

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A
TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh koncepce analogového syntezátoru

Autor práce: Bc. Jaroslav Procházka
Vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

Plzeň 2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav PROCHÁZKA**
Osobní číslo: **E12N0155P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Návrh koncepce analogového syntezátoru**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti a řešení analogových syntezátorů různých výrobců.
2. Navrhněte koncepci modulárního analogového syntezátoru.
3. Posuďte možnosti, výhody a nevýhody analogového a číslicového ovládání všech parametrů syntezátoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh analogového syntezátoru. První část popisuje nejdůležitější prvky, které analogové syntezátory obsahují. Dále jsou vysvětleny principy jednotlivých metod syntézy zvuku, které je možné realizovat pomocí analogové technologie. V poslední části práce jsou popsány možnosti realizace syntezátoru a návrh nejlepšího řešení.

Klíčová slova

Syntezátor, aditivní syntéza, subtraktivní syntéza, FM syntéza, modulace, modul, rack, sběrnice

Abstract

Procházka, Jaroslav. Analog synthesizer concept. [Návrh koncepce analogového syntezátoru]. Pilsen, 2015. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

This diploma thesis is focused on an analog synthesizer concept. The first part describes the most important elements of analog synthesizers. Next, principles of each single method of a sound synthesis, that can be implemented using just analogue technology are explained. Possibilities of the synthesizer implementation and the best solution are described in the last part of the thesis.

Key words

Synthesizer, additive synthesis, subtractive synthesis, FM synthesis, modulation, module, rack, bus

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne 11. května 2015

Bc. Jaroslav Procházka

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a celkovou pomoc při vzniku této diplomové práce.

Seznam symbolů a zkratek

VCO.....	Napětím řízený oscilátor
VCA.....	Napětím řízený zesilovač
VCF.....	Napětím řízený filtr
LPF.....	Filtr typu dolní propust
MMF.....	Univerzální filtr
EG.....	Generátor obálky
LFO.....	Nízkofrekvenční oscilátor
MIX.....	Směšovač
AT.....	Atenuátor
ADSR.....	Obálka typu náběh, úpadek, podržení, uvolnění
AR.....	Obálka typu náběh, uvolnění
RM.....	Kruhový modulátor
S&H.....	Vzorkovací obvod
VCOH.....	Harmonický oscilátor
DCA.....	Digitálně řízený audio zesilovač
CV.....	Kontrolní napětí
VCO _{MOD}	Modulační oscilátor navrhovaného syntezátoru
VCO _{MAIN}	Hlavní oscilátor navrhovaného syntezátoru
Q.....	Rezonance samokmitajícího filtru
f_c	Mezní frekvence filtrů typu dolní a horní propust
f_l	Dolní mezní frekvence
f_h	Horní mezní frekvence
f_0	Rezonanční frekvence, základní harmonická signálu
f_c	Frekvence nosného signálu
f_{sb}	Frekvence postranního pásma
f_m	modulační frekvence
Δf_c	Frekvenční zdvih
β	Index modulace
T.....	Perioda signálu
$s(t)$	Časový průběh signálu
$S(f)$	Spektrum signálu
τ	Šířka pulsu impulsního signálu

S_0	Úroveň základní harmonické signálu
L [dB].....	Úroveň signálu v decibelech
L_{ref}	Referenční úroveň signálu
t_{gr}	Skupinové zpoždění
A.....	Doba náběhu
D.....	Doba úpadku
S.....	Doba podržení
R.....	Doba uvolnění
Env.....	Okamžitá hodnota obálky
D/A převodník ...	Digitálně/analogový převodník
F(f).....	Přenos filtru v závislosti na frekvenci
FM.....	Frekvenční modulace
DSB-SC.....	Amplitudová modulace s potlačenou nosnou frekvencí
MIDI.....	Komunikační standard používaný v hudební sféře
CAN.....	Controlled Area Network
MUX.....	Multiplexor
DEMUX.....	Demultiplexor
SW.....	Elektronický spínač
THT.....	Technologie elektronických součástek s drátovými vývody
SMT.....	Technologie elektronických součástek určených pro povrchovou montáž
N.....	Počet hlasů polyfonie
H.....	Počet harmonických
M.....	Stanice Master
S.....	Stanice Slave
R.....	Opakovač sběrnice
R_T	Terminátor sběrnice

Obsah

1	Úvod	9
2	Prvky používané v syntezátorech	10
2.1	Napětím řízené oscilátory	10
2.2	Generátory šumu	13
2.3	Napětím řízené zesilovače.....	14
2.4	Napětím řízené filtry	14
2.5	Generátory obálek	17
2.6	Nízkofrekvenční oscilátor	17
2.7	Směšovače.....	17
3	Generátory obálek a jejich spouštění.....	18
3.1	Trigger a Gate signály	21
3.2	Další tvary obálek	23
4	Metody zvukové syntézy	25
4.1	Aditivní syntéza	25
4.1.1	Princip aditivní syntézy	25
4.1.2	Struktura aditivní syntézy	27
4.1.3	Shrnutí aditivní syntézy	28
4.2	Subtraktivní syntéza	29
4.2.1	Princip subtraktivní syntézy.....	30
4.2.2	Struktura subtraktivní syntézy	31
4.2.3	Filtry pro subtraktivní syntézu.....	31
4.2.4	Shrnutí subtraktivní syntézy	33
4.3	FM syntéza	34
4.3.1	Princip FM syntézy	34
4.3.2	Spektrum signálu	34
4.3.3	Algoritmy FM syntézy.....	36
4.3.4	Shrnutí FM syntézy.....	38
4.4	DSB-SC modulace	39
5	Návrh syntezátoru.....	40
5.1	Tradiční koncepce	40
5.1.1	Moduly.....	40
5.1.2	Ovládání.....	40
5.1.3	Hlavní možnosti syntezátoru	42
5.1.4	Výhody a nevýhody tradiční koncepce.....	43
5.2	Tradiční koncepce s číslicovým ovládáním	44

5.3	Semi-modulární řešení	45
5.3.1	Subtraktivní syntéza.....	45
5.3.2	Aditivní syntéza	48
5.3.3	FM syntéza.....	49
5.4	Konstrukce	52
5.4.1	Rack	52
5.4.2	Eurorack.....	53
5.4.3	Dostupné konstrukční prvky	53
5.5	Architektura modulů	54
5.5.1	Metoda jednoho hlasu polyfonie na jedné kartě	54
5.5.2	Metoda skupiny komponentů stejného typu na jedné kartě.....	55
5.6	Návrh komunikační sběrnice.....	57
5.6.1	Řídicí signály	58
6	Závěr.....	59
	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	63
	Přílohy.....	65

1 Úvod

Analogové syntezátory provádějí generování zvukového signálu pomocí analogové techniky. Jedná se o nejstarší elektronické klávesové hudební nástroje, které však pro svůj ušlechtilý zvuk mají spoustu příznivců i v dnešní době.

V práci jsou popsány jednotlivé metody syntézy, které byly v dobách analogových syntezátorů nejvíce používané. Na principu některých uvedených metod pracují i některé moderní číslicové syntezátory. V textu práce jsou uvedeny příklady nejznámějších syntezátorů, které na uvedených principech pracovaly. Dále práce rozebírá principy a možnosti řízení syntezátorů.

Hlavní část práce se zabývá rozborem možností konstrukce syntezátoru a vlastním návrhem optimálního řešení, na základě kterého by bylo možné navrhované zařízení zkonstruovat. Při návrhu je nutné volit mezi stupněm modularity a jednoduchostí konstrukce, neboť tyto požadavky jsou vzájemně protichůdné. „Absolutně“ modulární syntezátory, zpravidla amatérských konstrukcí, mají velmi velkou modularitu a jsou univerzální. Jejich ovládání je však značně náročné a nepřehledné. Naopak komerčně vyráběné analogové syntezátory byly menšího měřítka a zpravidla nedomulární. V návrhu řešení syntezátoru je kladen důraz především na nepoužívanější metodu syntézy, kterou je syntéza subtraktivní.

2 Prvky používané v syntezátorech

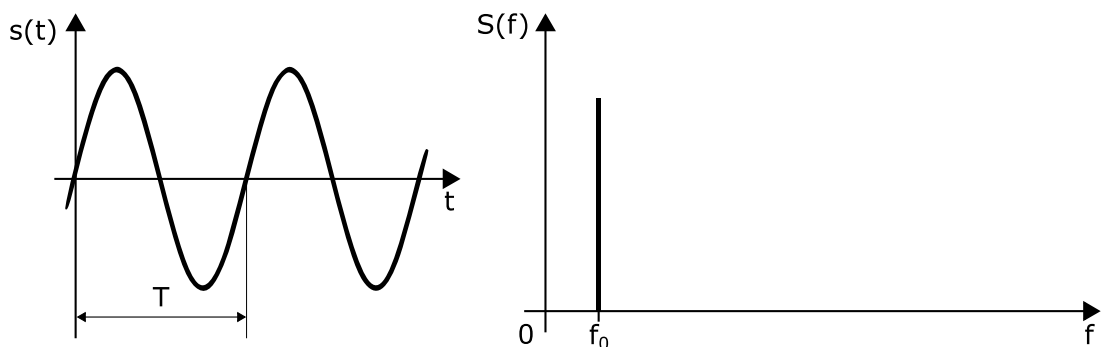
2.1 Napětím řízené oscilátory

Základními stavebními bloky každé metody syntézy jsou napětím řízené oscilátory (VCO – voltage controlled oscillator). Tyto prvky slouží k vytvoření periodického elektrického signálu, který bude po příslušných úpravách převeden na signál zvukový.

