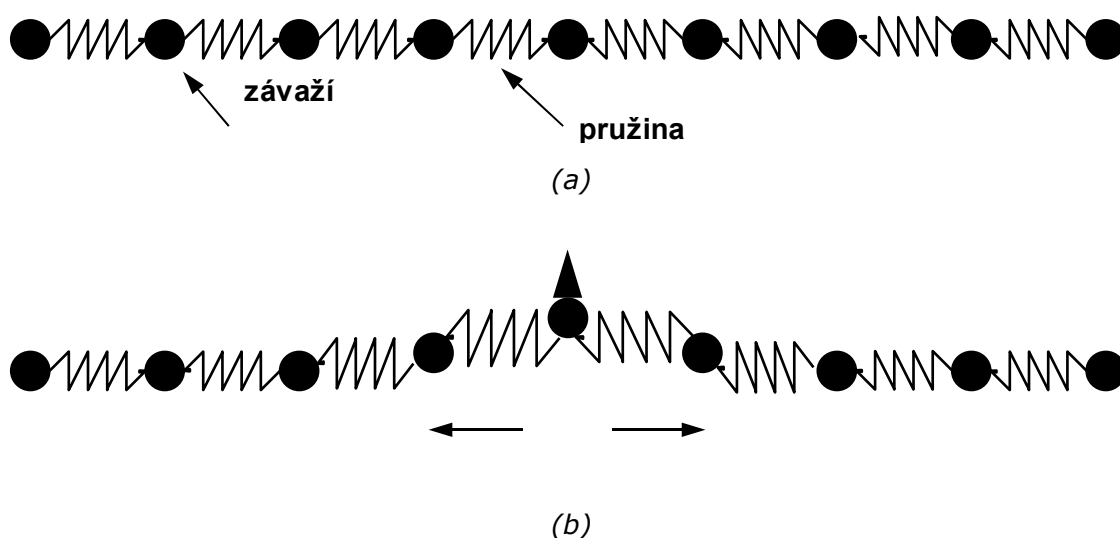
Naproti tomu u nucených kmitů je mezi zdrojem zvuku a rezonátorem uzavřena smyčka zpětné vazby. To znamená, že rezonátor je schopen zpětně ovlivňovat zdroj zvuku. Příkladem nucených kmitů je vznik tónu v saxofonu. Kmitočet vibrujícího plátku je silně ovlivněn akustickou zpětnou vazbou od rezonujícího sloupce vzduchu poté, co mu byl dán počáteční impuls proudem vzduchu z úst. Schematicky je naznačen princip této interakce na obr. 3.11.

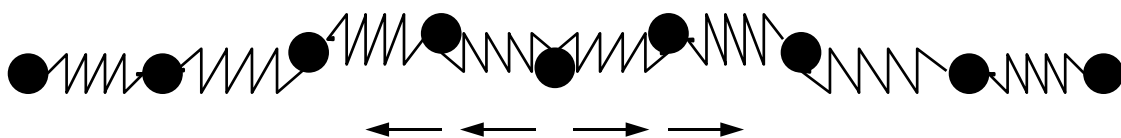


Obr. 3.11 Nucené kmity

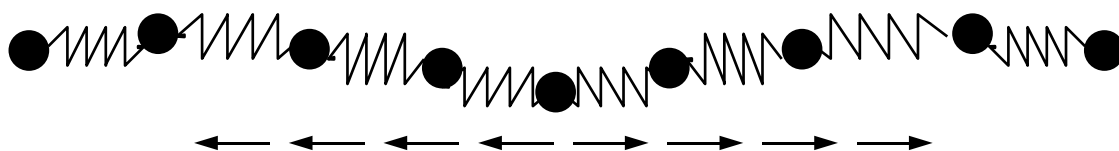
3.5.3 Klasická metoda matematického modelování

Klasické metody modelování zvuku vycházejí z náhrady mechanicko-akustické soustavy složitou soustavou elementárních závaží (charakterizovaných určitou hmotností), propojených pružinami (poddajnostmi). Nejstarším modelem s využitím spojení závaží-pružina je model kmitající struny. Tento model odvodil v 19. století Joseph Bernoulli a vychází z popisu řady kmitajících bodů pružného prostředí diskretní strukturou, tedy soustavou se soustředěnými parametry. Tento model zachycuje dvě základní kvality kmitajícího prostředí. Jednak je to fakt, že kmitající soustava má hustotu, což je hmotnost na jednotku objemového množství média, za druhé, že kmitající prostředí vykazuje pružné vlastnosti, je elastické. Jestliže je hmotný element média vychýlen ze své rovnovážné polohy, vzniká ihned obnovovací síla jako reakce na prvotní akci (1. Newtonův pohybový zákon) a snaží se vrátit element do klidového výchozího stavu. Jestliže tedy drkneme na strunu, vychýlené pružiny "tahají" za hmotné elementy - závaží a dostávají je z rovnovážné polohy. Ve smyslu zmíněného pohybového zákona následuje zpětný pohyb struny přes rovnovážnou polohu do výchylky opačného smyslu (2. Newtonův pohybový zákon - zákon setrvačnosti). Celý tento proces je vlivem třecích mechanismů tlumený a kmity struny po určitém čase ustanou. Rozruch (drnknutí) se však šíří podél struny oběma směry určitou konečnou, pro dané médium specifickou rychlostí, a to v podobě postupného příčného vlnění. Model struny odpovídající klasickému přístupu s využitím závaží a pružin ukazuje obr. 3.12 (a), obr. 3.12 (b) až (d) ukazuje šíření rozruchu podél struny.





(c)



(d)

Obr. 3.12 Klasický model struny jako řada závaží a pružin (a), šíření rozruchu podél struny (b) až (d)

Model s využitím závaží a pružin může být rozšířen pro vibrující povrchy (např. membrány) aplikací modelu struny ve dvoudimenzionální nebo pro objemy v trojdimenzionální soustavě souřadnic. Povrchy mohou být modelovány jako systém závaží spojených navzájem čtyřmi pružinami, objemy mají podobu prostorové mřížky se závažími propojenými do šesti směrů.

Model závaží-pružina může být též využit pro popis excitace (buzení). Na nelineární oscilace, které jsou využívány často jak zdroj zvuku v metodách *MM*, můžeme pohlížet jako na systém závaží, propojených nelineárními pružinami. Závaží představují setrvačné vlastnosti hmoty budiče a pružiny pak její nelineární elastické vlastnosti. Pro reálné soustavy přistupuje k modelu ještě další prvek, kterým je tlumič kmitů (odpor). Jeho úloha spočívá v modelování sil pro tlumené kmity a pro modelování vazby zdroje zvuku a rezonátoru.

Vědecký úkol vytvoření matematického modelu hudebního nástroje klasickou metodou sestává z následujících kroků:

1. Specifikovat fyzikální dimenze a vlastnosti vibrujících předmětů, včetně jejich rozkladu na hmotné a poddajné elementy. Pro takto zjištěnou strukturu se odvodí soustava matematických rovnic, která ji popisuje.

2. Popsat hraniční podmínky na základě konečných rozměrů modelovaného nástroje. Tyto meze proměnných ohraničují daný model a pro smysluplný výsledek nesmí být překročeny.
3. Určit počáteční podmínky, tedy výchozí stav nástroje v klidu (např. struna bez výchylky).
4. Definovat vhodné rovnice, popisující impedanční vlivy pro různé části nástroje. Impedance různých částí hudebního nástroje určují směr šíření vlny a její amplitudu v daném bodě. Důležitým momentem je modelování rozhraní dvou různých prostředí, např. struny a kobyly pomocí činitelů odrazu.
5. Specifikovat filtrování způsobené vlivem tření a vytvořit model vyzařovacích charakteristik pro vysílání zvuku z nástroje.
6. Vytvořit algoritmus excitace nástroje jako soubor sil, působících na oscilátor (např. tření smyčce o strunu). V tomto algoritmu lze také definovat zpětnou vazbu mezi rezonátorem a zdrojem zvuku.

Výsledkem tohoto procesu je poněkud rozsáhlý soubor rovnic a parametrů, které popisují fyzikální model nástroje. Aby vznikl zvuk, je třeba aktivovat celý tento matematický vlnový algoritmus. Děje se tak tzv. iteračním postupem, kdy první řešení rovnic se získá odhadem parametrů a pak se postupně proces opakuje a zpřesňuje. Po určitém počtu opakování vydá vlnová rovnice jednoduchý vzorek představující hodnotu tlakové vlny v daném okamžiku. Tento pracný postup se pak musí opakovat pro každý vzorek zvlášť, což prakticky znamená zdlouhavé výpočty, nepoužitelné pro generování zvuku v reálném čase. V osmdesátých letech hledali vědci cesty ke zjednodušení klasického modelu, aby dosáhly praktičtějšího provedení. Tento výzkum sledoval v podstatě tři hlavní linie, se kterými se dále seznámíme.

3.5.4 Modální syntéza

Modální syntéza, kterou vyvinul Jean-Marie Adrien a jeho kolegové v IRCAM v Paříži, představuje značné zjednodušení soustavy elementárních závaží a pružin. Vibrující předmět lze totiž rozložit na určité množství základních částí, jako jsou např. kobylka a korpus houslí, vzdušné sloupce, ozvučné skřínky apod.

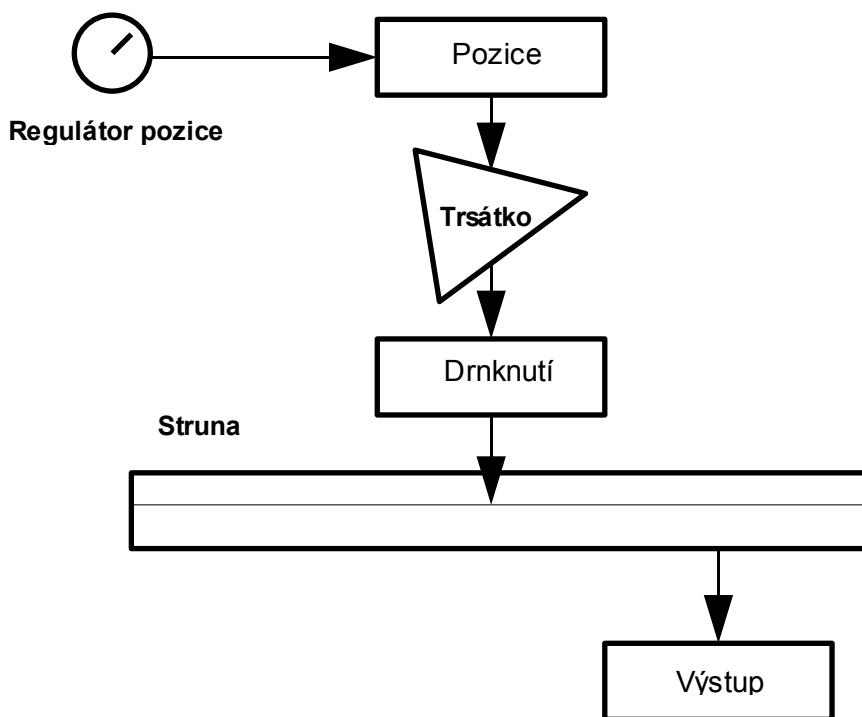
Když je nástroj rozezvučen, každá základní jednotka má soubor přirozených módů chvění, specifických pro jednotlivé struktury. Metodologie pro

analýzu módů vibrací je dobře známa z mnoha průmyslových aplikací a může být tak přizpůsobena pro použití ve zvukové syntéze.

Modální přístup má kromě zjednodušení v počítačové komplikovanosti výhodu flexibility celého modelu hudebního nástroje. Programátor může přidávat či ubírat základní jednotky, eventuelně vytvořit efekt syntézy měnící se v čase, jako je např. rozpínání nebo smršťování rozměrů nástroje.

Výsledkem práce Jean-Marie Adriena a Josepha Morrisona z IRCAM je modulární softwarový komplet pro modální syntézy, nazvaný **Mosaic**. Virtuální hudební nástroj lze na počítačovém monitoru složit ze základních částí, jako jsou struny, vzdušné sloupce, jazýčky a membrány, různé ozvučnice a korpusy, kladívka a trsátka apod.

Příklad modelu drnkacího strunného nástroje ukazuje obr. 3.13. Základními předměty jsou struna, trsátko a regulátor polohy. Interakce mezi předměty je nazývána spojení. Spojení si lze přestavit jako "černou skříňku" (v terminologii elektronických obvodů obecně dvojbran), která je mezi předměty a určuje vztah mezi nimi. Předměty mohou být spojeny např. klížením, třením smyčce o strunu, úhozem, zmáčknutím apod. Ke každému spojení lze přidat regulátory, které určují parametry řízení. V příkladu na obr. 3.13 je tímto parametrem pozice trsátka na struně.



Obr. 3.13 Model drnkacího nástroje, vytvořený v programu MOSAIC

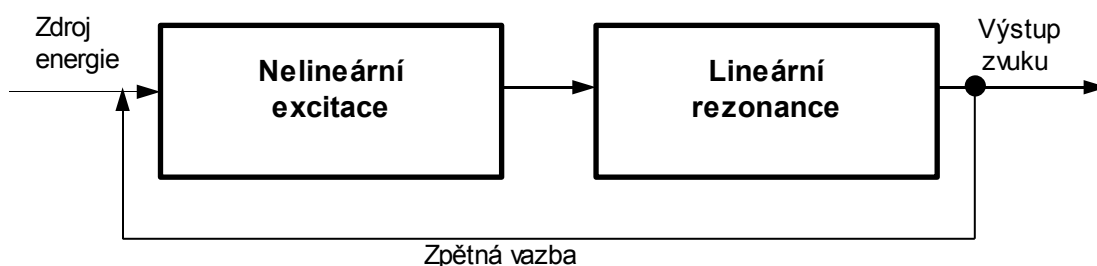
Konečné, fyzické umístění spojení na předmětu je nazýváno přístupem. Tento přístup je vlastně charakteristickým bodem styku dvou předmětů, kudy se přenáší energie v podobě vlny. Přístupovými body pro náš příklad jsou pozice, drnknutí a výstup (přes kobylku).