Nejdůležitějším parametrem, který musí být u každého VCO nastavitelný, je frekvence výstupního signálu. Tato frekvence udává výšku tónu vytvářeného zvuku a bývá nastavována právě napětím přivedeným na příslušný vstup oscilátoru.

Další důležitou vlastností signálu je jeho frekvenční spektrum. Spektrum zásadně ovlivňuje barvu produkovaného tónu. Se spektrem signálu úzce souvisí také jeho časový průběh. Některé deterministické signály lze velmi snadno pomocí jejich časového průběhu popsat, u většiny zvukových signálů (a signálů obecně) je však časový průběh velmi složitý a frekvenční spektrum je pak jediný přehledný způsob, jak signály popsat. Napětím řízené oscilátory jsou schopny generovat zásadně deterministické signály s definovaným časovým průběhem.

Nejjednodušším signálem použitelným při syntéze zvuku je signál s harmonickým časovým průběhem. V ideálním případě si lze takovýto průběh představit například jako vibrování natažené struny, na kterou bylo drknuto. Na poslech se harmonický signál jeví jako velmi čistý tón. V důsledku toho je poslechově relativně nezajímavý. Signál je znázorněn na *Obr. 2.1*. Spektrum harmonického signálu je tvořeno pouze základní harmonikou frekvencí, označenou v obrázku jako f_0 .



Obr. 2.1 Harmonický signál: časový průběh (vlevo) a frekvenční spektrum (vpravo)

Základní harmonická frekvence je definovaná jako převrácená hodnota periody signálu:

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

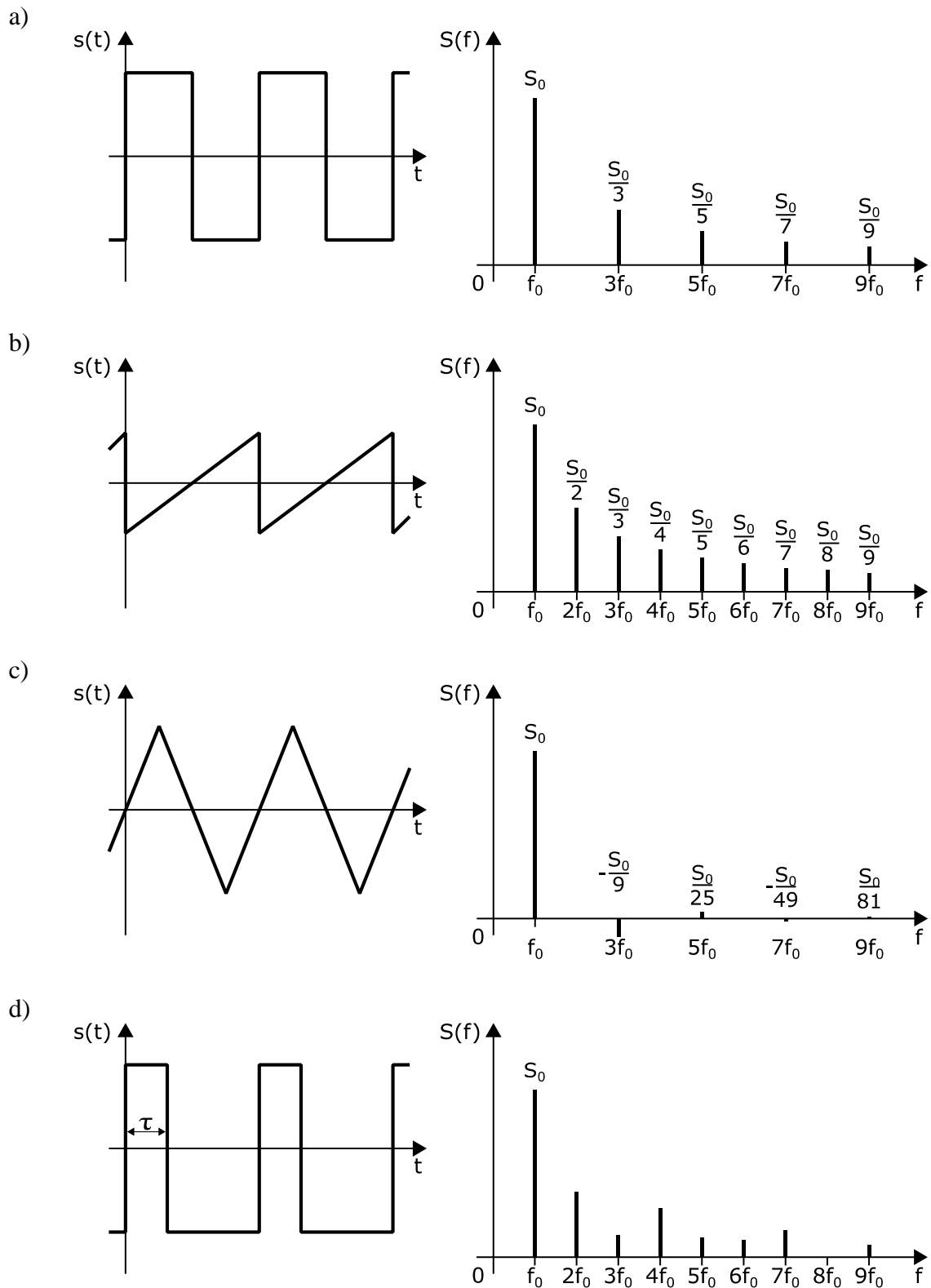
Na *Obr. 2.2* jsou časové průběhy neharmonických deterministických signálů. Spektra těchto signálů jsou již složitější a teoreticky nekonečná. Z časových průběhů jsou zakresleny dvě periody signálů a v grafech znázorňujících spektra jednotlivých signálů je vyneseno prvních devět harmonických. Neharmonické signály jsou používány v subtraktivní syntéze.

Obdélníkový průběh (*Obr. 2.2a*) sestává pouze z lichých harmonických. Úroveň každé harmonické přítomné v signálu je nepřímo úměrná její frekvenci (jejímu pořadovému číslu). Pokud budou zavedeny relativní úrovně, je možné základní harmonické přiřadit úroveň jednotkovou. Relativní úroveň každé n -té harmonické, kde n je celé liché číslo, je potom rovna hodnotě $\frac{1}{n}$. Žádná sudá harmonická není přítomna, všechny mají nulovou úroveň. Zvuk vytvářený generátorem obdélníkového signálu je „dutý“, zdánlivě podobný klarinetu. Rovněž se tento signál hodí pro syntézu zvuku některých perkusních nástrojů, např. xylofonu.

Pilovitý průběh (*Obr. 2.2b*) obsahuje všechny harmonické, přičemž jejich úrovně se řídí stejnou závislostí jako u obdélníkového průběhu – úroveň každé harmonické je tedy nepřímo úměrná její frekvenci. Zvuk je bohatší než v případě obdélníkového signálu a při poslechu se jeví jako velmi syntetický a „bzučící“. – Tento signál je možné použít při syntetizování zvuku žesťových a smyčcových nástrojů.

Obr. 2.2c ukazuje signál trojúhelníkového průběhu. Jeho spektrum vykazuje přítomnost pouze lichých harmonických, obdobně jako v případě signálu s obdélníkovým časovým průběhem. Úroveň jednotlivých harmonických však klesá s druhou mocninou frekvence. Rovněž má každá druhá přítomná harmonická otočenou fázi, takže se tyto harmonické odečítají od ostatních. V obrázku spektra to naznačují kladné a záporné hodnoty jednotlivých složek. Vzhledem k tomu, že vyšší harmonické mají velmi nízkou úroveň, je charakter takového signálu podobný signálu harmonickému, přičemž je slyšitelné lehké zabarvení.

Na *Obr. 2.2d* je signál pulsního charakteru. Je to zobecněný případ obdélníkového signálu (viz *Obr. 2.2a* a příslušný text), přičemž doba trvání jednotlivých úrovní v rámci jedné periody může být obecně různá. Úrovně jednotlivých harmonických jsou dány funkcí sinc, jejíž průběh je závislý na šířce pulsu τ vzhledem k periodě signálu. Tím pádem spektrum (resp. jeho absolutní hodnota) ztrácí monotónnost (úroveň harmonických může v určitých oblastech se zvyšující se frekvencí stoupat) a především je obohaceno i o sudé harmonické, obdobně jako pilovitý signál. Některé harmonické nemusí být přítomny vůbec nebo jen s velmi nízkou úrovní. Kupříkladu spektrum signálu na *Obr. 2.2d* postrádá osmou harmonickou. Pulsní signál je vhodný pro syntézu zvuku flétny nebo klavíru.



Obr. 2.2 Časové průběhy (vlevo) a frekvenční spektra (vpravo) neharmonických deterministických signálů: a) obdélníkový průběh, b) pilovitý průběh, c) trojúhelníkový průběh, d) pulsní průběh

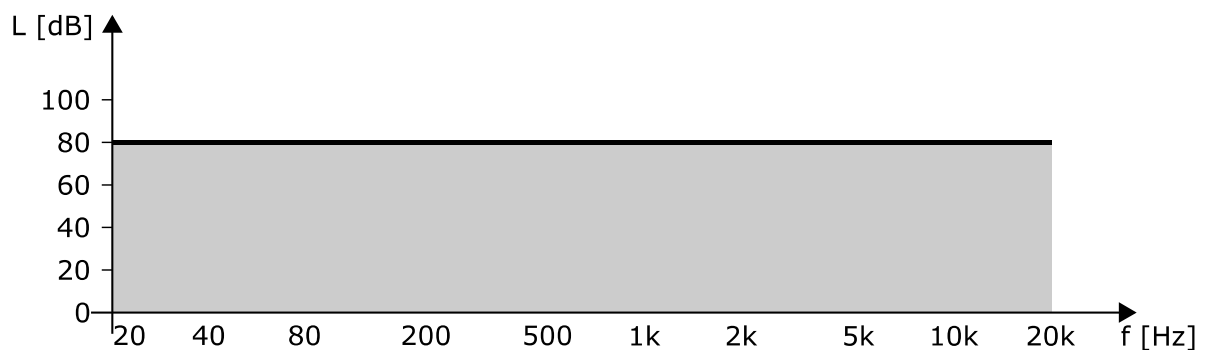
2.2 Generátory šumu

Šumové signály (noise) již nejsou periodické, nicméně v hudební syntéze použití nacházejí. Jsou vhodné zejména pro syntézu zvuku některých perkusních nástrojů, fléten, případně zvláštních efektů. Typickými představiteli perkusních nástrojů jsou komponenty bicí soupravy, z nichž nejdůležitějším prvkem je malý (vířivý) buben. Znamější je spíše pod anglickým názvem snare drum. Tento název pochází z přítomnosti struníku na spodní straně, dodávajícímu bubnu při úderu charakteristický chrastivý zvuk.

Nejpoužívanějším náhodným signálem je bílý šum. Jeho spektrální hustota je konstantní v celém frekvenčním pásmu. To znamená, že např. pásmo o šířce 10 Hz v oblasti mezi 50 a 60 Hz má stejný výkon jako pásmo od 500 do 510 Hz. Nekonečný frekvenční rozsah není prakticky možný, neboť by byl rovněž nekonečný i výkon signálu. Vlastnost rovnoměrné spektrální hustoty však přestává platit až na velmi vysokých frekvencích, tedy značně daleko od akustického pásma. Spektrum bílého šumu je naznačeno na *Obr. 2.3*. Frekvenční osa zde již má logaritmické měřítko. Na vertikální ose grafu je spektrální hustota, a to rovněž v logaritmickém měřítku. Nelineární závislost zde byla vytvořena použitím relativních jednotek úrovně (decibelů), takže hodnoty na ose jsou již rozloženy lineárně. Přepočet mezi absolutními jednotkami a decibely udává známý vztah

$$L [dB] = 20 \log \frac{L}{L_{ref}} \quad (2.2)$$

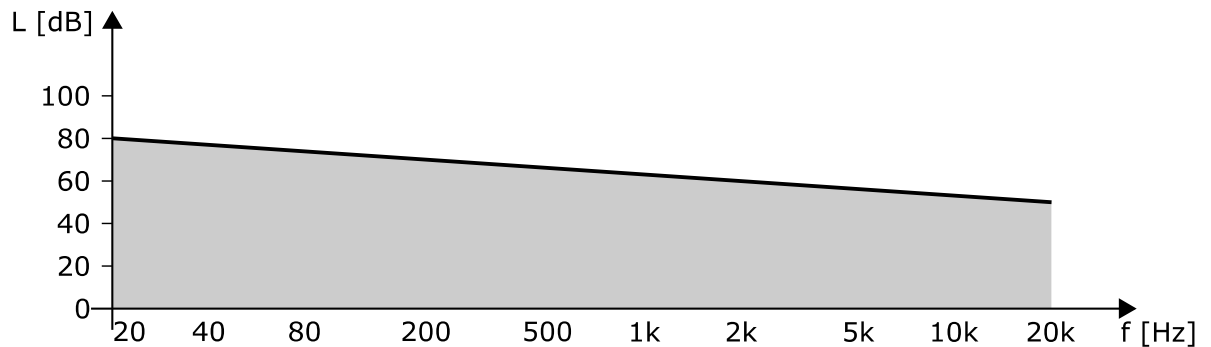
kde L je hodnota veličiny a L_{ref} je úroveň referenční - v akustice je jí referenční hodnota akustického tlaku, rovna $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Důvody použití takovýchto měřítek budou vysvětleny v souvislosti s dalším používaným náhodným signálem – růžovým šumem.



Obr. 2.3 Spektrum bílého šumu

Růžový šum obsahuje, stejně jako bílý šum, celé spektrum frekvencí. Rozdíl je v tom, že spektrální hustota růžového šumu s rostoucí frekvencí klesá. Rychlost poklesu spektrální hustoty je 3 dB na oktávu. Z tohoto důvodu je zvuk nižších frekvencí hlasitější než zvuk

frekvencí vyšších. Většina lidí však vnímá zvuk růžového šumu tak, že se celé frekvenční pásmo jeví jako stejně hlasité. Je to způsobeno logaritmickou závislostí citlivosti lidského ucha a tím, že signál růžového šumu má obsaženo v každé oktávě stejné množství energie. Spektrum růžového šumu je naznačeno na *Obr. 2.4*. Růžový šum může být získán z bílého šumu použitím dolnofrekvenční propusti.



Obr. 2.4 Spektrum růžového šumu

2.3 Napětím řízené zesilovače

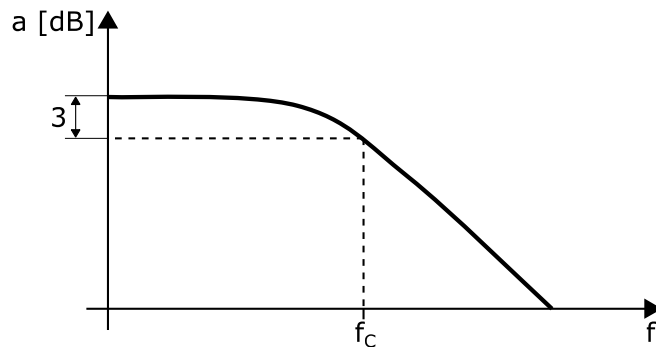
Přítomnost těchto bloků, označovaných ve schématech jako VCA (voltage controlled amplifier), je rovněž nezbytná ve všech metodách syntézy. Funkce VCA spočívá v úpravě úrovně signálu přiváděného na jeho vstup. Na výstupu VCA se pak objeví stejný signál, ale příslušně zesílený či utlumený.

2.4 Napětím řízené filtry

Úkolem napětím řízeného filtru (VCF – voltage controlled filter) je úprava spektra, tedy i časového průběhu signálu. Filtry jsou klíčovými prvky subtraktivní metody syntézy, uplatnění však mohou nalézt i v aditivní syntéze, a to při doplnění metody o další možnosti. Nejčastěji používaným typem filtru je dolní propust (lowpass filter - LPF), v některých případech může být užitečný i filtr jiného charakteru. Dalšími typy filtrů jsou horní propust, pásmová propust, pásmová zadrž a fázovací článek. Nezřídka používaným je univerzální filtr (multi-mode filter, MMF), kterýžto umožňuje realizaci většího množství typů filtrů pomocí jednoho elektrického obvodu. Jednotlivé typy filtrů jsou stručně popsány v následujícím textu.

Dolnofrekvenční propust

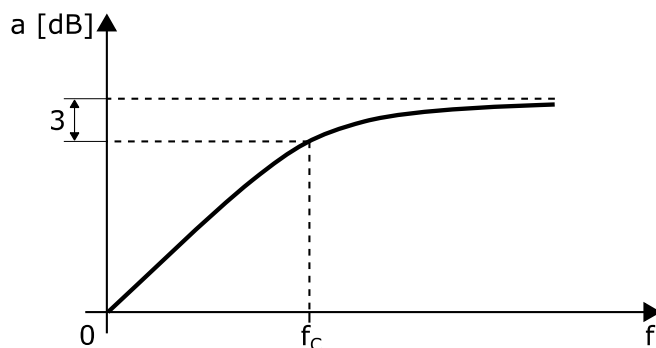
Amplitudovou frekvenční charakteristiku filtru typu dolní propust ukazuje *Obr. 2.5*. Filtr propouští harmonické složky až do určité frekvence, vyšší frekvence tlumí. Mezní (zlomová) frekvence je na obrázku označena jako f_c . Přenos filtru je označen a .