Systém MOSAIC je elegantní programovací model, avšak jeho dlouhý čas výpočtu ho odsunuje za hranici praktického využití, dokonce i na počítačových stanicích s vysokou pracovní rychlostí.

3.5.5 Syntéza McInthyre, Schumacher a Woodhouse

Model autorů McInthyre, Shumacher a Woodhouse (*MSW*) byl navržen v roce 1983. Jeho autoři byli výzkumnými pracovníky, kteří se spíše než o praktické problémy digitální syntézy zvuku zabývaly vývojem obecného modelu časové oblasti vytváření akustických tónů. Vědci se původně snažili zdůraznit důležitost rezonancí pro konkrétní barvu zvuku nástroje a jeho rozpoznání, ale později obrátili svou pozornost z frekvenční oblasti do časové. Zkoumali důležité detaily zejména v nasazení tónu, tzn. v krátkém časovém úseku na počátku rozeznění nástroje, které má nelineární charakter.

Model využitý v syntéze *MSW* má dvě hlavní části, jak to ukazuje obr. 3.14. Prvním důležitým blokem je nelineární excitátor a navazuje na něj druhá část modelu, lineární rezonátor. Princip nelineárního buzení lze vysvětlit na příkladu klarinetu. Jazýček (plátek) nástroje lze chápat jako vypínač, který přerušuje proud vzduchu z hráčových úst tím, že buď otvírá nebo zavírá cestu do vzdušné trubice. Tento proces rozkmitává vzdušný sloupec v trubici, přičemž skutečná výška tónu je dána její délkou. Ta se mění otevíráním či zavíráním klapky nástroje pomocí mechanických převodů. Převaha trubice nad jazýčkem je dána její hmotností, pevností a rozměry. V nástroji je tak uzavřena smyčka silné zpětné vazby, kdy trubice svými kmity "znásilňuje" kmitající plátek a vnucuje mu frekvenci a fázi svých kmitů.



Obr. 3.14 *MSW* model vzniku akustických kmitů

Jiným příkladem nelineárního buzení je smýkání strun pomocí smyčce. Interakci lze též vy-jádrnit jako přepínání, když se smyčec vlivem tření na krátký časový interval "zmocní" strunu, dokud se struna nesesmekne a nezachytí na jiném místě smyčce. Obdobně je tomu u fléten a píšťal varhan. Nelineární excitace je zde způsobena nahromaděním a prudkým uvolněním tlaku vzduchu ze štěrbin (úst píšťaly) a jeho nárazu na ret. Tento mechanismus opět rozkmitává sloupec vzduchu v píšťale.

Ve všech těchto případech lze chápat přepínací mechanismus jako generátor pulzních kmitů, jejichž časový průběh je filtrován pomocí lineární části - rezonátoru. Ačkoliv bylo vyvinuto funkční provedení *MSW* syntézy, modelovaný zvuk není absolutně realistický, zejména díky zjednodušení v oblasti excitace. Přínos této metody je tedy spíše teoretický. Pomohla však vysvětlit některé doposud nejasné detaily kolem vzniku tónů.

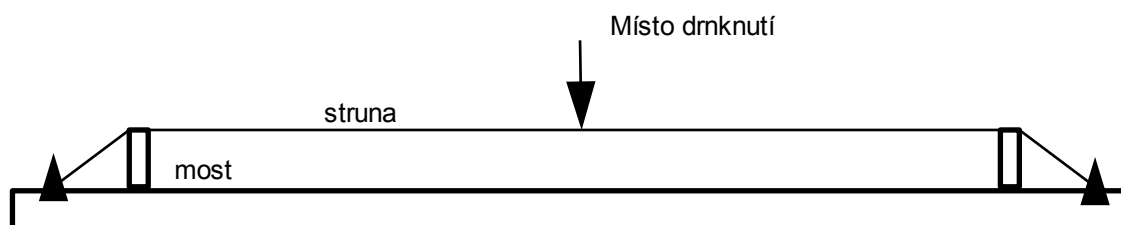
3.5.6 Syntéza vlnovodů

Teorie vlnovodů je velmi účinným způsobem, jak realizovat matematický model hudebního nástroje. Vlnovodový filtr lze popsat obdobně jako elektrický dvojbran pomocí matice rovnic a lze pro něj vytvořit počítačový model, odpovídající modelovanému médiu (trubice, struna). Modely vlnovodů byly dlouho užívány fyziky k popsání šíření vlny v rezonančních strukturách. Julius Smith a jeho kolegové ze Stanfordské univerzity byli první, kteří aplikovali tuto teorii na syntézu hudebních zvuků.

Základním stavebním prvkem syntézy vlnovodů je digitální zpožďovací linka. Vždy dvě zpožďovací linky pracují obousměrně, tzn. vlna, postupující na konec linky se zde odráží zpět a je schopna interferovat s původní vlnou. Podél modelovaného vlnovodu dochází k interferenčním jevům a vzniku stojatého vlnění. Zpožďovací linky vykazují díky konečné době, potřebné k jejím proběhnutí, rezonanční vlastnosti a existenci vlastních kmitů, obdobně jako např. skutečná struna. Složité rezonanční struktury lze modelovat pomocí sítě vlnovodů. Je-li síť symetrická ve všech směrech, je zvuk, který vytváří, harmonický. Jestliže změni vlnovod svůj tvar, velikost nebo protne jiný vlnovod, změni se i jeho rezonanční charakter a tím spektrum kmitů.

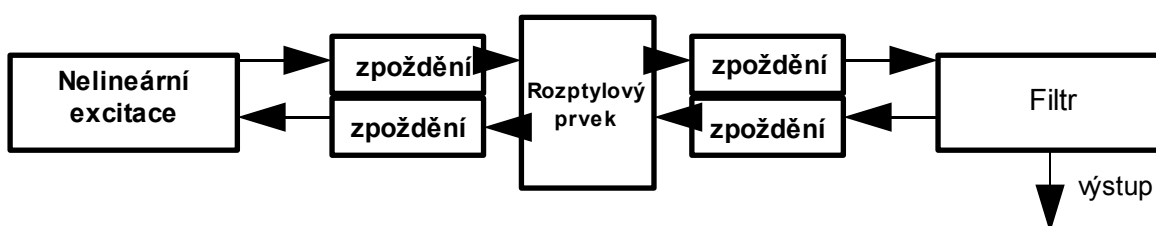
Nejjednodušší model vlnovodu je jednoduchá struna, neboli monochord. Model (viz. obr. 3.15) je ovšem použitelný i pro simulaci dechových nástrojů. Model popisuje co se stane, když se drnkne na strunu v určitém bodě: dvě

postupné vlny se šíří od místa rozruchu navzájem opačnými směry. Když dosáhnou míst, kde je struna opřena (tzv. mosty - u strunných nástrojů nultý pražec a kobylka), část jejich energie je absorbována a část odražena zpět do místa rozruchu a dál za něj. Proti sobě postupující vlny podél modelu struny (nebo vzdušné trubice) vzájemně interferují.



Obr. 3.15 Monochord jako základní model syntézy vlnovodů

Konkrétní řešení předchozí situace s použitím zpožďovacích linek ukazuje model na obr. 3.16. Tento model, navržený Perry Cookem, je schopný modelovat jak strunné, tak dechové nástroje. Vlna, vybuzená nelineární excitací, postupuje zpožďovací linkou, dokud nenarazí na rozptylový filtr styčných bodů, který předává část energie vlny dál a část odráží zpět. Styčný bod modeluje účinek prstu nebo smyčce, působícího na strunu. V případě modelu dechového nástroje je to model tónového otvoru. Filtr na konci modelové kaskády popisuje vliv kobylky a těla nástroje, případně roztrubu u dechových nástrojů. Modelování necylindrických zvukovodů je řešeno sérií sekcí o stejné délce, ale různých průřezů. Tak lze modelovat prakticky jakýkoli tvar vzdušného sloupce nebo vokálního traktu.



Obr. 3.16 Vlnovodový model strunného a dechového nástroje podle P. Cooka

Model vlnovodu klarinetu podle autorů Hirschmana, Cooka a Smithe je konkrétní aplikací předchozího. Model má 5 částí: jazýček (nelineární budič), horní část trubice (zpožďovací linky), otvor (rozptylový prvek), spodní část trubice (zpožďovací linky) a vyústění (filtr). V modelu je použit pouze jediný tónový otvor, protože délku horní a dolní části trubice lze měnit podle výšky tónu, která má být zahrána.

Problémem prakticky všech uvedených modelů, přesněji řečeno jejich konkrétních aplikací ve VA nástrojích Yamaha, je velké množství zvukových parametrů, které mají být ovládány pro přesvědčivé vyznění simulací. Pro vytvoření dokonalé iluze virtuozní hry by kromě dokonalého VA nástroje bylo zapotřebí navrhnout a zkonstruovat též model dokonalého hráče, obnoveným způsobem, jako je získáván model nástroje. Nabízí se možnost analýzy a resyntézy, tedy vývoj modelu hráče na základě analýzy hry virtuozů a zpětná syntéza formou odhadu parametrů a iterací. Jednou z dalších možných aplikací je modelování samoučícího se mluvčího či zpěváka. Všechny tyto pokusy jsou však zatím pro obrovskou výpočetní náročnost pouze předmětem výzkumů.

* * *

Poněkud obšírně jsme se zabývali modelujícími metodami zvukové syntézy. Důvodem je to, že obecně jsou modelující metody chápány již delší dobu jako neperspektivnější, přestože kromě uvedení VA nástrojů Yamaha a několika specializovaných počítačových programů se širšího uplatnění nedočkaly. Z hlediska tvorby nových, zatím nerealizovaných zvukových barev, se jedná o zajímavou a dobrodružnou oblast, která žije svým životem především v laboratořích výzkumných center a světových univerzit. Přestože se jedná zatím o minoritní metody z hlediska komerčního uplatnění, modelující metody syntéz, které simulují některé klasické nebo kombinované způsoby umělého generování, se stále více uplatňují i v dostupných nástrojích i programech pro všeobecné použití. Tím se stává z procesu umělého generování zvukového signálu živoucí organizmus, který nás v budoucnu možná ještě mnohým překvapí.

4. FYZIOLOGICKÉ A PSYCHOAKUSTICKÉ JEVY PŘI VJEMU UMĚLÉHO SIGNÁLU

Mezi základní objektivní parametry zvukových signálů patří průběh a velikost amplitudy, frekvence signálu jako celku a jeho spektrálních složek, ale také fáze. Podle **Ohmova akustického zákona** se však počáteční fáze spektrálních složek signálů nepodílí na celkovém sluchovém vjemu, protože lidské ucho fázi jakožto absolutní veličinu neregistruje. Slyšitelné jsou pouze změny fáze, což dokazuje např. efekt phaser (fázovací článek). Svoji roli parametr fáze (opět jako relativní poměr dvou různých hodnot) hraje při binaurálním zvukovém vjemu, při kterém je posluchač díky zdvojení sluchového orgánu a pohybu hlavy schopen odhadnout nejen směr, ale částečně i vzdálenost, odkud zvukový signál přichází. Důsledky Ohmova akustického zákona tak značně zjednodušují realizaci algoritmů jednotlivých metod syntézy i zpracování signálu. Fyziologický (na úrovni stavby sluchového orgánu) a psychoakustický (na úrovni zpracování nervovým systémem) aparát lidského sluchu, jakožto poslední článek řetězce v hudebním nebo obecně zvukovém sdělení, působí jako nelineární prvek a subjektivní vjem jedince tudíž neodpovídá přesně objektivním příčinám, kterými byl vyvolán. Jevy spojené s vnímáním zvukového signálu můžeme dělit na ty, které původní informaci ochuzují a působí tak jako **komprese** informace, a na ty, které původní informační tok naopak obohacují a působí jako **expanze** informace.

4.1 Ochuzující jevy

Vjem hlasitosti a výšky tónu závisí na velikosti amplitudy, resp. energie signálu a jeho frekvence (za předpokladu přítomnosti zakmitaného stavu), ale řídí se tzv. **Fechner-Weberovým** zákonem, který matematicky vyjadřuje psychoakustický vztah mezi subjektivním vjemem a podnětovou proměnnou (vlastností zvukového signálu). Ve vztahu k vjemu výšky tónu to znamená, že každé zvojnásobení frekvence vede k posunu vjemu o konstantní přírůstek, který je v souladu s hudební teorií nazýván oktávou. Podobně vjem hlasitosti je vnímán se stejným aditivním přírůstkem při vzrůstu podnětu (intenzity) signálu po násobcích. Pro přehlednější zobrazení frekvence a intenzity signálu se proto s výhodou používá logaritmická stupnice, která uvedenému subjektivnímu vjemu více vyhovuje. Praktickým důsledkem je např. využívání logaritmické stupnice např. na tlumičích (faderech) analogového nebo digitálního směřovacího stolu.

Přírůstek amplitudy o 6 dB (decibelů) v praxi znamená zvojnásobení amplitudy signálu, úbytek o 6 dB pak poloviční amplitudu.

Fechner-Weberův zákon však nesleduje subjektivní vjem hlasitosti přesně. Vjem hlasitosti je totiž proměnný a závisí na frekvenci. Zvuky stejné intenzity, ale rozdílných frekvencí, vyvolají rozdílný vjem hlasitosti. Naproti tomu lze nalézt takový poměr intenzit dvou zvuků, které způsobí stejný vjem hlasitosti. Průměrnou závislost vjemu hlasitosti zvuku ve vztahu k čistému referenčnímu tónu o frekvenci 1 kHz zobrazují tzv. **křivky stejné hlasitosti** (též zvané Fletcher-Munsenovy nebo Kingsburyho). Jejich průběh lze nalézt např. v lit. [9]. Hladinu hlasitosti lze matematicky vyjádřit takto:

$$L_N = L_{1000} = 20 \log \frac{p_{1000}}{p_0}$$

kde L_N je hladina hlasitosti posuzovaného zvuku ve fónech, L_{1000} je hladina hlasitosti (též hladina akustického tlaku) čistého srovnávacího tónu o frekvenci 1000 Hz v decibelech, p_{1000} je akustický tlak tohoto srovnávacího tónu v Pascalech a p_0 je referenční akustický tlak 20 μ Pa. Praktický důsledek křivek stejné hlasitosti spočívá mj. v omezeném vjemu okrajových pásem širokospektrálního zvukového signálu při nízkých intenzitách zvuku. Rozlišovací schopnost vjemu hlasitosti čistých tónů je největší v rozmezí frekvencí přibližně 500 Hz až 4 kHz, což je pásmo, ve kterém je také lidské ucho nejcitlivější z hlediska vnímaných frekvencí. Poslech reprodukováné hudby je co do rozsahu vnímaných frekvencí tedy závislý na intenzitě reprodukce. V praxi tento jev kompenzuje funkce **loudness** neboli fyziologický regulátor.

Další jevy vyplývají z aparátu sčítání vjemů dvou a více zvukových signálů současně. Jak již bylo řečeno, jsou-li jednotlivé harmonické složky komplexního tvarového průběhu rozmístěny na místech celočíselných násobků základního kmitočtu, je výsledný vjem společný všem složkám a přisuzujeme jim shodnou výšku tónu. Z tohoto principu vychází např. Fourierovská součtová syntéza. Všechny ostatní případy, tedy ty, kdy se současně znějící zvukové signály spektrálně nekryjí nebo nedoplňují, vedou k vjemu dvou oddělených zvukových struktur. Jejich sluchová separace však není jednoduchou záležitostí. Především je třeba brát v úvahu jev tzv. **maskování**. K tomu dochází, pokud se dva signály s blízkým základním kmitočtem sčítají ve výsledný sluchový vjem. Lidský sluch je v takovém případě schopen rozpoznat pouze hlasitější z nich, druhý je potlačen nebo dokonce zcela vymizí. Tento jev souvisí s činností vláskových buněk

vnitřního ucha, které své podráždění přenášejí v podobě elektrochemických impulzů k dalšímu zpracování centrální nervové soustavě. Oblast buněk, která vyvolá sluchový vjem, není po svém podráždění jedním tónem schopna přijmout podráždění od druhého z nich. Zvláštním případem je maskování čistého harmonického tónu bílým, tedy širokospektrálním šumem. Tehdy se na procesu maskování podílí pouze určité pásmo kmitočtů, které se nazývá kritická šířka pásma. Sluchový orgán s tímto rozdělením připomíná soustavu třetinooktávových filtrů a proto byly jednotlivým pásmům přiřazeny střední kmitočty. Praktickým důsledkem maskování je, že výsledný vjem hlasitosti součtu několika signálů s harmonickým průběhem (tzv. čistých tónů) neodpovídá prostému součtu dílčích hlasitostí každého z nich.

Důležité jsou také časové poměry při vjemu dvou tónů a uplatněním efektu maskování. K maskování totiž nedochází pouze při současném zaznění maskujícího a maskovaného signálu, ale již před zazněním maskujícího signálu (**pre-masking**) nebo také po doznění maskujícího signálu (**post-masking**) v případě maskování podstatně kratšího zvukového impulzu. Dochází zde k jevu prodloužení subjektivní délky maskovaného tónu.

Dále si všimneme také **časových prahů slyšení**. Mezním časovým prahem pro registraci změn zvukového signálu je hodnota přibližně 2 ms. Toho využívá např. lineárně aritmetická syntéza firmy Roland, kdy je výsledný zvukový rejstřík dán kombinací krátkého tranzientu na bázi zvukového vzorku a tělem (zakmitaným stavem) zvuku, který je generován tradičním rozdílovým principem syntézy. Ustálení vjemu hlasitosti pro krátké zvukové impulzy má pak svoji hranici přibližně na 100 ms délky znění. Rovněž pro vjem výšky tónu je zapotřebí určité minimální znění zvukového signálu. Průběh frekvenční závislosti tohoto prahu lze nalézt v lit. [9]. V oblasti středních frekvencí (cca 1 až 2 kHz) činí přibližně 10 ms. Hodnota meze sledování rychlosti změn je udávána na 20 ms a týká se např. modulovaných zvuků, kdy je možno pod tímto prahem ztratit vjem tónové povahy zvuku. Vjem opakovaných signálů, ať už totožného nebo rozdílného původu, je také závislý na časovém posunu. Pod cca 50 ms dochází ke splývání zvuků v jeden. Ke směšování, tj. oddělenému vjemu dvou signálů bez rozlišení jejich opožděného nástupu dochází v rozmezí 50 až 100 ms a nad 100 ms dochází již bezpečně k vjemu echa, tj. ozvěny. Se zpožděním jednoho signálu vůči druhému nebo také se zpožděním odrazů vůči přímému zvuku v reálných prostorách souvisí také **Haasův jev**. Ten způsobuje, že je lidský sluch zejména s

přihlédnutím k binaurálním jevům schopen bezpečně rozlišit vjem první vlny od zpožděných odrazů. Haasův jev tak pomáhá např. extrakci signálu, který je přítomen v akustickém prostředí plném pozdějších odrazů.

4.2 Obohacující jevy

Dalšími důležitými jevy, vyplývajícími především z psychoakustiky slyšení jsou jevy vzniku **rázů**, **aurálních tónů** apod. Jedná se v zásadě o jevy, které sluchový vjem obohacují o nové informace v psychoakustickém aparátu nervové soustavy člověka. Princip těchto jevů lze ukázat na společném vjemu dvou jednoduchých tónů, které postupně rozlaďujeme.

Tóny, které jsou zpočátku v přesném unisonu, tedy jejich základní frekvence jsou si rovny, se postupným rozlaďováním vzdalují a vzniklý vjem je provázen vznikem **rázů** (s frekvencí rovnou rozdílu frekvencí obou tónů). Přejížděnou oblastí mezi vjemem jednoho výsledného tónu, byť doprovázeným rázy a vjemem dvou oddělených tónů je tzv. oblast drsnosti tónu. Drsnost zmizí po dosažení hranice kritické šířky pásma (jejíž velikost je závislá na průměrné frekvenci obou tónů) a nastává oblast tzv. hladkosti, ve které jsou již oba tóny vnímány odděleně a jejich výšku lze posoudit na základě relativního intervalu.

Sluchová dráha je charakteristická nelinearitou přenosu zvukové informace. Ta se projevuje např. vznikem **rozdílových tónů**. Jako jeden z praktických důsledků uvedme např. „rekonstrukci“ nižších harmonických složek komplexního signálu na základě vjemu vyšších složek spektra. Tak lze např. vysvětlit vjem basové linky, které se díky omezenému frekvenčnímu rozsahu reprodukčního řetězce přesto stane slyšitelnou, ačkoli energie na nízkých frekvencích není vlivem konstrukce reprosoustavy přenesena.

V souvislosti se spoluzněním dvou a více tónů také připomeňme vjem **konsonance** a **disonance**. Konsonance, neboli libozvučnost, je dána v klasickém pojetí tzv. elegancí malých čísel. Jedná se o intervaly čisté primy (tzv. absolutní konsonance), čisté oktávy, kvarty a kvinty. Intervaly zhruba od poměru kmitočtů 5:4 výše představují buď dedokonalé konsonance nebo disonance (nelibozvučnosti).

4.3 Binaurální slyšení

Binaurální slyšení, které je dáno zdvojením sluchového orgánu (podobně jako u zraku), má za důsledek prostorovou orientaci v akustickém prostředí. Tím nejzákladnějším důsledkem je však jev binaurální sumace, tedy zvýšení vjemu hlasitosti, resp. snížení prahu slyšení. Tento jev je dán prostým zdvojením nervového podráždění ústrojí vnitřního ucha. Prostorová lokalizace zdroje zvuku nastává, dopadá-li zvuk na obě uši s rozdílnou intenzitou a časovým posunem (cca nad 2 ms). Tehdy dochází k první fázi lokalizace – tzv. **lateralizaci**. Při ní umísťujeme pomyslný zdroj zvuku na spojnici obou uší. K druhé fázi – tzv. **externalizaci** dojde při elementárním pohybu hlavy. Vzniklý vjem prostorového slyšení je tak porovnáván s vjemem při jiném postavení hlavy a dochází k odhadu vzdálenosti a směru, odkud zvuk přichází. Praktický důsledek: při poslechu na sluchátka nemůže dojít k fázi externalizace a tudíž není možno odhadnout směr, odkud zvuk přichází. Pouze lze umístit jednotlivé zdroje zvuku, umístěné např. při stereofonním mixu v různých pozicích stereobáze, na různá místa tzv. **mediální roviny**. K jevu externalizace může dojít buď v reálném akustickém prostředí nebo při poslechu více umělých zdrojů, např. většího počtu reprosoustav při **akusmatické prezentaci**.

5. TYPOLOGIE ZVUKOVÝCH OBJEKTŮ

Snahy o systematizaci uměle generovaných i konkrétních zvukových signálů EA hudby mají za sebou již poměrně dlouhou historii. Hlavní uznávané práce, zabývající se touto problematikou, se datují do 60. let 20. století. Připomeňme zde ideje Abrahama Molese, Pierra Bouleze, Karlheinz Stockhausena, Iannise Xenakise a zejména pak Pierra Schaeffera. Právě z lůna tzv. pařížské školy, jejímž hlavním představitelem je posledně jmenovaný, známe teorie hodnocení „zvukového objektu“ (l'objet sonore). Ze pařížských závěrů a naznačených směrů vycházela další řada pokusů o systematizaci zvukového materiálu ve více či méně obecných obrysech. Jedním z nich je poměrně ucelená řada úvah a studií Vladimíra Lébla, který se danou problematikou zabýval na přelomu let 60. a 70. na půdě Ústavu pro hudební vědu ČSAV v Praze. Jelikož považujeme dnes formulované závěry vědecké práce Vladimíra Lébla za klasické a pro další studium velmi přínosné, budeme se snažit v dalším textu o bližší seznámení a konfrontaci právě s Léblou teorií.

Je zřejmé, že instrumentář EA hudby je ve srovnání s tradičním nesrovnatelně rozsáhlý. Je to dáno tím, že instrumentář klasické hudby, tedy akustické nástroje, ustrnuly de facto ve svém vývoji zhruba v období romantické epochy a s ním i ideál symfonického orchestru. Je možno diskutovat, do jaké míry toto tvrzení opodstatněné, zejména všímáme-li si neustálého hledání nových materiálů pro výrobu hudebních nástrojů a nových technik hry na ně. Ideál kompletního instrumentáře EA hudby ve srovnání s hudbou „klasickou“ naopak není uzavřen a zdá se, že nebude nikdy dokonale poznán. O to více jsou snahy autorů muzikologických studií o systematizaci obecně zvukového materiálu přínosné. Umožňují nám alespoň zmapovat onu neuzavřenou (a teoreticky nekonečnou) množinu reálných i uměle generovaných zvuků pro účely hodnocení a třídění.

Vladimír Lébl užívá pro izolované i smíšené zvukové signály, které nás všude na světě obklopují, termín **zvuková událost**. Člověk, jakožto tvor rozumný, je schopen tyto zvukové události i bez znalosti nějakého systematizujícího aparátu alespoň v základních obrysech srovnávat a verbálně popisovat. Většinou se ale spokojí s tříděním do skupin na základě předchozích poslechových zkušeností a vytvořených modelů vnímání. Pro účely rozborů a výzkumu experimentální EA hudby v žádném případě s takovým popisem

nevystačíme. Zjišťujeme, že takovým vyjádřením nemůže být ani slovo (bez slovesných novotvarů nelze sdělovat univerzálně popis takových zvukových objektů), ani písmo (klasická notografie je vždy jen částečným zobrazením zvukové události). Jako uspokojivé zhotovení věrného „zvukového protokolu“ se jeví **zvukový záznam**. Záznamem zvukové události mizí její přirozená vlastnost a tou je neopakovatelnost. Díky moderní záznamové technice je takové opakované vyvolání zvukové události ve své původní a technicky téměř dokonalé kvalitě, bezproblémové a neomezené. Jelikož se ale vždy jedná o zvukový záznam (byť dokonalý) reálné události, která nemůže být nikdy ve své pomíjivosti stoprocentní kopií originálu, nazýváme takovýto otisk **zvukovým objektem**. Navíc nemusí být zvuková realita zaznamenána se snahou o dokonalý pocit iluze jejího znovuspuštění, ale ve tvůrčím pojetí EA hudby může být stylizována.

Předmětem zkoumání typologie EA zvukových objektů není ani rozpoznávání původu zvuků, tedy zvukových zdrojů, ani zkoumání samotného záznamu na úrovni technické. Zvukovým objektem rozumíme především to, co slyšíme. Snaha o subjektivizaci třídění se zdát být správná, ale musí být provedena co nejpodrobněji a nejobjektivněji. Základním klíčem pro třídění EA zvuků je tedy lidský sluch, resp. sluchový vjem.

Typologie se snaží roztrždit zvukové objekty do určitých tříd a to na základě sluchového vjemu. Dalším tříděním uvnitř dané třídy se zabývá morfologie, která zkoumá odlišnosti jednotlivých zv. objektů uvnitř jedné třídy. Hierarchicky nadřazeným pojmem zvukového objektu je tzv. **zvukový systém**. Klíčovým pojmem jeho hodnocení je velikost, která ovšem není totožná s časovou délkou jeho trvání, ale spíše počtem částí a vztahy mezi nimi. Léblova teorie zavádí 4 základní zvukové systémy, jejichž rozbor je uskutečňován na tzv. **zvukovém poli** (je to prostor daný souřadnicemi čas, výška a síla):

5.1 Jednoduchý objekt

a) nedělitelný

b) objekt, jehož rozdělením vzniknou dva objekty stejné typologické třídy

Zkoumání zvukových objektů z hlediska typologie probíhá na tzv. zvukovém poli. To je dáno třemi navzájem kolmými osami v třírozměrném prostoru čas – výška – síla. Zkoumáme, kolik místa zaujímá ten který reálný

zvuk v tomto prostoru především na osách výšky a času trvání. Minimum prostoru je možno přisoudit jednoduchému sinusovému impulsu, maximum pak čistě hypoteticky může být bílý šum s nekonečnou délkou trvání.