Obr. 2.5 Amplitudová frekvenční charakteristika dolnofrekvenční propusti

Hornofrekvenční propust

Tento typ filtru propouští frekvence vyšší, než je mezní. Propustné pásmo zde teoreticky končí na nekonečné frekvenci. *Obr. 2.6* ukazuje jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku.



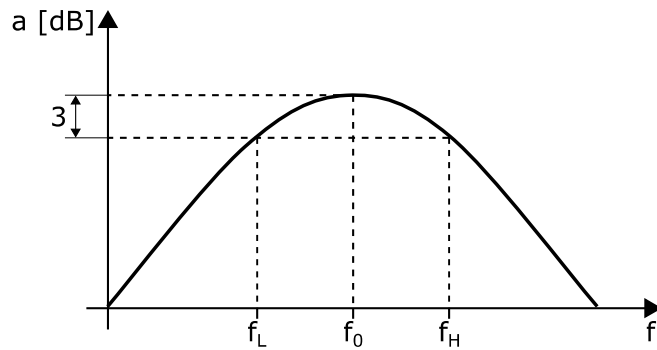
Obr. 2.6 Amplitudová frekvenční charakteristika hornofrekvenční propusti

Pásmová propust

Filtr typu pásmová propust má propustné pásmo ohraničené dvěma frekvencemi, f_l a f_h , přičemž obě jsou nenulové. V geometrickém středu jejich hodnot leží rezonanční frekvence f_0 , pro níž platí:

$$f_0 = \sqrt{f_l \cdot f_h} \quad (2.3)$$

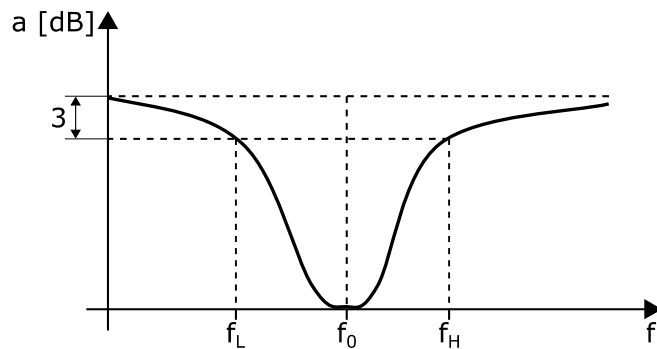
Amplitudová frekvenční charakteristika je na *Obr. 2.7*.



Obr. 2.7 Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti

Pásmová zadrž

Amplitudová frekvenční charakteristika je na Obr. 2.8. Pásmo mezi f_l a f_h je potlačeno, ostatní frekvence jsou propuštěny. Obdobně jako u pásmové propusti se ve středu nepropustného pásma nachází rezonanční frekvence f_0 .



Obr. 2.8 Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové zadrž

Fázovací člunek

Jedná se o obvod, jehož amplitudová frekvenční charakteristika je konstantní v celém frekvenčním pásmu. U tohoto filtru je však důležitý průběh fázové frekvenční charakteristiky. Fázová frekvenční charakteristika je závislost fázového posunu mezi vstupním a výstupním signálem na frekvenci. Fázový posun fázovacího člunku (resp. jeho absolutní hodnota) se zvyšující se frekvencí lineárně roste. Díky tomu má filtr konstantní skupinové zpoždění, definované jako záporně vzatá derivace fázového posunu podle úhlové frekvence:

$$t_{gr} = -\frac{d\varphi}{d\omega} \quad (2.4)$$

Fázovací člunek se používá pro kompenzaci skupinového zpoždění jiného filtru, ke kterému je tento člunek kaskádně zařazen. Tento typ je zde uveden pouze pro doplnění, v analogových syntezátorech se zpravidla nepoužívá.

2.5 Generátory obálek

Obálkové generátory (envelope generators - EG) mají za úkol měnit charakter tónu během jeho hraní. Bez použití těchto bloků by tón zněl staticky, uměle a na poslech nezajímavě – v přírodě se totiž žádný takovýto zvuk nevyskytuje. Každý zvuk vykazuje jistou dobu náběhu, kdy se jeho hlasitost zvyšuje z nulové úrovně, následuje vlastní doba hraní, kdy je hlasitost konstantní, a nakonec zvuk doznívá. Každý hudební nástroj má tyto doby odlišné. Zásadní rozdíl je například mezi dechovými nástroji, kteréžto mají dlouhé doby náběhu, variabilní dobu hraní a pomalé doznívání, a vířivým bubnem s velmi krátkou dobou náběhu i konstantní hlasitosti, představující rezonování jeho jednotlivých částí. Doba doznívání je obecně různá a závislá nejen na druhu nástroje, ale například i na jeho naladění. Tímto způsobem se v závislosti na charakteru zvuku mění jednak jeho hlasitost a jednak zabarvení. V důsledku toho se používají generátory obálek jak pro zesilovače tak pro filtry. Problematice generátorů obálek je věnována samostatná kapitola této práce.

2.6 Nízkofrekvenční oscilátor

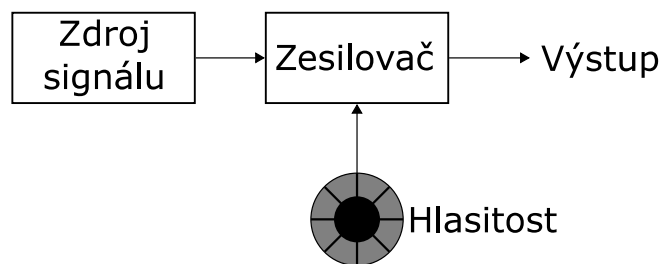
Dalším blokem, používaným zejména v subtraktivní syntéze, je nízkofrekvenční oscilátor (low frequency oscillator – LFO). Tento pomocný oscilátor periodicky rozladuje jednotlivé prvky syntezátoru a tímto způsobem je možno dosáhnout dalších efektů. Bývá naladěn na frekvence v řádu jednotek hertzů, tedy pod prahem slyšitelnosti. Typickými efekty dosažitelnými pomocí nízkofrekvenčního oscilátoru jsou vibrato v případě použití ve spojitosti s hlavním oscilátorem (frekvenční modulace) a tremolo v případě ovlivňování zesílení napětím řízeného zesilovače (amplitudová modulace). Rovněž je možné jej použít pro periodické rozladování filtru.

2.7 Směšovače

Posledním ze základních elementů analogových syntezátorů jsou směšovače (mixers – MIX). Směšovač provádí prosté sečtení několika signálů. Podle počtu sčítaných signálů mohou mít směšovače různý počet vstupů. Směšovače jsou nezbytné při realizaci principu aditivní syntézy.

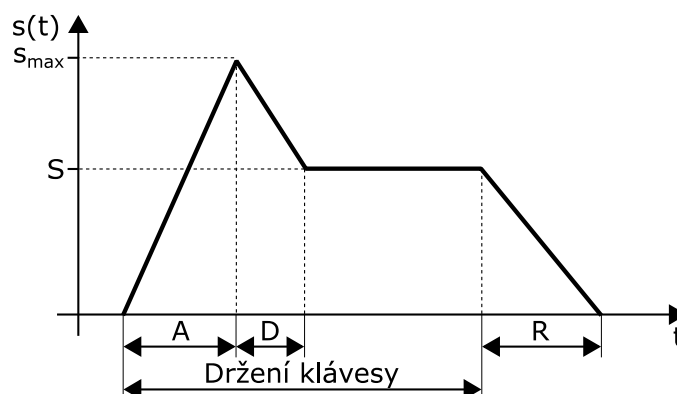
3 Generátory obálek a jejich spouštění

Představme si například prostý audio zesilovač. Signál na jeho vstupu má stále stejnou intenzitu a v závislosti na otočení knoflíku na audio zesilovači je možné měnit hlasitost signálu vycházejícího z reproduktorů. Pokud otočíme knoflíkem ve směru hodinových ručiček až do krajní polohy, je zvuk nejhlasitější. Při otáčení v opačném smyslu se hlasitost zvuku snižuje, až nakonec neslyšíme nic. Uvedený princip je znázorněn pomocí blokového schématu na *Obr. 3.1*.



Obr. 3.1 Ovládání hlasitosti zvuku

Podobným způsobem lze řídit dynamiku hraní tónu syntezátoru. Avšak otáčení ovládacím prvkem hlasitosti během hraní každé noty by bylo velmi obtížné a ve většině případů i nereálné, nemluvě o opakovatelnosti charakteristiky. Je tedy nutné tento způsob nahradit principem automatizovaným a předvídatelným. Tuto funkci zastávají právě generátory obálek. Generátory obálek jsou charakterizovány tvarem „obálky“ veličiny, která je generátorem ovlivňována. Touto veličinou bývá zpravidla hlasitost, u subtraktivní syntézy je možné použít generátor obálky i pro změnu mezní frekvence filtru. Tvarů může být velké množství, nejčastěji je však používána obálka ADSR. Název představuje počáteční písmena termínů označujících jednotlivé části obálky. Jedná se o náběh (attack), úpadek (decay), podržení (sustain) a uvolnění (release). Tuto charakteristiku ukazuje *Obr. 3.2*.