Každému zvukovému objektu přiřadíme dvě charakteristiky: charakteristiku jeho šíře a jeho způsobu trvání. V případě charakteristiky šíře dělíme dále na objekty tónového charakteru (malá šíře) a na objekty komplexního charakteru (velká šíře). Dělení z hlediska způsobu trvání má 3 typy: bodový, přetržitý a spojitý. Kombinací kritérií zvukové šíře a způsobu trvání získáváme 6 základních typologických tříd jednoduchého zvukového objektu:

	tónový	komplexní
bodový	a	A
přetržitý	b	B
spojitý	c	C

Přitom kritérium pro zařazení podle způsobu trvání se nekryje s prostou časovou délkou objektu, ale s dobou trvání jeho tzv. **energetické fáze**. U každého objektu totiž můžeme nalézt až tři fáze: fáze nástupní, fáze vlastního trvání (energetická) a fáze doznění. V terminologii fonetiky jsou to fáze **intenze** – **tenze** – **detenze**. V terminologii syntezátorů bychom mohli použít termíny attack – sustain – release. Zatímco hudební akustika počítá s existencí vždy všech tří fází, pro typologické hodnocení nás zajímá jen to, co je sluchem rozlišitelné. Tak např. příliš krátká intenze je vnímána již jako součást tenze atd. Z tohoto hlediska mohou tedy existovat pouhé čtyři sluchem rozeznatelné kombinace jednotlivých fází:

1. t
2. t d
3. i t
4. i t d

Je jasné, že např. zástupců třídy „c“, tedy objektů tónových a spojitých je celá řada. Odlišnosti mezi nimi nemůžeme, jak již bylo zmíněno, posuzovat z hlediska jejich původu, tedy na úrovni zvukového zdroje, ale bude třeba zjemnit dělení na typologické třídy podrobněji. Příkladem může být srovnání

čistého houslového tónu non vibrato a syntetického tónu, modulovaného frekvenčně generátorem pomalých kmitů (*LFO*) – vibrato. Je jasné, že oba objekty spadají do stejné třídy „c“, odlišuje je však různé chování v čase a různá struktura.

V případě zkoumání chování zv. objektů v čase definoval V. Lébl 4 možnosti časového vývoje některého ze základních parametrů zvukového prostoru (síla, výška, šíře a hustota):

1. **klidový stav**
2. **vzrůst**
3. **pokles**
4. **vývojová variabilita**

Z hlediska typologie se zaměřujeme pouze na základní vývojové tendence parametrů – jejich vzájemné srovnávání a další nuance zkoumá již morfologie.

V případě zkoumání struktury zv. objektu definuje V. Lébl obdobně:

1. **hladkou strukturu** – případ „absence struktury“ – čisté linie
2. **zrnitou strukturu** – různě silné „rastrování“
3. **svazkovou strukturu** – paralelní souznění více zvukových ploch stejného způsobu chování
4. **aglomerační strukturu** – velmi nepravidelná až nahodilá rozložení změn struktury různých složek zvuku. Za hranicí aglomerační struktury leží již oblast složených objektů

5.2. Složený objekt

Složený objekt je vlastně kombinací dvou a více jednoduchých objektů, a to buď simultálně – sousledně nebo sukcesivně – následně. Případně se může vyskytnout kombinace obou typů – objekt smíšený.

V. Lébl se zabýval podrobnou analýzou různých typů složených objektů, podobně jako v případě objektů jednoduchých. Podrobný popis je mimo rámec této práce. Připomenu snad jen důležitý fakt, že zkoumat složené objekty jako celek obsahující více elementárních části bez zkoumání vztahů mezi nimi by bylo

chybné. Často totiž jednotlivé „stavební kameny“ složeného objektu splývají. Říkáme, že leží za mezí sluchové rozlišitelnosti.

Z mnoha různých existujících typů složených objektů, zkoumáme-li je z hlediska jejich vývoje v čase uvedu alespoň objekt repetiční (absence jakéhokoliv vývoje) – vzniká opakováním částí. Opačným extrémem je objekt aleatorní – vývojová variabilita, nahodilost. Všechny ostatní typy leží kdesi mezi těmito dvěma extrémny.

Podle druhého kritéria, kterým je kritérium struktury, není již tak snadné dojít k uspokojivým závěrům. Prakticky vzato můžou nastat tyto dva případy kombinace struktur: k následnému výskytu dvou a více struktur a k mísení dvou a více struktur. Bez zavedení důležitého parametru, kterým je zvuková barva není možno podrovně takovou analýzu provést.

5.3 Jednoduchá grupa

Jednoduchou grupou nazýváme integraci dvou a více složených (nebo kombinací jednoduchých a složených) zvukových objektů.

5.4 Složená grupa

Obdobně složená grupa vzniká kombinací dvou a více jednoduchých grup (nebo grup a objektů obojího typu).

Zavedené zásady pro hodnocení zv. objektů lze patřičně rozšířit i na grupy. Je ale zřejmé, že čím bude celá struktura grup složitější, nevystačíme se základním dělením a na pomoc si budeme muset vzít další vědy hudební teorie – a těmi jsou nauka o tektonice a o hudebních formách. Alternativní možností analýzy např. EA skladeb je narozdíl od klasické metody tzv. dekompozice (postup od složitějších celků k jednodušším) metoda kompozice. Zkoumáním tzv. kompozičních modelů postupujeme v hierarchii jednotlivých složek stále výš a celá analytická práce je tak vlastně podrobnější a hlavně jednoznačnější.

Většina snah o typologii zvukových a dramaturgických prostředků v EAH vychází z analytického pohledu na zvuk, případně zvukový záznam. Pro systematizaci přístupu k obecnému zvukovému materiálu EA hudby však s analytickým pohledem nevystačíme. Uvedený přístup vyhovuje účelům rozboru skladeb, nikoli ve fázi jejich realizace. V následující kapitole se tedy pokusíme podtrhnout některé vybrané problémy z dramaturgie a realizace EAH.

6. VYBRANÉ JEVY DRAMATURGIE A INSTRUMENTACE EAH

V předchozích kapitolách jsme popsali instrumentář EAH a základní jevy související s vjemem umělého zvukového signálu. Také jsme ukázali jeden z možných analytických pohledů na systematizaci zvukového materiálu realizace EAH, bez ohledu na jeho původ a způsob zpracování. Při realizaci EAH však s tímto analytickým aparátem nevystačíme. Budeme se tedy snažit nalézt základní shrnující zásady, které by měly pokud možno obecnou platnost a opíraly se o získané poznatky z akustiky, hudební elektroniky, zvukové tvorby, hudební kompozice a jiných souvisejících disciplín. Připomeňme nejprve odlišnosti hudebního myšlení při pohledu na instrumentaci hudby akustické a elektroakustické.

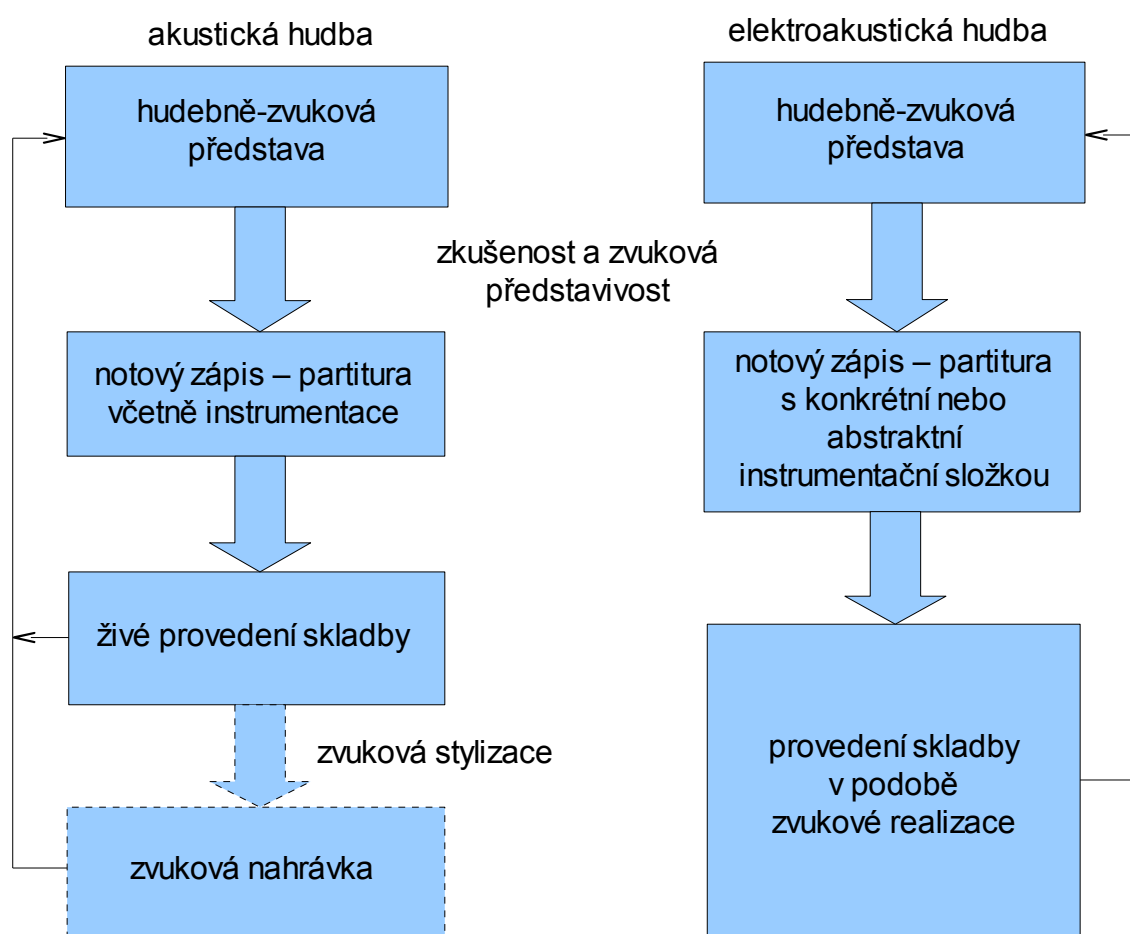
Při instrumentaci hudby pro akustické nástroje vycházíme z obecných poznatků i vlastní zkušenosti. Na počátku kompozice je zvuková představa, vycházející z prognózy „živého“ koncertního provedení nebo účelovosti spojené se zvukovým záznamem. Základním předpokladem je však existence živého provedení hudby. Za hudební představou autora je současně též odhad zvukové podoby díla, více či méně se blížící finálnímu provedení. Fenomén záznamu zvuku přináší do procesu kompozice moment uchování informace k pozdějšímu studiu nebo jejímu dalšímu užití např. ve filmu či scénických formách. Jelikož se hudební myšlení neustále vyvíjí, vyvíjí se také nároky na instrumentační využití prostředků, které se při kompozici využívají. Příkladem mohou být multifonní techniky hry na klarinet.

Instrumentace hudby s využitím hudební elektroniky je dána především žánrovým zaměřením kompozice. K instrumentáři EA hudby lze přistupovat tradičním způsobem např. v oblasti populární hudby. Uměle generované a zpracované zvuky zde vystupují jako substituční prvek klasického instrumentáře. Roli umělého zvuku lze rozdělit na následující případy:

1. nástroje akustického typu jsou obohaceny zvukovým účinkem instrumentáře EAH. Klasický instrumentář akustických nástrojů, který je v obecně dostatečném povědomí, rozšíříme o nové prvky, např. automatickou bicí linku nebo syntetické efektové zvuky.

2. nástroje akustického typu jsou zcela nahrazeny syntezátory a jinými přístroji hudební elektroniky. Vytváří se iluze znění orchestru pomocí umělých zvuků, které zde vystupují v obdobných funkčních rolích, jako nástroje akustické. Elektronicky generovaným zvukům přisuzujeme kromě funkce v aranžmá skladby (např. basová linka, bicí part, sólový hlas apod.) také atributy, vázané ke konkrétním zvukovým parametrům (modulované, filtrované, zkreslené atd.). Kromě objektivně imitativních úloh zvukové syntézy přichází ke slovu také subjektivně imitativní role. V úvahu je třeba také brát pravidla hudebního žánru (např. využití konkrétních typů nástrojů a zvukových rejstříků), módnosti, společenských konvencí atd.

Autonomní existenci EAH lze chápat jako na jedné straně bezbřehou možnost hudebního sdělení libovolné formy, na druhé straně jako informaci silně omezenou konkrétní zvukovou podobou. Schématicky lze srovnat hudbu akustickou a elektroakustickou takto:



Obr. 6.1 Porovnání realizace tradiční akustické a elektroakustické hudby

Na počátku života skladby pro akustické nástroje je kromě samotné kompoziční práce představa o zvukové podobě díla. Tu autor naplňuje v instrumentaci, tj. přiřazení konkrétní zvukové představy jednotlivých funkčních složek kompozice konkrétním hudebním nástrojům a jejich kombinacím. Vytvořením notového zápisu skladby končí první a nejdůležitější fáze uměleckého záměru skladatele. Podmínkou života skladby je ale její živé provedení, které formuje zpětně autorovu zvukovou představu o dané kompozici. K uchování zvukové podoby díla nebo k jejímu dalšímu životu – např. v médiích – slouží zvuková nahrávka. Ta je výsledkem zvukové stylizace skladby. Do řetězce vstupuje další tvůrčí osobnost a tou je zvukový mistr (zvukový režisér). Zvuková nahrávka není a ani nemůže být věrnou kopií živého provedení. Jedná se vždy o stylizační ztvárnění zvukové podoby díla s ohledem na psychofyziologii a estetiku vnímání. V kontextu celého řetězce je však zvuková realizace zástupným procesem živého provedení, v závislosti na konkrétní zkušenosti posluchače a jeho zpětné zvukové představivosti. Také pro autora je výsledná zvuková nahrávka uchováním živého provedení v zástupné formě, event. v nové živé formě existence u užití hudby.