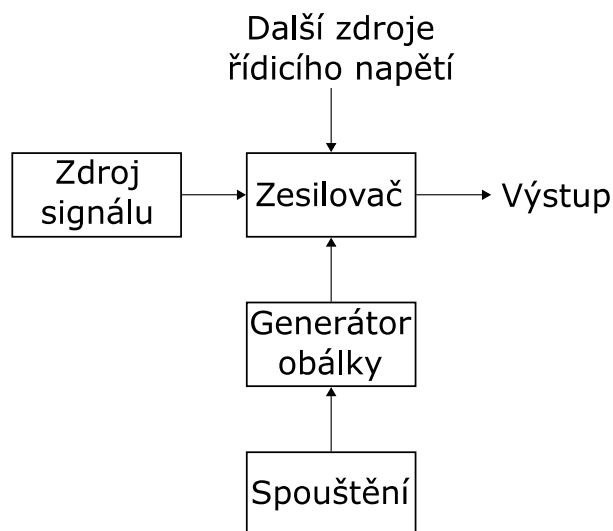
Obr. 3.2 ADSR obálka

Jednotlivé charakteristické hodnoty lze stručně popsat následovně:

- Časový údaj A definuje dobu, za kterou zvuk dosáhne maximální hlasitosti po svém spuštění.
- D je doba, po které hlasitost zvuku poklesne ze svého maxima na ustálenou úroveň.
- S je úroveň hlasitosti při držení klávesy.
- Po dobu R zvukový signál po uvolnění klávesy doznívá.

Je patrné, že A, D a R jsou vždy hodnoty časové a S je hodnota sledované veličiny (kontrolní napětí, hlasitost či mezní frekvence). Nastavováním těchto hodnot je možné dosáhnout zvuků s různými charaktery (viz kapitolu o subtraktivní syntéze). Průběhy všech částí obálky na *Obr. 3.2* byly lineární, častější jsou však obálky s exponenciálním průběhem náběhu, poklesu i uvolnění.

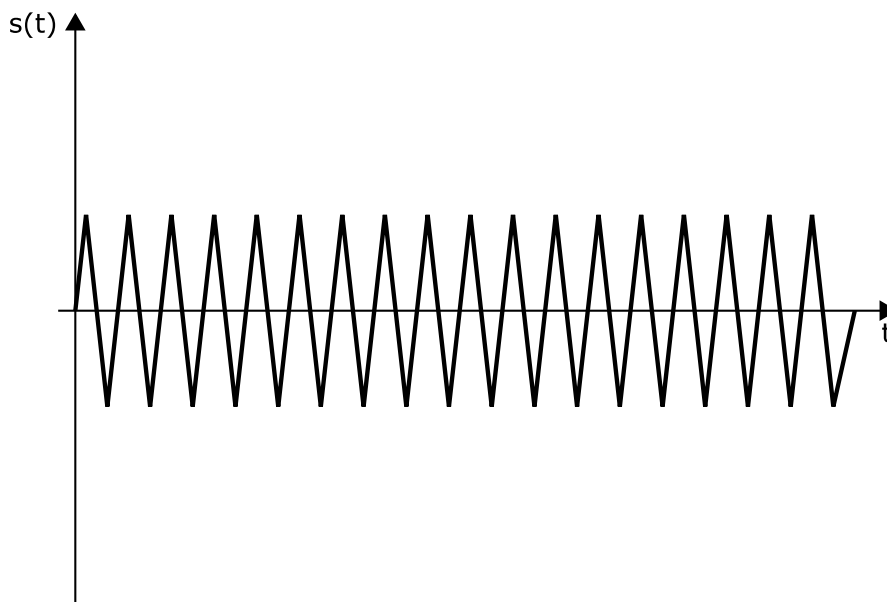
Na *Obr. 3.3* je blokové schéma úpravy úrovně signálu vycházejícího z generátoru pomocí napětím řízeného zesilovače. Do vstupu označeného jako další zdroje řídicího napětí může přicházet například signál z nízkofrekvenčního oscilátoru (LFO). Celkové řídicí napětí zesilovače by se pak rovnalo součtu signálů všech těchto zdrojů a signálu z generátoru obálky. V tomto případě však budou ostatní zdroje považovány za nulové. Blok spuštění může reprezentovat například snímač stisku klávesy či sekvencer.



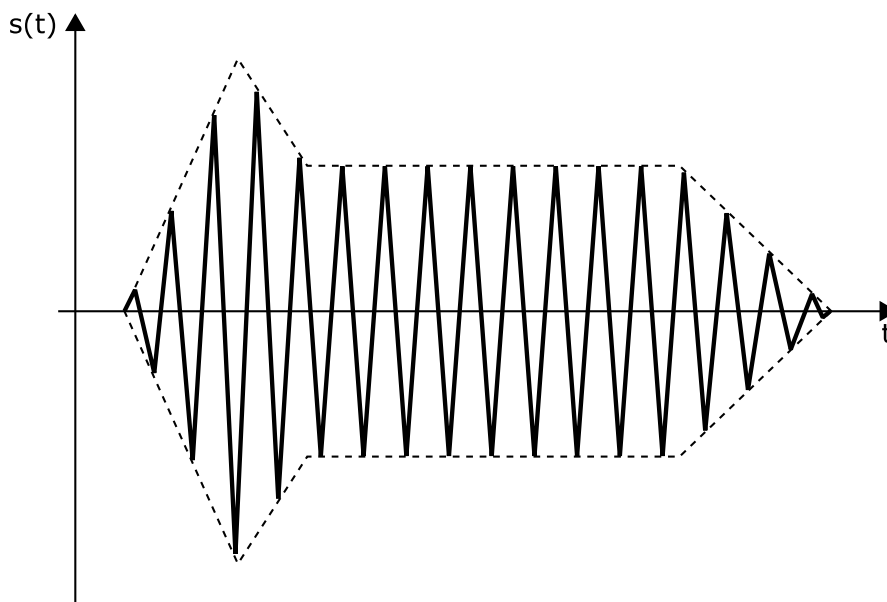
Obr. 3.3 Úprava úrovně signálu pomocí napětím řízeného zesilovače

Obr. 3.4 znázorňuje vlastní úpravu signálu. Pro demonstraci je použit signál s trojúhelníkovým časovým průběhem. Na *Obr. 3.4a* je zobrazen signál přicházející do zesilovače a na *Obr. 3.4b* signál vycházející. Přerušovanou čarou je naznačena charakteristika generátoru obálky.

a)



b)



Obr. 3.4 Časové průběhy signálu upravovaného zesilovačem řízeným generátorem obálky:
a) před zesilovačem, b) za zesilovačem

3.1 Trigger a Gate signály

U většiny analogových syntezátorů se při každém stisknutí klávesy generují (pomineme-li dynamiku) celkem tři řídicí signály. Prvním je kontrolní napětí (CV), kteréžto definuje výšku tónu a jehož velikost je závislá na tom, která klávesa byla stisknuta. Druhým signálem je signál Trigger. Jedná se o krátký impuls a je jím je spouštěna činnost různých částí syntezátoru, zejména pak právě obálkových generátorů. Posledním signálem je signál Gate. Obdobně jako v případě spouštěcího signálu má charakter logický. Na rozdíl od něj je však aktivní po celou dobu držení klávesy. Díky tomu může příslušné komponenty syntezátoru informovat o okamžiku, kdy byla klávesa uvolněna. Na *Obr. 3.5* jsou časové diagramy jednotlivých signálů. Rovněž je zde naznačen časový průběh ADSR obálky (Env). Na vertikálních osách je ve všech případech elektrické napětí.