Naproti tomu hudba elektroakustická je uváděna v život pouze a výhradně pomocí zvukového záznamu a jeho reprodukce v daných poslechových podmínkách. Modely srovnávání a posuzování zvukového materiálu EAH však nemusí být obecně známé (např. ve srovnání s tradičními nástrojovými obsazeními). Naopak ve smyslu původnosti je snaha vžité modely a konvence překonávat. Zvukový materiál EAH má přesto svůj asociační účinek. Tak jako v realizaci tradiční akustické hudby jde o sdělení, které však nemusí být čistě hudební, ale spíše obecně-zvukové. Při vytváření notového zápisu EA skladby tak nemusí docházet k jednoznačnému vyjádření zvukového záměru. Zaprvé proto, že to techniky zápisu hudby v grafické podobě nemusí jednoznačně umožnit, zadruhé proto, že se konkrétní zvuková představa může formovat až ve fázi realizace. EAH přináší oproti tradičnímu využití akustických nástrojů nové, takřka neomezené možnosti, jejichž funkční přínos vyplývá teprve z daného kontextu a nemusí být zvukově autonomní.

Jelikož je život EA kompozice vázán na zvukové provedení (ať už při live provedení nebo zpětném poslechu nahrávky), proces stylizace jakoby odpadá, resp. lze její účinek zahrnout do samotné kompozičně-realizační roviny. Výjimku tvoří ale skladby, které se svým zápisem snaží o přenositelnost účinku zvukově-

dramaturgických prvků. V takovém případě je však zapotřebí definovat jednoznačný způsob uchování informace o původu zvuků, jejich formování v procesu zpracování a reprodukci. Podrobným technologickým popisem, dokonce doplněným např. zvukovými soubory pro přípravu zvukové stopy a specifikací nastavení konkrétních přístrojů, lze EA kompozici uchovávat, opakovaně na různých místech provádět a případně modifikovat např. ve vztahu ke konkrétnímu poslechovému prostoru. Takovému vyhotovení říkáme **realizační partitura**.

Shrňme tedy základní odlišnosti tradiční tvorby a realizace EAH: u akustické tvorby vybíráme konkrétní hudební nástroj nebo uskupení hudebních nástrojů při snaze o co nejpřesnější naplnění zvukové představy. Limity, dané např. hráčovými možnostmi, zákony hudební akustiky toho kterého hudebního nástroje atd., je třeba ctít a umět využívat. Bez důkladné znalosti instrumentáře se v klasické instrumentaci neobejdeme. U EAH máme k dispozici široký, téměř neomezený instrumentář prostředků generování a zpracování umělého zvuku, většinou bez přímé vazby na konkrétní nástroje. Jde nám o naplnění zvukové představy, ke které teprve hledáme možné formy vyjádření. Omezujícím faktorem jsou prostředky, které máme k dispozici, případně naše vlastní schopnosti a znalosti. Tvůrčí svoboda v kompoziční i realizační rovině zdá se být tedy téměř neomezená, přesto je zapotřebí ctít řád, formu a podstatu obecného i uměleckého sdělení. V čistě technologické (realizační) rovině se umělecký záměr zužuje na kapacitu informačního (elektroakustického) řetězce. Jelikož je zapotřebí právě v této oblasti dodržovat určitá pravidla, podívejme se blíže na omezující faktory realizace EAH.

6.1 Omezení realizace EAH zvukovým záznamem

Jelikož je existence EAH převážně dána vazbou na konkrétní záznamové médium, je zapotřebí ctít nezbytné technologické předpoklady. Zvukový záznam vystupuje jednak při realizaci (výrobě) konkrétní podoby EA kompozice, zadruhé při jejím provedení – např. veřejné reprodukci. Dodržení technologických pravidel záznamu při realizaci je nezbytné především z hlediska **odstupu signál-šum**. Možnosti zvukového záznamu jsou limitovány **dynamickým** a **frekvenčním rozsahem**. Je stále třeba mít na paměti, že konečným příjemcem zvukové informace bude lidský sluchový aparát. S přihlédnutím k jevům, které jsme popsali v kap. 4, lze tak proces zpracování signálu zjednodušit. S dynamickou rovinou záznamu signálu souvisí modulace (vybuzení). Je zapotřebí např. při

záznamu přirozených zvukových signálů zajistit dostatečnou modulaci pro dosažení co největšího odstupů signál-šum, ale také bez **zkreslení záznamu** přemodulováním. Dále je nutno mít také na paměti šum, resp. sečítání šumových příspěvků při směšování většího počtu zvuků. Dalším omezujícím a rušivým faktorem záznamu je **kvantizační zkreslení** digitalizace zvukové informace, které se projeví např. při extrémním zesílení slabých, podmodulovaných zvuků.

S modulací a dynamickým vývojem skladby souvisí také uvažovaná **intenzita reprodukce**. Pro srovnání využijeme opět přirozené zdroje signálu. Jelikož známe přirozenou, živou formu existence zvuku např. akustických nástrojů, dokážeme při poslechu zvukové nahrávky nastavit intenzitu reprodukce v souladu s uloženými zkušenostmi a modely. U EA hudby takové modely buď částečně nebo zcela chybí a potenciálnímu posluchači je zapotřebí kromě event. výkladu uměleckého záměru dát návod pro poslech, doplněný např. **poslechovou partiturou**, která je grafickým vyjádřením vývoje struktury skladby a dává jasný přehled o složkách kompozice a její formě.

Zejména při koncertní reprodukci ke slovu přichází obecný problém **kalibrace elektroakustického řetězce**. Při poslechu reprodukované EA hudby je zapotřebí stanovit určitý dynamický rozsah vnímání, limitovaný zdola ruchovým pozadím poslechového prostředí a zhora buď technologickým omezením (např. zatížitelností použitých reprosoustav) nebo biologickým omezením (dosažení prahu bolesti slyšení). Je zapotřebí také rozlišit, má-li zvuková realizace EA hudby být reprodukována na sluchátka nebo pomocí reprosoustav. Posluchače lze např. snadno zmást dlouhým tichým tónem a následným extrémním vybuzením dynamického rozsahu. Jelikož modely a zkušenosti v takových případech chybí, může se stát, že kromě nenaplnění uměleckého účinku skladby dojde v lepším případě k poškození elektroakustického řetězce, v horším případě sluchového orgánu posluchače. Pro uvažovanou distribuci EA kompozice pomocí médií, prodejních nosičů apod. je účelné využít dobře propracované metody zvukového masteringu, jak jsou popsány v příloze 2.

K nenaplnění požadovaného účinku sdělení však nemusí docházet zmíněnými drastickými způsoby. Je třeba také přihlídnout např. k omezenému frekvenčnímu rozsahu lidského sluchu zejména při nízkých intenzitách reprodukce (viz. Kingsburyho křivky stejné hlasitosti). Vynaložené úsilí při

realizaci vychází v takovém případě jako neefektivní a navíc může vzbudit rozpaky posluchačů.

6.2 Prvky a formy realizace EAH

Realizace EAH vychází z co možná nejdůslednějšího naplnění kompozičního záměru. Samotná hudebně-zvuková představa o struktuře skladby je dána potřebou obecného nebo uměleckého **sdělení** – například příběhu. V každé fázi takového sdělení se výrazně uplatňuje **asociační účinek** EA zvukového materiálu. V mikrostruktuře i makrostruktuře EA nacházíme paralely s reálným světem, s modely dané poslechem hudebních děl i bezděčným vstřebáváním zvukové informace okolo nás v každodenním životě.

Formování a opravy realizačních postupů v průběhu zrodu EA kompozice jsou zcela běžným jevem. Skladatel-realizátor tak získává postupně další zkušenosti s jevy souvisejícími s elektronickým zvukem pro další kompozice i kompozici právě realizovanou. Jistým nebezpečím je však prvek nahodilosti v kompozici i realizaci EAH. Postihnout a především predikovat všechny závěry a zvukové výsledky v procesu realizace EAH je samozřejmě nemožné, nicméně nerespektování zásad akustiky slyšení, elektroakustiky, vlastností zvukového záznamu atd. vede k čistě náhodnému řešení typu „pokus-omyl“. Určitým nebezpečím může být také fascinace vnější zvukovou formou jednotlivých umělých signálů (např. u méně známých zvuků) na úkor obsahu sdělení a umělecké povahy díla.

Prvky realizace EA kompozice lze rozčlenit na dvě odlišné roviny – vertikální a horizontální.

6.2.1 Vertikální struktura EA kompozice

Pod pojmem vertikální struktury EA skladby rozumíme především organizaci jednotlivých vrstev a pásem hudebně-zvukového sdělení. Takovému členění odpovídá např. frekvenční stupnice, která determinuje jednak pojem změn **notových výšek** (jsou-li přítomny zvuky tónové povahy) jednotlivých pásem (hlasů) v harmonické rovině, ale také vývoje spektrálního složení i jiných parametrů zvukových signálů. V subjektivní rovině vnímáme jednotlivé vrstvy odděleně např. díky odlišnému vjemu barvy, ale také rozdílnému vývoji časových změn signálu. Role jednotlivých vrstev vertikální struktury nejsou rovnocenné. Rozdělení úloh může být buď **statické** (např. trvalé rozlišení mezi hlavním a

vedlejším zvukovým pásmem – paralela např. s doprovázenou monodií) nebo **dynamické** (významy a účinky jednotlivých pásem se proměňují a dopňují – paralela s polyfonními kompozičními technikami). Výstavba vertikální struktury skladby souvisí s pojmem **mixáže**. Krajním příkladem tzv. prázdné vertikální struktury je **jednoduchý sinusový tón** s neměnnou frekvencí, dynamikou a trvajícím dlouhou dobu. Ticho jako speciální případ prázdné struktury neuvažujeme, je-li uvažováno jako samo o sobě. Opačným extrémem vertikální struktury je např. **zvukový klastr**, jehož jednotlivé složky se v čase proměňují.

Při realizaci vertikální struktury EA díla si všímáme jak **součtových jevů** (vyplývajících z principu prostého směřování signálů), tak jevů **rozdílových**, daných vzájemným odčítáním jednotlivých frekvenčních složek struktury samovolně nebo uměle (např. filtrací). Je třeba důsledně rozlišovat, zda jsou tyto jevy chtěné či nechtěné. Mnoho jevů obohacování zvukové informace vzniká samovolně např. v důsledku nelinearity elektroakustického řetězce nebo sluchové dráhy.

6.2.2 Horizontální struktura EA kompozice

Horizontální členění a vývoj zvukových událostí v čase se týká buď jednotlivých složek vertikální struktury nebo všech složek vertikální struktury kompozice. Pojmy související s realizací horizontální struktury EAH jsou např. **střih zvukové informace, tvorba uzavřených smyček, časování (timing) zvukových událostí**, změna smyslu přehrávání zaznamenaných signálů apod. Obecně je možno shrnout tyto operace do výrazu **zvuková montáž**. V menším časovém rozlišení (např. na úrovni členění a řazení jednotlivých zvukových objektů) se pohybujeme v oblasti horizontální **mikrostruktury**, v delším časovém pojetí hovoříme o horizontální **makrostruktuře** nebo též **formě**.

V souvislosti s horizontálním členěním jednotlivých pásem i celé vertikály EA kompozice využíváme prvky cíleného opakování jednotlivých složek kompozice. Do hry vstupuje pojem **minimalismu**. V souvislosti s tímto principem uveďme následující úvahu: **mez únosnosti** počtu identických opakování jednoduchého motivu (např. melodického nebo rytmického) závisí kromě samotné povahy zvukové informace též na účelu a žánrovém zaměření elektronické skladby. Tak například oblast elektronické taneční hudby využívá hudební a zvukový minimalismus jako základní skladebný princip. Člověk jakožto tvor omylný není schopen vícenásobného opakování motivu v nezměněných kvalitách např. při živé hře na hudební nástroj. V průběhu i sebevíc

soustředěného výkonu lze nalézt drobné odchylky od regularity a strojovosti. Naproti tomu stroje (sequencer, počítač) jsou schopny takřka neomezeného opakování. Člověk nachází v takovémto strojovém principu **fascinaci technikou** a hudba samotná prožívá fázi **odlidštění**. Ve formách taneční hudby (house, techno, trance) dochází k případným změnám v dlouhých časových intervalech, ale zkoumaná mikrostruktura zůstává prakticky neměnná. Dlouhým časovým působením minimalistického opakování smyček, figur, patternů, sekvencí apod. lze přivodit stavy extáze, neboli vytržení z reality. Moderními prostředky lze vyvolat obdobné pocity, jako zažívali kmenové civilizace např. při celé hodiny trvajících šamanských rituálech tance a obětování apod.

V realizaci autonomní EA hudby je tedy třeba dbát na dodržení určité meze únosnosti počtu opakování. Je také třeba brát v potaz mez rozlišení časových změn (viz. kap. 4) lidským sluchem. Na první poslech identická opakování se mohou teprve v delším časovém pojetí projevit postupnou změnou některého parametru zvukového signálu. Vnímání neopodstatněného repetitivního opakování může při nedodržení meze únosnosti vést k nesoustředěnému poslechu a prázdnotě uměleckého sdělení. Vysvětlení uměleckého záměru může celou situaci sice vysvětlit, prvotnímu působení na naše smyslové, rozumové a citové vnímání to však zřejmě již nepomůže.

Stejně tak je zapotřebí dbát na dodržení určité meze rozličnosti vnitřního členění EA kompozice. Na první poslech nahodilý sled shluků zvukových objektů, bez přítomnosti vnitřního řádu a vývoje sdělení může taktéž působit rozpačitě a bez citelné formální výstavby.

Uvedené členění struktury realizace EA kompozice je vhodné pro studium problematiky, nicméně pro komplexní obsáhnutí všech souvisejících jevů a postupů je třeba uvažovat v kombinované, tedy vertikálně-horizontální rovině. V souvislosti s uvažováním např. vztahu dvou zvukových signálů vůči sobě hovoříme o vztahu **souřadném** (dva zvuky zaznívají současně) nebo **sousledném** (dva zvuky zaznívají ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech).

V souvislosti s platnými zásadami realizace EA hudby v uvažované vertikální struktuře uvedme ještě princip **kontrastu** a **jednoty**. Materiál EA hudby nám poskytuje rozličné podoby zvukového signálu, které v závislosti na kompozičním záměru klademe buď do záměrného rozporu nebo naopak symbolické jednotě a „smíření“.

ZÁVĚR

Byl proveden přehled vývoje hudební elektroniky, metod zvukové syntézy a ostatních zvukově-dramaturgických prostředků elektroakustické hudby. Je nutno podotknout, že oblast autonomní EAH je z obchodního hlediska pro většinu výrobců okrajovou a tudíž nezajímavou oblastí uplatnění technologických prostředků. Instrumentář, který v EAH k její realizaci využíváme, je z velké části shodný s tím, který je používán pro potřeby tvorby populární, užití a filmové hudby. Realizátor, který jde po podstatě zvukového signálu za hranice továrních předvoleb, se s povrchním používáním hudební elektroniky nespokojí. Nicméně je vyráběno obrovské množství různých fyzických i softwarovým podob všech druhů syntézy a zpracování zvukového signálu, takže tvůrčí vyjadřovací možnosti soudobých skladatelů jsou takřka neomezené. I v záplavě tak obřího množství techniky je třeba mít ale na paměti, že konečným příjemcem bude lidský sluch a myšlení posluchače, opírající se o uložené modely estetického, společenského, hudebního a psychologického rázu. V proudu přetechnizovaného životního prostředí a stylu nemají tvůrci EAH v žádném případě snadnou pozici. Určitý podíl nedůvěry je v této oblasti u publika poměrně častým jevem a tak je třeba volit formu a obsah sdělení v EA kompozici citlivě.

Bez znalosti konkrétních typů metod syntézy, základů akustiky a elektroakustiky a v neposlední řadě jevů percepce zvukového signálu lidským sluchem se realizátor EA hudby neobejde. Pokud přispěje tato disertační práce k utřídění a zlepšení orientace v problematice a dalším diskusím na téma dramaturgie EA kompozice, pak je její smysl naplněn. Tato práce by měla vyvolat nové otázky v pohledu na problematiku EA kompozice a realizace jakožto tvůrčího procesu s oporou v racionálním poznání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Publikace:

- [1] BLÁHA, I. *Zvuková dramaturgie audiovizuálního díla*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství AMU, 2004. 145 s. ISBN 80-7331-010-4.
- [2] LÉBL, V. *Elektronická hudba*. 1. vyd. Praha: Státní hudební vydavatelství, 1966. 104 s.
- [3] OWSINSKI, B. *Mixing Engineer's Handbook*. 1. vyd. Vallejo: Mix Books-Intertec Publishing Corporation, 1999. 270 s. ISBN 0-87288-741-3.
- [4] PRESSING, J.: *Synthesizer Performance and Real-Time Techniques*. 1. vyd. Madison: A-R Editions, Inc., 1992. 462 s. ISBN 0-89579-257-5.
- [5] RUSS, M. *Sound Synthesis and Sampling*. 2. vyd. Oxford: Focal Press, An imprint of Elsevier, 2004. 473 s. ISBN 0-240-51692-3.
- [6] SCHAEFFER, P. *Konkrétní hudba*. 1. vyd. Praha: Editio Supraphon, 1971. 80 s.
- [7] SCHIMMEL, J. *Syntéza zvukových efektů s využitím nelineárního zpracování signálů*. (Disertační práce) Brno: FEKT VUT, 2006. 185 s.
- [8] SCHMITZ, R. *Analog Synthesis*. 1. vyd. Cologne: Wizoo Publishing, 1999. 134 s. ISBN 3-927954-37-3.
- [9] SYROVÝ, V. *Hudební akustika*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství AMU, 2003. 427 s. ISBN 80-7331-901-2.
- [10] SYROVÝ, V. *Technické základy elektroakustické hudby*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 1984. 119 s.
- [11] SYROVÝ, V. *Malý slovník základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství AMU, 2001. 68 s. ISBN 80-85883-80-5.
- [12] URBAN, O. *MIDI převodník pro ovládání analogových napětově řízených syntezátorů*. (Diplomová práce) Praha: FEL ČVUT, 1998. 84 s.
- [13] URBAN, O. *Virtuální zvuková syntéza*. (Diplomová práce) Praha: HAMU, 2000. 46 s.

Odborné články a příspěvky:

- [14] LÉBL, V. Nástin typologie zvukového materiálu. *Hudební věda*, 1969, č. 3, s. 260 – 280.
- [15] LÉBL, V. Příspěvek k morfologii zvukové struktury. *Hudební věda*, 1971, č. 1, s. 3 – 18.
- [16] URBAN, O. Co je to zvukový mastering? *Proceedings of the 8th International Colloquium „ACOUSTICS 04“*, Zvolen, 2004, s. 65 – 71. ISBN 80-228-1359-1.
- [17] URBAN, O. Mastering jako finální tvůrčí proces při výrobě hudební nahrávky a jeho optimalizace. *Proceedings of the 5th Conference of Czech Student AES*, VUT Brno, 2004, s. 90 – 99. ISBN 80-214-2643-8.
- [18] URBAN, O. Short Overview of Methods of Sound Synthesis. *Proceedings of 32nd International Acoustical Conference, European Acoustics Association (EAA) Symposium „Acoustics Banská Štiavnica 2002“*, 2002, s. 237 – 240. ISBN 80-228-1159-9.
- [19] URBAN, O. Součtová a rozdílová syntéza – teorie, praxe a porovnání. *Proceedings of the 7th International Colloquium „Acoustics 03“*, Zvolen, 2003, s. 51 – 54. ISBN 80-228-1247-1.

Internetové odkazy:

- [20] ccrma.stanford.edu
- [21] elforo.de
- [22] www.dtmb.de
- [23] www.ishibashi.co.jp
- [24] www.moogce.com
- [25] www.organfax.co.uk
- [26] www.synthmuseum.com
- [27] www.vintagesynthesizer.com

Příloha 1 – SEZNAM UKÁZEK NA PŘILOŽENÉM CD

- Tr1** součtová syntéza – statická (simulace varhan Hammond B-3)
- Tr2** součtová syntéza – statická (virtuální syntezátor ImpOSCar)
- Tr3** součtová syntéza – dynamická (syntezátor Kawai K-5000)
- Tr4** rozdílová syntéza – pilový průběh *VCO* + filtrace *LPF*, *BPF*, *HPF*
- Tr5** rozdílová syntéza – pulzní průběh *VCO* + filtrace *LPF*, *BPF*, *HPF*
- Tr6** rozdílová syntéza – kombinovaný rejstřík se dvěma *VCO*
- Tr7** rozdílová syntéza – minimalistická sekvence s přeladováním *LPF*
- Tr8** *FM* syntéza – konfigurace modulátor-nosič s poměry frekvencí
1:1, 2:1, 3:1 a 2.5:1
- Tr9** *FM* syntéza – konfigurace nosič-nosič s poměry frekvencí
2:1, 3:1, 2.5:1
- Tr10** *FM* syntéza – ukázka algoritmu 1 (Yamaha DX-7)
- Tr11** *FM* syntéza – ukázka algoritmu 12 (Yamaha DX-7)
- Tr12 – Tr14** Sampling - různé zvukové barvy (Native Instruments Kontakt 2)
- Tr15 – Tr17** *VA* syntéza Yamaha (VL-1m) – různé zvukové barvy

Příloha 2 – ZVUKOVÝ MASTERING

Co je to vlastně mastering? Za mastering hudební (nebo obecně zvukové) nahrávky považujeme poslední tvůrčí krok při její výrobě. Je to vlastně článek řetězu mezi mixáží a výrobou masteru pro duplikaci. Také můžeme říci, že mastering je poslední šancí, jak vylepšit zvukovou a technickou kvalitu nahrávky. Paradoxně je však mastering článkem v celém řetězci nejslabším. Vysvětlení: jde-li nám o to, aby nahrávka „dobře hrála“ a to pokud možno na všech dostupných reprodukčních zařízeních, pouštíme se v podstatě na tenký led. Zprvė nahrávku, která by byla uspokojivě reprodukovatelná při většině možných poslechových podmínek, nelze nikdy stoprocentně vytvořit. Mastering je uměním kompromisů. Zadruhé, přeceňovat úlohu masteringu může být krátkozraké – masteringu předchází mixáž, při které se vytváří definitivní podoba zvukového obrazu. Představa, že špatný mix vylepšíme kvalitním masteringem, je zcestná. Nejen, že špatné proporce mixu (poměry mezi jednotlivými nástroji), barevné podání a celkový prostorový obraz těžko vylepšíme i tím nejdokonalejším masteringovým postupem, mnohé nedostatky nahrávky mohou naopak vyniknout a upozornit na sebe v mnohem konkrétnějších obrysech.

O co nám tedy jde při masteringu? O finální podobě nahrávky se v žargonu zvukových mistrů často hovoří jako o „produkčním“ či „našlapaném“ zvuku. Je ovšem potřeba uchopit aparát zvukového masteringu citlivě. Považujeme-li za ideál zvukového snímku v oblasti populární hudby signály, linoucí se z rozhlasových stanic, zejména komerčních, je lépe se masteringu nevěnovat a svěřit tento náročný proces výroby nahrávky odborníkům. Komerčním rozhlasovým stanicím jde především o co největší sledovanost. Tu lze kromě samotné náplně vysílaných relací dosáhnout i co nejvyšším využitím přiděleného vysílacího výkonu FM vysílače z důvodů největšího plošného dosahu stanice. Vpodstatě zmizí ze signálu veškerá dynamika a signál „jede“ ve své plné amplitudě nepřetržitě bez ohledu na to, vysíláme-li subtilní hudební pasáže, mluvené slovo či plné nástrojové forte. Šikovně zvoleným masteringovým postupem ale lze přesto „ošetřit“ zvukovou nahrávku tak, aby byla imunní proti negativním projevům zpracování dynamiky signálu ve vysílacích procesorech (dýchání šumu, tzv. pumpování atd. – viz. dále), ale i při ostatních reprodukčních podmínkách. Někdy se používá pro takto „očkovanou“ nahrávku z angličtiny převzatý termín „radio-ready sound“, tedy zvuk připraven k vysílání. Takovému

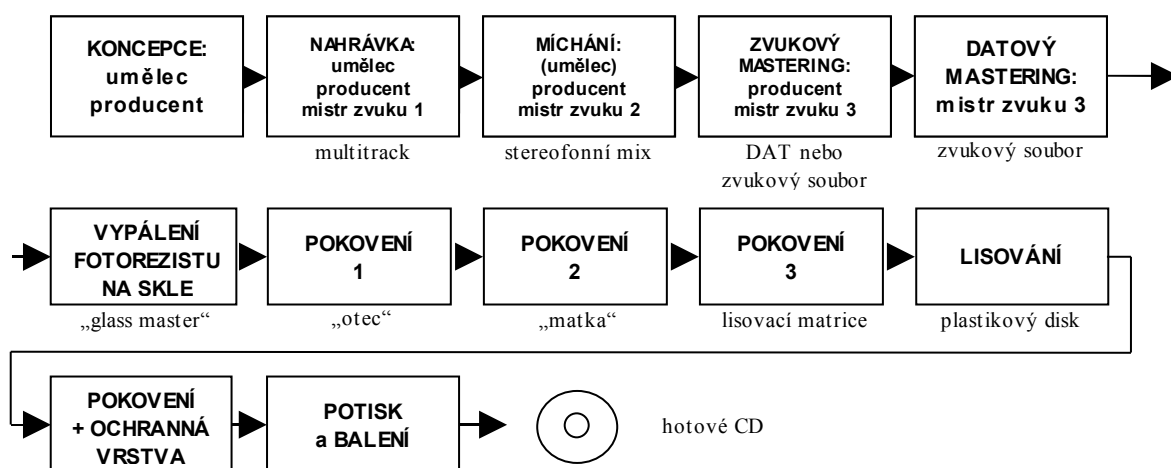
signálu již drastické vysílací komprese příliš neublíží.

Je-li mastering hudby hrané pouze akustickými nástroji složitou operací, o to více je náročný mastering elektroakustické a elektronické hudby. Problémy s kombinací zvuku reálného světa a virtuálního vyvstávají již při mixu – princip jednoty a kontrastu reálných, i když upravených zvuků se stává klíčovým ve vztahu k chladným elektronickým zvukům (např. FM syntéza). V čistě elektronické hudbě vytváříme novou zvukovou realitu virtuálně, uměle a máme tak vlastně proti EA hudbě větší svobodu.

V této kapitole uvedeme nejprve stručně řetězec procesů a operací při výrobě kompaktní desky. Dále se podíváme blíže na fázi masteringu a na popis jednotlivých funkčních bloků, které se nejčastěji používají k závěrečným zvukovým úpravám a také různé možnosti jejich vzájemného propojení.

P2.1 Technologie výroby kompaktní desky (CD)

Na obr. P2.1 vidíme řetězec technologie výroby CD od prvotní koncepční rozvahy nad projektem až po výrobu finální prodejné kopie disku.



Obr. P2.1 Technologie výroby kompaktní desky

V horní části obrázku vidíme řetězec studiových procesů. V rámečcích je uveden vždy název výrobního postupu a kdo se na něm podílí. To, že jsem zvukové mistry očísloval, vychází ze skutečnosti, že mnohdy se deska nahrává, míchá a masteruje na různých pracovištích s různým personálním zajištěním. V případě masteringu je to až na výjimky pravidlem, nahrávací a míchací proces

se většinou uskutečňuje na jednom pracovišti.