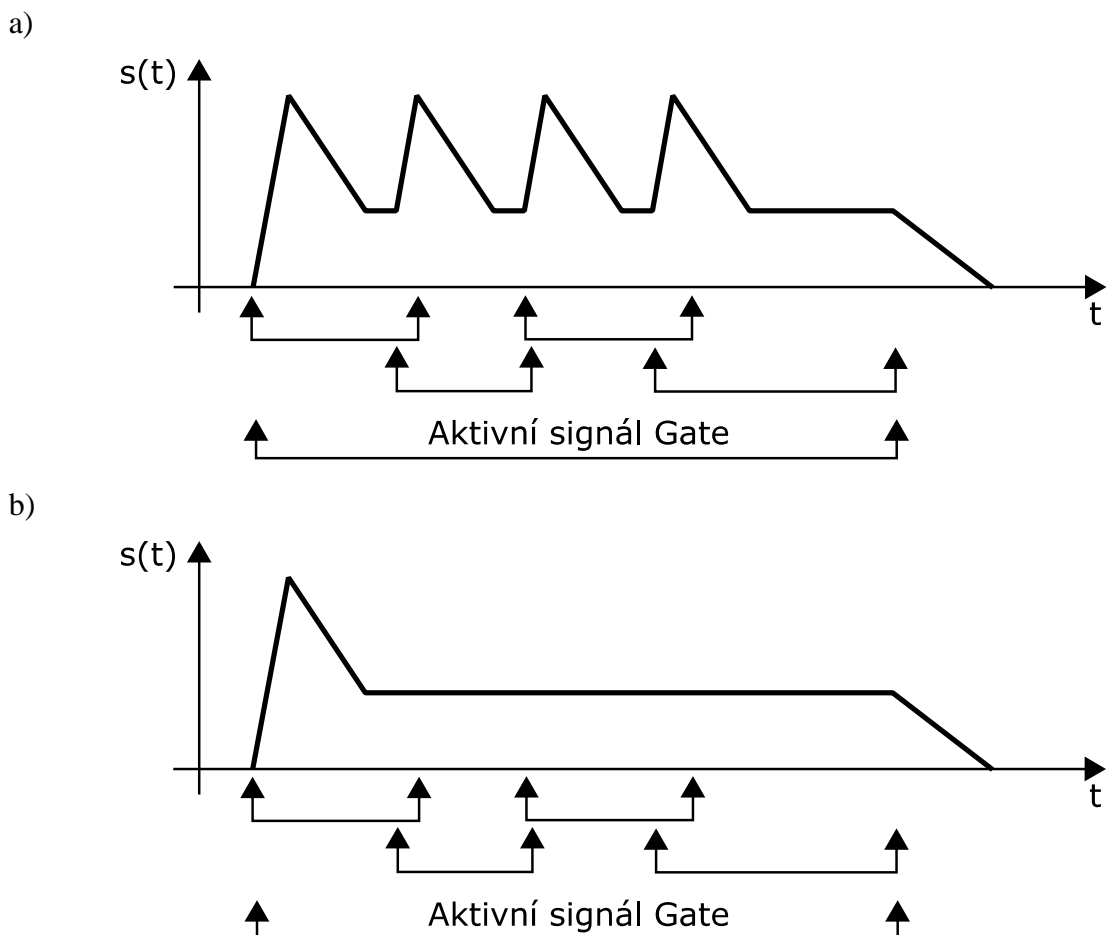


Obr. 3.5 Časové diagramy ovládacích signálů a ADSR obálky

Nyní se může nabízet otázka, proč používat signál Trigger, když jeho funkci je schopen zastávat signál Gate. Odpověď lze nalézt například při porovnávání hry na nástroje Minimoog a ARP Odyssey, a to zejména při hraní některých zvuků částečně perkusního charakteru ($A \rightarrow 0$, velká hlasitost na začátku tónu) při vyšších tempech. Nástroj ARP Odyssey signálem Trigger disponoval, Minimoog nikoli.

Na *Obr. 3.6a* je průběh ADSR obálky při hraní čtyř za sebou jdoucích not na nástroji ARP Odyssey. Jedná se o styl hraní legato, při kterémž je každá další nota zahrána ještě před dozněním noty předchozí. Každá dvojice spojených šipek pod časovou osou vymezuje časový interval, během kterého je příslušná klávesa držena. Rovněž je zde vyznačen interval, během kterého je aktivní signál Gate. Tvar obálky se zde správně při každém stisknutí klávesy opakuje i přes to, že nedosáhne koncové úrovně (tj. úrovně na konci doby uvolnění – R). Na *Obr. 3.6b* je obdobná charakteristika pro nástroj Minimoog. Žádné opětovné spouštění se zde nekoná, zvuk vykazuje dynamiku pouze na začátku hraní a zůstává konstantní až do uvolnění poslední klávesy.

I přesto mohou některé zvuky na nástroji Minimoog znít lépe než na nástroji ARP Odyssey, a to právě díky absenci opětovného spouštění. Jedná se především o flétny, neboť flétnista není schopen během hraní spojitě sekvence tónů se opakovaně nadechnout.



Obr. 3.6 Tvar ADSR obálky syntezátorů při překrývání gate signálů:
a) syntezátor ARP Odyssey, b) syntezátor Minimoog [10]

3.2 Další tvary obálek

I přes to, že ADSR obálka je nejčastěji používaná a vyhovuje velkému počtu nástrojů, může být v některých případech limitující. Omezující vlastnosti ADSR obálky jsou tyto:

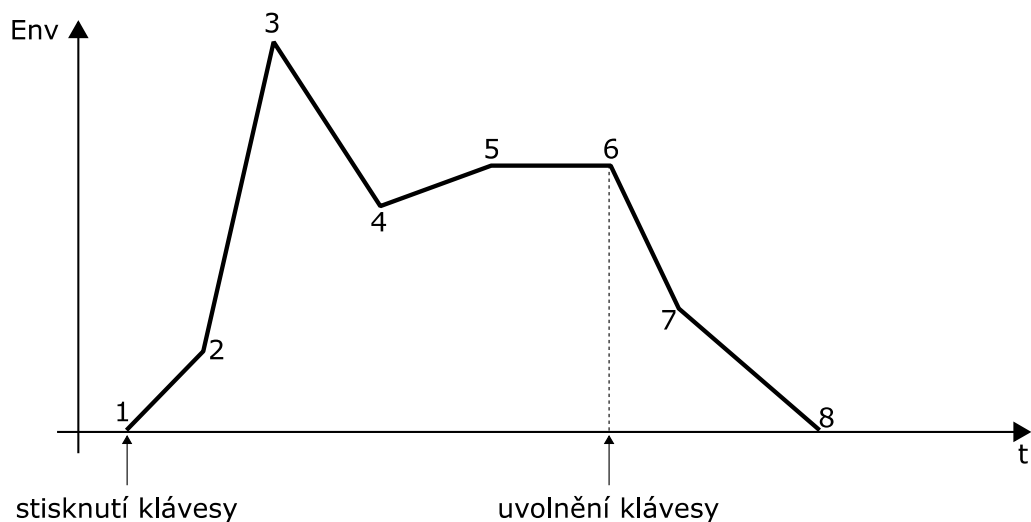
- Výstupní napětí při spuštění je nulové.
- Fáze náběhu je vždy v kladných hodnotách.
- Obálka vykazuje maximální úroveň vždy na konci fáze náběhu.
- Fáze poklesu má vždy opačný charakter vzhledem k fázi náběhu.
- Úroveň fáze podržení je rovna úrovni na konci fáze poklesu.
- Fáze podržení vykazuje vždy konstantní úroveň.
- Úroveň na začátku fáze uvolnění je rovna úrovni fáze podržení.
- Fáze uvolnění má klesající charakter.
- Výstupní napětí na konci fáze uvolnění je vždy nulové.

Kupříkladu třetí a pátý bod představuje omezení při syntetizování zvuku žesťových nástrojů. Obálka požadovaná pro tento typ nástrojů je na *Obr. 3.7*.



Obr. 3.7 Obálka zvuku žesťového nástroje [11]

Při požadavku generování složitějších obálek je v dnešní době nejvhodnější použití číslicové techniky. Lze pak nastavit téměř libovolný tvar obálky a navíc různé tvary obálek ukládat do paměti. Jednotlivé části obálky jsou uloženy v podobě čísel, z nichž je pomocí digitálně-analogového převodníku generován požadovaný průběh napětí, jímž může být řízena příslušná část syntezátoru. Lepší možností oproti hodnotám uloženým v paměti je výpočet těchto hodnot v reálném čase, přímo během hraní. Tento způsob však vyžaduje rychlejší procesory a více výpočetního výkonu. Omezení zde představuje především rozlišení D/A převodníku. Na rozdíl od generátoru obálky pracujícím na analogovém principu je zde hodnot, kterých může úroveň obálky nabývat, konečný počet. Tento počet je závislý především právě na rozlišovací schopnosti D/A převodníku, neboť se vzrůstajícím počtem bitů značně roste jeho cena, zvláště pak při současných nárocích na rychlost převodu. Příklad složitější obálky, která může být generována na číslicovém principu, je na *Obr. 3.8*. Tato obálka je jednoznačně definovaná celkem šestnácti hodnotami – jedná se o popis bodů označených v obrázku 1 až 8, a to právě dvěma údaji – časem, ve kterém se má daný zlom vyskytnout, a úrovní, které má hodnota obálky nabývat. Všechny sousední dvojice bodů je pak možné proložit úsečkami, a získat tak daný průběh. Zmíněných šestnáct hodnot je při tvorbě tvaru obálky možné uložit do paměti a následně je použít při generování obálky během hraní.



Obr. 3.8 Číslicově generovaná obálka [12]

4 Metody zvukové syntézy

Syntéza zvuku se zabývá řízeným vznikem zvuku. Během vývoje syntezátorů bylo využíváno velké množství typů zvukových syntéz. V dobách analogových nástrojů byly využívány především některé vybrané typy. Tyto typy jsou popsány v následujícím textu a bude možné je implementovat do navrhovaného zařízení.