P2.2 Procesy a nástroje zvukového masteringu

Nyní uvedme výčet nejdůležitějších technologických procesů a jejich funkce při masteringu. Nejedná se v žádném případě o úplný seznam všech v současnosti dostupných prostředků, který by zejména v případě softwarových aplikací vyšel na samostatnou publikaci. Parametry a uživatelský komfort jsou neustále vylepšovány, principy však zůstávají.

P2.2.1 Korekční úpravy

Pojem korekčních úprav nahrávky souvisí se zpracováním frekvenčního spektra zvukové informace. To, že zvukový signál vstupuje do masteringu již smíchaný, nám znemožňuje upravit poměry mezi jednotlivými nástroji. Částečně to sice možné je, ale zdůrazňujeme-li např. dominantní složky zpěvního hlasu, zdůrazňujeme tím i složky hudebního doprovodu ve shodném pásmu a naopak. Jde vždy o to, abychom neporušili původní záměr zvukového mistra, příp. producenta, který zodpovídá za mix.

Celé spektrum frekvencí můžeme rozdělit na oblast základních tónů (fundamentů, 1. harmonických), které určují tónovou výšku zaznamenaných nástrojů. U elektronicky generovaných signálů a také u varhan s pedálovými tóny 32' rejstříků sahají nejnižší frekvence až na hranici slyšitelnosti (oblast cca kolem 16 Hz – subkontra C). Fundamenty na opačném konci rozsahu končí přibližně kolem 4000 Hz (nejvyšší tón pikoly c5), u varhanních alikvotních rejstříků (1' rejstříky, případně i vyšší) a elektronických zvuků i výše. Zbytek frekvenčního spektra (od základních tónů až k horní mezi slyšitelnosti) představuje oblast alikvotních frekvencí (vyšších harmonických), které nejsou již ve srovnání se základními tak vydatně zastoupeny, ale jsou nositeli barvy zvuku.

V pásmu nejvyšší citlivosti lidského ucha (přibližně 300 Hz až 4000 kHz) se nachází zejména ve vokální hudbě velmi důležitá informace zejména o srozumitelnosti textu a vůbec dominantní složky hlasového výraziva. Energeticky nejnáročnější je naopak oblast hlubokých frekvencí (zhruba pod 100 Hz).

Jednotlivé druhy frekvenčních korektorů můžeme rozdělit na následující typy:

- **parametrický ekvalizér** – tento typ korektoru bývá často využíván už při mixu na jednotlivých nástrojích, ale i při masteringu je to nejpoužívanější typ korektoru. V praxi se jedná o sestavu několika přeladitelných filtrů typu pásmová propust, kde u každého filtru nastavujeme tři parametry: střední frekvenci, zdvih a parametr Q. Výhodou je např. možnost utlumit úzké pásmo frekvencí v okolí rezonančních vrcholů zejména basových nástrojů (pro dosažení vyrovnanosti jednotlivých tónových výšek stupnice) nebo naopak zdůraznit pásmo hlasového výraziva. Parametr Q je definován jako poměr střední frekvence a šířky pásma frekvenční charakteristiky filtru 3 dB pod jejím maximem. Čím vyšší Q, tím je filtr užší. Nižší nastavení (např. $Q=0.6$) využijeme pro hladší průběh korekce (zdůraznění určitého pásma) a je ve výsledku více přirozené. Vyšší hodnoty ($Q=2$ a více) se hodí pro odstranění nechtěných rezonancí v nahrávce.

- **shelving ekvalizér** – ekvalizér typu shelving využíváme pro zdůraznění nebo potlačení všech frekvencí, ležících pod (low-shelving) nebo nad (high-shelving) nastaveným kmitočtem. Vliv na celkové frekvenční poměry je zřejmý, neboť pracujeme se zdvihem či potlačením všech frekvencí mezi zlomovým a zbytkem frekvenčního pásma. Určitou modifikovanou variantou je ekvalizér Q-shelv, vzniklý kombinací shelving filtru a parametrického ekvalizéru. Častou aplikací high-shelving filtru je zdůraznění tzv. „air band“. Jedná se o frekvence 15 – 20 kHz, tzn. o ty nejvyšší slyšitelné. Zdůraznění těchto „vzdušných“ frekvencí pomůže projasnit nahrávku směrem do výšek a částečně kompenzuje jednak přirozený pokles citlivosti lidského ucha, za druhé pak kompenzuje nedostatečnou schopnost reproduktorů tyto vysoké frekvence vyzářit (obdoba preemfáze). Pro podobný účinek se mnohdy používá také tzv. Baxandallova křivka (rozdílem oproti shelving filtru je ta skutečnost, že frekvenční průběh charakteristiky není konstantní v oblasti nad či pod mezní frekvencí, ale klesá či stoupá s měnitelnou strmostí k okrajům pásma – obdobně je aplikována i funkce loudness na hi-fi zesilovačích, neboli tzv. fyziologická regulace).

- **filtry typu dolní či horní propust** – jedná se o tradiční filtry, kdy zbytek pásma nad/pod danou frekvencí klesá s definovanou strmostí (dle řádu filtru 6, 12, 18 i více dB/oktávu). Filtr *HPF* užíjeme, chceme-li „odříznout“ nežádoucí hluboké frekvence, vzniklé např. kročejovým hlukem, přeneseným do mikrofonního stojanu, vibrace, rezonance atd. Tyto frekvence totiž nenesou žádnou užitečnou informaci. Naopak, jedná se o parazitní hluky, které svojí energetickou vydatností (která je „ukryta“ díky omezené citlivosti ucha na dolním okraji pásma) zabírají podstatnou část dynamického rozsahu a omezují tak „headroom“ užitečnému zbytku pásma. Doporučuje se nastavit filtr HP na frekvenci kolem 40 Hz – užitečnému signálu nikterak neublížíme, naopak odstraníme případné stejnosměrné složky, které mohou díky nesymetrii kolem nulové osy zanést do signálu zkreslení. Navíc, psychoakustický aparát lidského slyšení je schopen „dokonstruovat“ chybějící či zatlumenou oblast základních frekvencí těch nejhlubších basových nástrojů díky rozdílovým tónům. Filtr *LPF* využijeme např. pro potlačení šumu v nejvyšším pásmu, zejména nemáme-li k dispozici jiný prostředek pro jeho redukci.

Existuje celá řada hardwarových i softwarových přístrojů pro práci s frekvenčním spektrem, která uvedené základní typy korektorů různě kombinuje. Všimněme si, že ve výčtu chybí grafický ekvalizér. Skutečně, tento typ korektoru se v masteringu převážně nevyužívá. Spíše než pro aplikaci do řetězce masteringu jej využijeme pro případné korekce přenosové charakteristiky reproduktorů a poslechové místnosti.

Ještě uvedme poznámku k negativnímu dopadu korekce kmitočtové charakteristiky a tou je fázové zkreslení, zejména u parametrických filtrů s velkým Q . Je to jev, který se v analogové podobě jen obtížně odstraňuje. Fázové zkreslení přímo souvisí se skupinovým zpožděním, takže korigované harmonické složky se vzájemně fázově posouvají. V číslicové technice využijeme např. symetrický filtr typu *FIR*, který se vyznačuje linearitou fáze. V praxi se však určitému fázovému zkreslení nevyhneme.

P2.2.2 Dynamické úpravy

Dynamické úpravy stereofonního signálu můžeme rozdělit na manuální a automatické, případně na jejich kombinace. U manuálních dynamických úprav, ať

už se jedná o skutečný pohyb faderů lidskou rukou v reálném čase či interpretaci zaznamenaných změn úrovně dynamiky do tzv. volume (fade) křivek v SW aplikacích, provádíme přizpůsobení dynamiky zpracovávaného signálu požadavkům výsledné hlasitosti a to v závislosti na obsahu informace v daném čase. Jinými slovy, zasahujeme do dramaturgického vývoje úrovně vybuzení v průběhu času. To se hodí např. pro tzv. fade-out na konci skladeb, ale také o zvýšení modulace v tichých pasážích atd. Převážně se takovéto úpravy hodí pro zpracování tzv. makrodynamiky – tedy dlouhodobých změn dynamiky.

V případě automatických dynamických úprav nastavujeme pouze řídicí parametry dynamického procesoru buď staticky, pro celou skladbu či album, anebo je v průběhu masteringu vhodně měníme. Mezi základní dynamické procesory patří **kompresor**. Jedná se o nelineární elektronický obvod, který zpracovává mikrodynamiku signálu tak, že signály do určité nastavené úrovně (trashold) zachovává nezměněné a od určité signálové úrovně je zeslabuje podle nastaveného poměru (vstup:výstup v dB). Podle nastaveného poměru rozlišujeme kompresi mírnou, měkkou (např. 3:1) až po tvrdou limitaci (∞ :1), která tvrdě omezí např. všechny signálové špičky před vstupem do A/D převodníku nebo obvodů pro radiové vysílání. Přejít křivky převodní charakteristiky kompresoru z lineární části se směrnici rovnou jedné do části se změněnou směrnici (tzv. koleno - knee) dle kompresního poměru je buď ostrý (hard-knee) nebo pozvolný (soft-knee). Dalšími dvěma parametry kompresoru jsou časy náběhu (attack) a doběhu (release) kompresoru, které umožňují nastavit určitou setrvačnost, jak rychle bude kompresor reagovat po překročení prahové úrovně či po poklesu pod ni.

Pojďme se nyní podívat na některé charakteristické projevy komprese dynamiky. To, o co nám jde, je zvýšit subjektivní hlasitost, neboli snížit dynamický rozsah tak, aby rozdíl mezi nejslabší modulací a špičkou signálu byl co nejnižší. Motivací „produkčního“ zvuku je dostat slabé pasáže zvuku nad hlukové pozadí průměrného poslechového prostředí. Může to být např. automobil, pokoj s pronikajícím venkovním hlukem nebo s jiným hlukovým pozadím. Jistě, souvisí to i s tendencí předložit posluchači takový zvukový signál, aby nemusel neustále „vstávat ze židle“ z důvodů tlumení silných míst či zesílení slabých. Dynamické poměry ve výrazu jednotlivých nástrojů jsou částečně zachovány díky změně barvy, nicméně ke kompresním úpravám je nutno přistupovat citlivě. Komprese signálu ovlivňuje také tranzienty signálů a tím také jejich ostrost. Je zřejmé, že

při rychlém čase náběhu stihne kompresor zareagovat i na krátkodobé přechodové jevy signálů, které, převyšují-li nastavený práh komprese, poklesnou. Mezi další negativní projevy komprese patří zejména tzv. dýchání šumu. U signálu, který obsahuje parazitní šumové složky na pozadí, dochází při vybuzení užitečným signálem k utlumení dynamiky, klesne i úroveň pozadí a po odeznění užitečného signálu k opětovnému „nadýchnutí“ šumu. Opačným problémem je tzv. pumpování. To nastane, dominuje-li v nahrávce rytmická nízkofrekvenční složka (např. basový buben v soudobé taneční hudbě). Ostatní komponenty signálu jsou ztlumeny nárazově vždy, když přijde dominantní signál. Má to za následek pravidelné tlumení a opětovné zesilování signálu v závislosti na energeticky nejvydatnějších složkách. Jediným uspokojivým klíčem k řešení tohoto problému je vícepásmová komprese.

Při vícepásmové kompresi je signál nejprve rozdělen do více (nejčastěji 3 – 5) kmitočtových pásem a dále zpracován nezávislými dynamickými procesory. Poté se jednotlivé spektrální složky opět sečtou do výsledného signálu. Problémy s pumpováním a dýcháním se zcela nebo významně odstraní. Vícepásmová komprese je vlastně také korekční úpravou a proto leží ve svém principu v obou skupinách zpracování – korekčních i dynamických úpravách.

P2.2.3 Generátory užitečných zkreslení - excitery

Vedle dvou nejpoužívanějších výše zmíněných typů zpracování signálů při masteringu existuje i celá řada dalších, méně či více užitečných. V případě **exciterů** zanášíme do signálu umělé zkreslení sudými harmonickými složkami, které je pro lidský sluch přijatelnější, než-li lichými harmonickými. Signál pro zkreslení je odvozen z pásma vyšších kmitočtů a produkt zkreslení přimíchán k užitečnému signálu. Obdobně se chovají obvody s elektronkami. Ne náhodou je mnoho špičkových hardwarových zařízení pro mastering konstruováno s pomocí elektronek, které dodávají zvukovému signálu populární „hřejivost“. Jelikož zanášíme do signálu uměle novou informaci, je vždy nutné citlivě nastavit celkový poměr přidaného signálu. Nadměrná ostrost některých hudebních signálů vzniklá uměle může být nepřírozená.

P2.2.4 Harmonické syntezátory

Obdobně jako v případě exciterů zanášíme do signálu uměle vyšší

harmonické složky, v případě syntezátorů harmonických (**ultra-bass procesorů** atd.) přidáváme nízké složky odvozené od základních frekvencí basových tónů dělením kmitočtu. I zde je nutné pracovat opatrně. Je lépe přidat méně umělých basů, než-li je následně tlumit ekvalizací.

P2.2.5 Dozvukové procesory

I při masteringu smíchané nahrávky využijeme často procesory, dodávající umělý dozvuk. Chceme-li umístit výsledný zvukový obraz do virtuálního prostoru či pouze prodloužit zvukovou informaci, nastavíme vhodný poměr přímého/dozvukového signálu tak, aby nedošlo k narušení poměrů mezi jednotlivými nástroji. Je totiž známo, že některé signály jsou proti dodatečnému přidání dozvuku odolnější než např. signály impulsní a perkusivní. Vhodně nastavený dozvuk pomůže „stmelit“ výsledný zvuk a má také určité ekvalizační schopnosti.

P2.2.6 Denoising, declicking a declipping

Jedná se o procesy, při kterých potlačujeme nežádoucí rušivé signály, zejména šumy, digitální výpadky, lupance a ostré limitace. Zatímco v případě šumu existuje celá řada samočinných, v reálném čase pracujících algoritmů jeho potlačení, declicking (odstranění výpadků, lupanců a jiných krátkodobých poruch) a declipping (krátce limitované signály) můžeme provést buď ručně (tzv. manuální declicking a declipping) u ojedinělých jevů či automaticky u nežádoucích signálů, které se opakují (např. praskot gramodesky). Nejčastěji uijeme denoising a declicking při remasteringu a rekonstrukci starších archivních nahrávek.