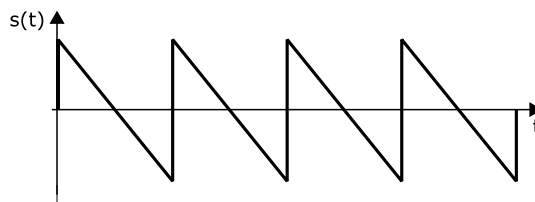
4.1 Aditivní syntéza

Aditivní neboli součtová syntéza je nejstarší metodou syntézy. Její princip spočívá v tom, že jakýkoli signál je možné interpretovat jako skupinu harmonických signálů sečtených dohromady, přičemž frekvence každého z těchto signálů je celočíselným násobkem frekvence nejnižší neboli základní. Pokud by tyto násobky nebyly celočíselné, nejednalo by se již o periodický, resp. hudební signál. Tyto signály, jejichž frekvence leží ve spektru mezi frekvencemi požadovanými, se nazývají interharmonické a značí přítomnost rušivého signálu, pronikajícího z vnějšího prostředí.

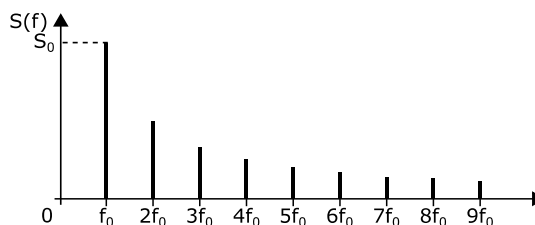
4.1.1 Princip aditivní syntézy

Základní princip aditivní syntézy lze objasnit například na signálu s pilovitým časovým průběhem – viz obr. *Obr. 4.1a, b*.

a)



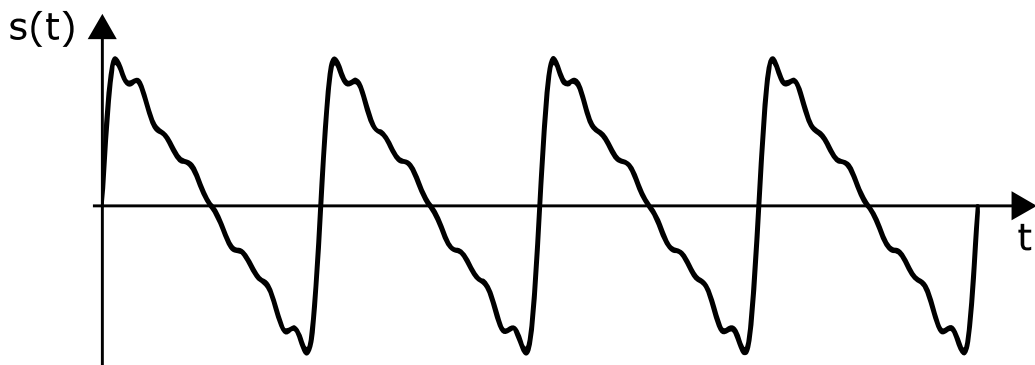
b)



Obr. 4.1 Pilovitý signál: a) časový průběh, b) frekvenční spektrum

U pilovitého signálu platí, že úroveň každé harmonické je nepřímo úměrná její frekvenci. To znamená, že pokud je úroveň základní harmonické (jejíž frekvence je označena f_0) S_0 , bude úroveň druhé harmonické $\frac{S_0}{2}$, třetí harmonické $\frac{S_0}{3}$, čtvrté harmonické $\frac{S_0}{4}$ atd. Jak si lze všimnout, body v grafu na *Obr. 4.1b* by po proložení tvořily hyperbolu (resp. jen její kladnou část), kterážto je grafem nepřímé úměrnosti. Ve skutečnosti je spektrum nekonečné, v obrázku je vyznačeno pouze prvních 9 harmonických. Aby bylo nyní možno provést syntézu signálu s tímto spektrem, musí být pro každou harmonickou vyhrazen jeden generátor sinusového signálu (oscilátor), který tuto složku bude vytvářet. Po vytvoření všech harmonických složek spektra se tyto signály sečtou, čímž vznikne požadovaný signál.

Již bylo uvedeno, že spektrum pilovitého signálu, kterýžto má být syntetizován, má nekonečně mnoho složek. Vzhledem k tomu, že oscilátorů může být vždy pouze konečný počet, je nutné spokojit se s omezením z tohoto faktu vyplývajícím. Pilovitý signál je možné pomocí aditivní syntézy pouze aproximovat, čímž dojde ke zkreslení. Při použití konečného počtu harmonických jednak nemohou vzniknout hrany kolmé k časové ose (což je v případě reálných signálů i tak nemožné – částice tvořící elektrický signál mohou mít pouze konečnou rychlost) a jednak dominantní (delší – v tomto případě sestupné) hrany nemohou mít lineární průběh. Čím je k dispozici větší množství oscilátorů, tím více spektrálních složek lze generovat a tím dokonalejší bude aproximace požadovaného signálu. Časový průběh pilovitého signálu aproximovaného pomocí devíti harmonických (viditelných ve spektru na *Obr. 4.1b*) je na *Obr. 4.2*.

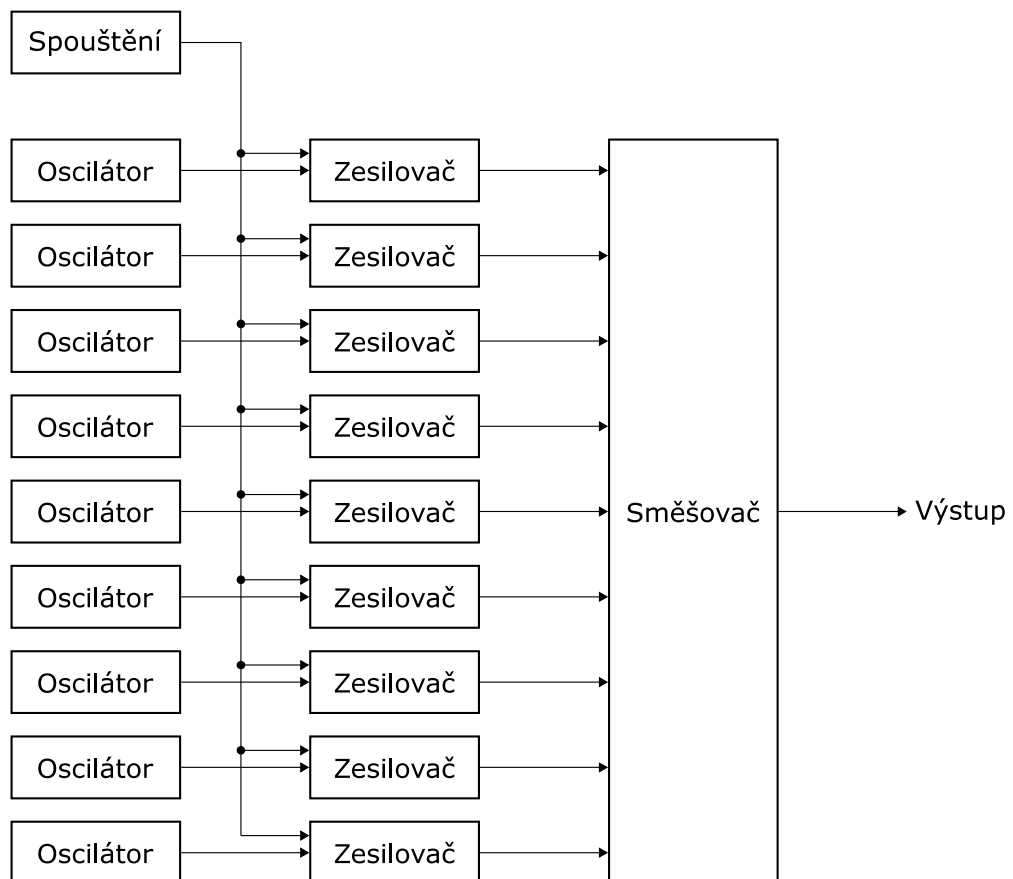


Obr. 4.2 Časový průběh pilovitého signálu aproximovaného pomocí devíti harmonických

4.1.2 Struktura aditivní syntézy

Základní blokové schéma aditivní syntézy je na *Obr. 4.3*. Každý oscilátor vytváří harmonický signál o určité frekvenci, která odpovídá jedné harmonické složce spektra výsledného signálu. Amplituda tohoto signálu je konstantní, definovaná konstrukcí oscilátoru. Signál následně vchází do napětím řízeného zesilovače. Jeho zesílení určuje úroveň příslušné harmonické a je během hraní řízeno blokem spouštění. Bloky spouštění se zabývá kapitola 3 této práce.

Pro rozšíření možností vytváření zvuků může být syntezátor pracující na principu aditivní syntézy doplněn o další generátor signálu. Tímto prvkem může být například generátor šumu s následným filtrem či vzorkovacím obvodem, případně modulátor spolu se dvěma generátory signálu realizující kruhovou modulaci. Výstup tohoto dodatečného prvku je připojen do dalšího vstupu společného směšovače a sečten s ostatními signály.