P2.2.7 Měření signálových veličin a monitoring

Jako poslední z uvedených procesů masteringu uvádím ještě pomocné nástroje, které mohou více či méně usnadnit sledování veličin signálu v průběhu jeho zpracování. Nejdůležitější z nich je měření špičkové signálové úrovně pomocí *PPM* (Peak Program Meter), které je důležité zejména při buzení *A/D* převodníků. Dalším důležitým měřičem je *VU* meter, který měří efektivní hodnotu signálu a jeho výchylka souvisí více se subjektivní hlasitostí než s absolutní signálovou úrovní.

Mezi ostatní měřiče a ukazatele patří stereofonní korelátory, spektrální analyzátoři, měřiče zkreslení, spektrální hustoty apod.

Na závěr zmíníme článek masteringového řetězu snad nejpodstatnější – monitoring. Volba a optimalizace poslechových podmínek hraje důležitou roli pro závěrečnou kontrolu masterované nahrávky. Nezapomeňme, že zvukový mistr masteringu je posledním člověkem, který slyší celou nahrávku jako poslední z celého produkčního týmu. Případné závady, interference či rušivé signály ve zvuku, které by snad přeslechl, jsou nevratné a objeví se záhy v celé sérii lisovaných desek. Je to velký díl odpovědnosti a v praxi bývá snížen tím, že desku na závěr poslouchá více lidí.

Ať už je organizace závěrečného poslechu a kontroly kvality jakákoli, je kvalitní poslech nezbytnou součástí profesionálního masteringu. Kromě téměř ideálně čistého poslechu by měla být k dispozici i možnost alternativního přes různé verze komerčních reprodukcí zařízení. Jen málokdo z posluchačů bude mít k poslechu desky takové podmínky, jako měl produkční tým, takže k dispozici by měl být poslech přes malé reproduktory z plastu i monofonní monitoring pro ověření, jak bude nahrávka znít např. z TV. Je jasné, že všem potenciálním možnostem poslechu se nezavděčíme, nicméně kontrola „kompatibility“ nahrávky pro různé úrovně kvalit se hodí. Také kontrolní poslech na sluchátka má svou důležitou roli.

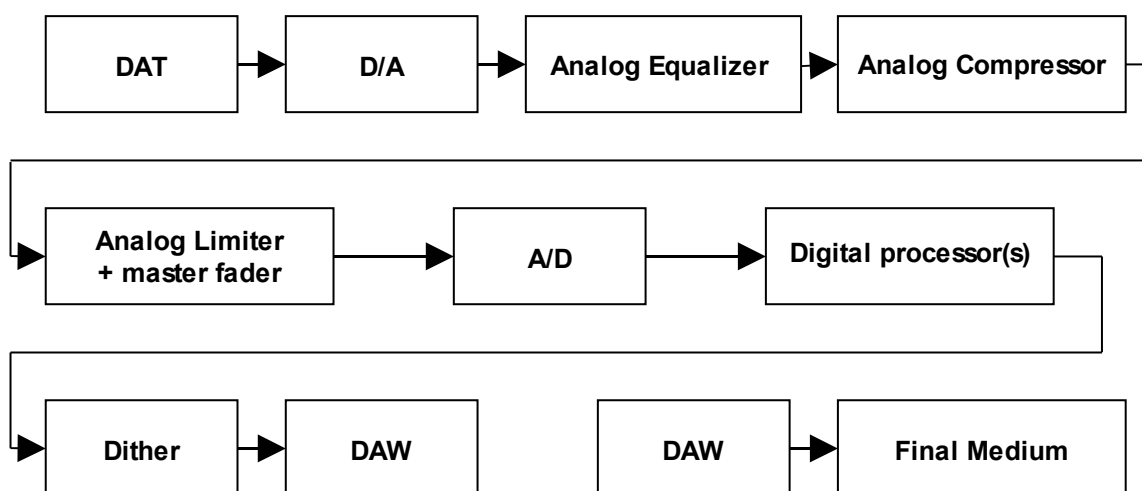
P2.3 Uspořádání operací při masteringu

Neexistuje ideální recept, jak uspořádat celý řetězec mastringových operací za sebou. Přesto se v průběhu doby ustálily různé varianty více či méně optimálních propojení. Prvotní rozvahu musíme učinit již tehdy, uvědomíme-li si, jakou technologii máme k dispozici. Mastering se dnes může celý odehrát na digitální úrovni. Dokonce nemusí zpracováváný signál opustit *DAW*. Jen málokdy však vystačíme pouze s jedním počítačem a jedním či více programy pro mastering. Stále ještě většina zkušených mistrů masteringu spoléhá na kaskádu jednotlivých zařízení, specializovaných pro daný účel. Využití hardwarových zařízení má svá pro i proti. Mezi výhody patří kontrolovatelnost celého řetězce. Při fyzickém propojení ihned vidíme, jak signál prochází jednotlivými fázemi zvukového masteringu, které mezi sebou můžeme porovnávat. Také optimální

sled operací může být nalézán změnou určitého funkčního bloku za jiný nebo změnou pořadí kaskády. Existuje celá řada firem, která se zabývá výrobou speciálních procesorů, kompresorů, ekvalizérů a jiných nástrojů pro mastering, navíc často v analogové podobě. Při seriózním masteringu s využitím analogového HW je nezbytné mít k dispozici též kvalitní A/D a D/A převodníky.

Podívejme se nyní na čtyři různé varianty uspořádání operací a fází masteringu s vysledováním jejich typických vlastností.

Na obr. P2.2 vidíme první variantu. Je to vlastně jedna ze starších hybridních kaskád, kdy všechny operace zvýšení hlasitosti (leveling), nájezdů a odjezdů úrovně (fading) a zpracování pomocí korekčních obvodů probíhají především v analogové oblasti. Není zde prostor vysledovat všechny výhody a nevýhody takového uspořádání. Z těch hlavních výhod jmenujme především dokonalou přehlednost a především ten fakt, že do signálu z DAT, který je pouze 16-bitový (44.1 kHz), nezanášíme zkreslení, vzniklé zaokrouhlením a poklesem rozlišení při digitálních procesech. Případné digitální zpracování v 16-bitovém rozlišení po zpětném A/D převodu „změkčíme“ využitím ditheru.

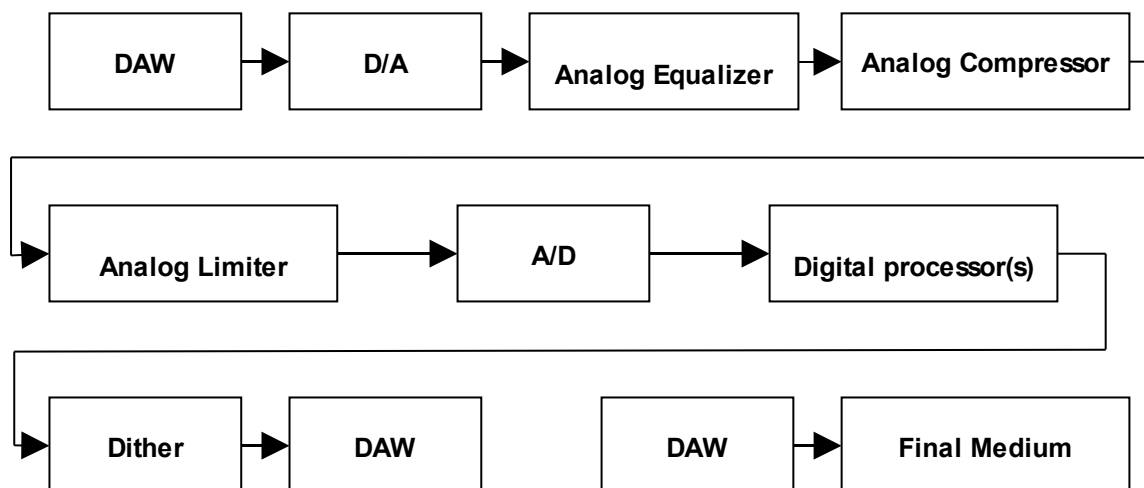


Obr. P2.2 První varianta uspořádání masteringu

Při tomto uspořádání nám slouží DAW pouze jako záznamové cílové zařízení. V počítači provedeme jen nezbytný datový mastering, tedy seřazení skladeb do konečného pořadí, programování PQ kódů a uložení na cílový nosič.

Na obr. P2.3 je druhá varianta uspořádání. Liší se od té první vlastně jen

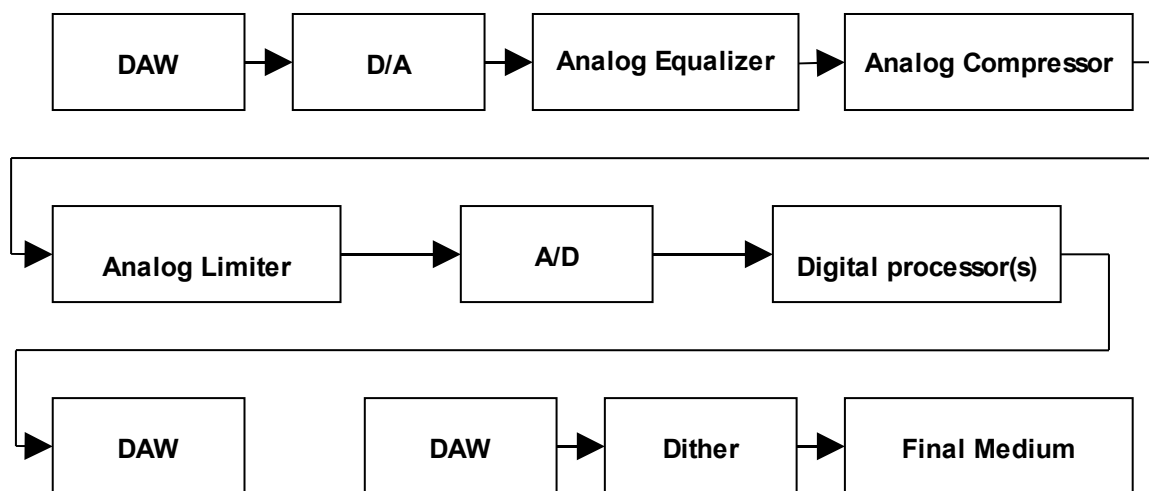
v tom, že na začátku řetězce i na jeho konci je *DAW*. V praxi se většinou nejedná o dvě různé počítačové stanice, ale o dvě různé stereostopy vícestopé aplikace. Potřebný fading, případně makrodynamické úpravy jsou nastaveny na zdrojové stopě v automatizaci, na cílovou stopu nahráváme signál po průchodu kaskádou analogových a digitálních zařízení. Výhodou oproti variantě 1 je to, že signály před a po zpracování můžeme vizuálně porovnat v jejich grafickém záznamu. Také varianta 2 předpokládá 16-bitový formát při vzorkování 44.1 kHz.



Obr. P2.3 Druhá varianta uspořádání masteringu

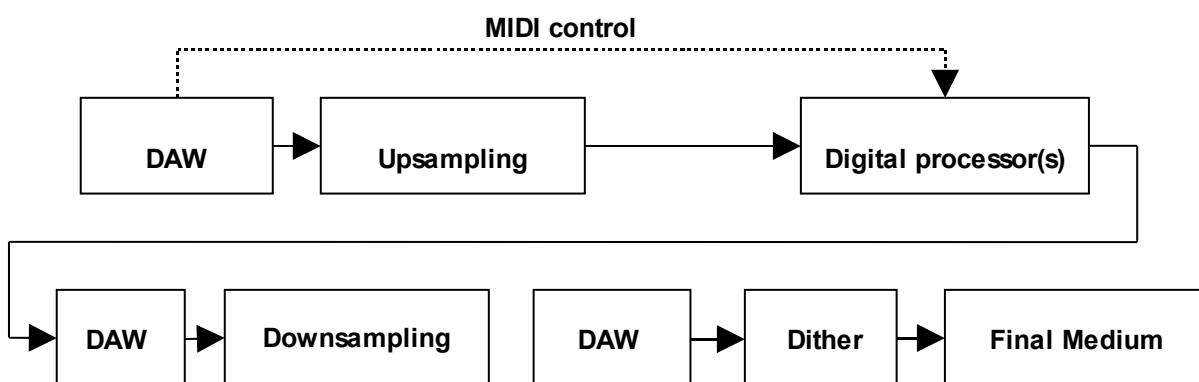
Třetí variantou je vypuštění procesu dither před uložením do cílových stop *DAW*. Předpokládá to ovšem vzorkování a záznam ve 24-bitovém rozlišení. Následné oříznutí na 16-bitový formát a dither využijeme až pro výrobu finálního média pro gramofonový závod.

Výhodou je možnost zálohovat 24-bitové soubory pro pozdější remastering např. pro DVD-Audio nebo jiné perspektivní formáty.



Obr. P2.4 Třetí varianta uspořádání masteringu

Poslední zde uvedenou variantou nejběžnějších uspořádání kaskády je na obr. P2.5. Zpracování probíhá zcela na digitální úrovni. Pro kvalitnější zpracování v moderních číslicových procesorech s vysokým vzorkovacím kmitočtem je v kaskádě vřazen ještě proces tzv. upsamplingu, který převzorkuje signál na větší SR (Sample Rate), což odpadá v případě existence mixu již ve vysokém rozlišení např. 24-bitů/96 kHz. Po zpracování v procesorech přichází opět downsampling na 24-bit/44.1 kHz pro archivaci a 16-bit CD výstup s ditherem. Všechny operace digitálního zpracování probíhají automatizovaně, pomocí řídicích MIDI dat, uložených na pomocných stopách DAW v synchronu se zdrojovým souborem, což dává velkou flexibilitu a možnost se v budoucnu vrátit k těmto nastavením.



Obr. P2.5 Čtvrtá varianta uspořádání masteringu