Obr. 4.3 Základní blokové schéma aditivní syntézy

4.1.3 Shrnutí aditivní syntézy

Výhodou aditivní syntézy je fakt, že hudebník má neustálou kontrolu nad celým procesem a může generovat zvuk se spektrem přesně podle svých požadavků. Její nevýhody spočívají především v konstrukční náročnosti, neboť pro dosažení uspokojivých výsledků v celém akustickém pásmu je nutné použít velký počet oscilátorů. Analogové zařízení takové velikosti pak může být značně rozměrné, drahé a navíc nespolehlivé, zejména kvůli stárnutí elektronických součástek a jejich teplotní závislosti. Tyto nevýhody je v současné době možné redukovat použitím číslicové techniky. I přesto se tato metoda příliš nerozšířila, a to v důsledku nutnosti vynaložení velké námahy pro dosažení konkrétního cíle, kterého by bylo možné při použití jiné metody dosáhnout značně rychleji, například jen změnou jednoho parametru. Navíc je někdy náhoda a nepředvídatelnost výsledku právě tou nejkreativnější a žádanou vlastností.

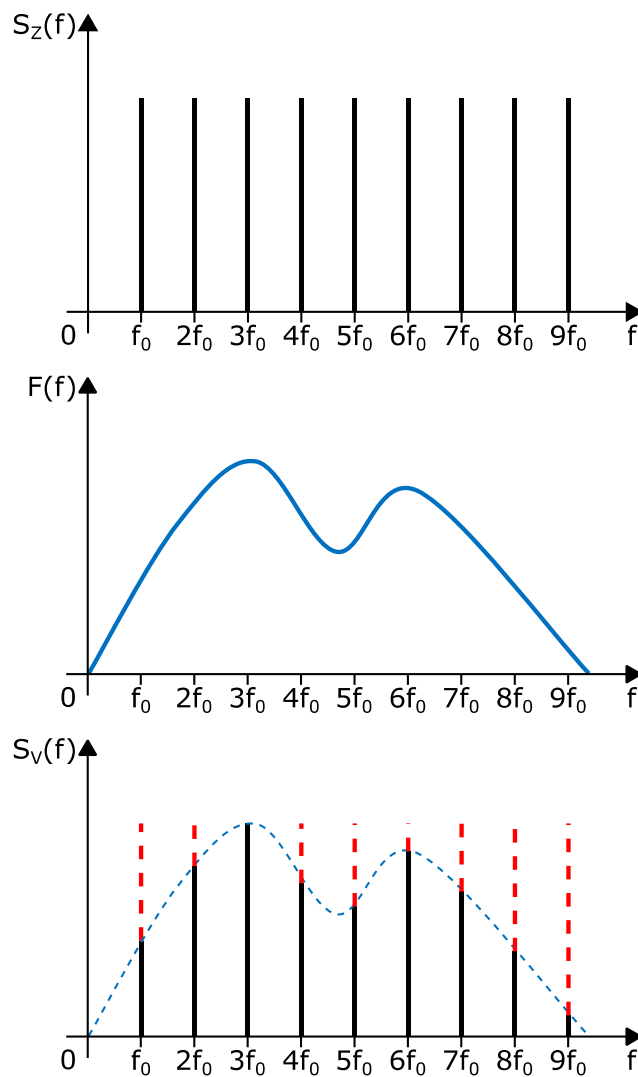
4.2 Subtraktivní syntéza

Tato metoda syntézy, zvaná také rozdílová, vychází z principu přirozeného vzniku zvuku v hudebních nástrojích. Každý akustický hudební nástroj je možné chápat jako řetězec složený ze dvou částí – zdroje zvuku a jeho modifikátoru. Na tomto principu je založena i tvorba mluveného slova. Při mluvení vzniká zvuk přirozeně v hlasivkách a tento zdroj má pulsní charakter. Pulsní signál, ať už má podobu elektrického signálu, proudu vzduchu či jakékoli jiné veličiny, má tu vlastnost, že je velmi frekvenčně bohatý, podobně jako signál pilovitý. Vzduch prochází rezonančními dutinami (nosními, hrdelními a ústními) a dále překážkami (jazyk, rty a zuby). Tyto orgány je možné chápat jako řízené filtry, které tvarují průběh akustického tlaku přicházejícího z hlasivek [1]. Dalším příkladem může být hra na klavír, kdy hráč tisknutím kláves uvádí do pohybu kladívka, která rozechvívají struny. Zvuk, které struny produkují, se následně šíří uvnitř korpusu klavíru a vychází z otvorů v korpusu do okolního prostředí. Korpus je možné chápat opět jako rezonátor, který tvaruje spektrum zvukového signálu produkovaného strunami. Podobnou analogii lze nalézt v dalších nástrojích, jako je třeba kytara nebo dechové nástroje.

4.2.1 Princip subtraktivní syntézy

Základní princip vytváření zvuku pomocí subtraktivní syntézy z hlediska popisu elektrických signálů ve spektru vysvětluje *Obr. 4.4*. Na prvním obrázku je spektrum frekvenčně bohatého signálu, který bude sloužit jako zdroj zvuku. Spektrum tohoto signálu je diskrétní, jedná se tedy o signál hudební, resp. periodický. Jeho harmonické složky jsou označeny stejným způsobem jako na *Obr. 2.2*.

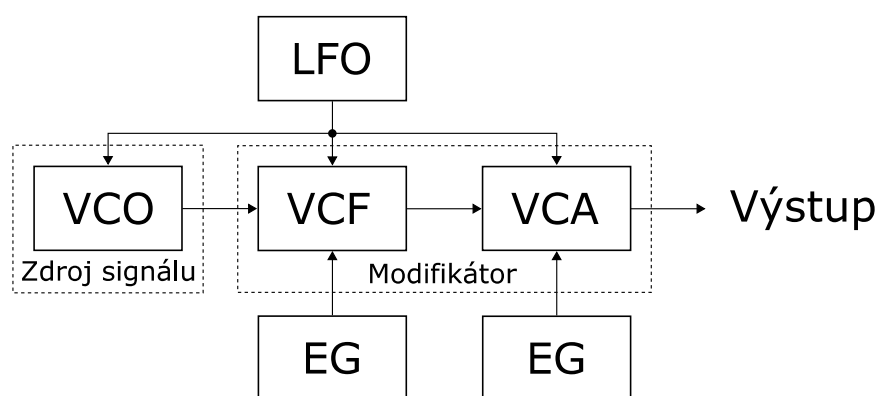
Na druhém obrázku je frekvenční charakteristika elektrického filtru, pomocí kterého má být signál upravován. Na posledním obrázku je spektrum výsledného signálu. Přerušované červené čáry označují, o jaké úrovni byly utlumeny jednotlivé harmonické zdrojového signálu. Černé čáry ve stejném obrázku znázorňují tvar spektra výstupního filtrovaného signálu.



Obr. 4.4 Princip subtraktivní syntézy: signál a jeho řízená filtrace [1]

4.2.2 Struktura subtraktivní syntézy

Základní blokové schéma subtraktivní syntézy je na *Obr. 4.5*. Prvním blokem je napětím řízený oscilátor generující frekvenčně bohatý signál. Mohou být použity signály s obdélníkovým, pilovitým, trojúhelníkovým nebo impulsním časovým průběhem (viz kap. 2.1), jejichž spektrum obsahuje velké množství vyšších harmonických, případně generátory šumu (kap. 2.2). Tento signál vstupuje do napětím řízeného filtru, ve kterémž jsou potlačovány nebo naopak zvýrazňovány vybrané harmonické složky signálu. Filtrovaný signál je nakonec zesílen pomocí napětím řízeného zesilovače. Zbývající bloky slouží k dynamické změně parametrů zdroje signálu i jeho modifikátorů.



Obr. 4.5 Základní blokové schéma subtraktivní syntézy

4.2.3 Filtry pro subtraktivní syntézu

O frekvenčních filtrech pojednává kapitola 2.4 této práce. Takovéto typy filtrů však nejsou pro realizaci subtraktivní syntézy postačující, neboť jejich možnosti jsou značně omezené. Protože filtr tvoří základ celého principu subtraktivní syntézy, musí být tvar jeho amplitudové frekvenční charakteristiky v širokých mezích nastavitelný. Tyto podmínky splňují rezonanční filtry. V subtraktivní syntéze se používají zásadně rezonanční filtry typu dolní propust.

Vlastnosti rezonančních filtrů

Mezní frekvence

Mezní frekvence rezonančního filtru typu dolní propust (dále jen filtru) se nachází na pomezí propustného a útlumového pásma. Harmonické složky vstupního signálu, které se nacházejí v propustném pásmu, projdou filtrem a objeví se na jeho výstupu. Harmonické složky nacházející se v nepropustném pásmu filtr potlačí.

Strmost

Strmost filtru udává, jak prudký je pokles (vzrůst) jeho amplitudové přenosové charakteristiky v nepropustném pásmu. Čím větší je strmost filtru, tím více jsou frekvence v útlumovém pásmu potlačeny. Strmost je závislá na počtu pólů přenosové funkce filtru (podrobnější vysvětlení přenosové funkce filtru - viz např. literaturu [2]). Každý pól přenosové funkce zvyšuje strmost o 6 dB na oktávu. Strmost (počet pólů) rovněž definuje řád filtru.

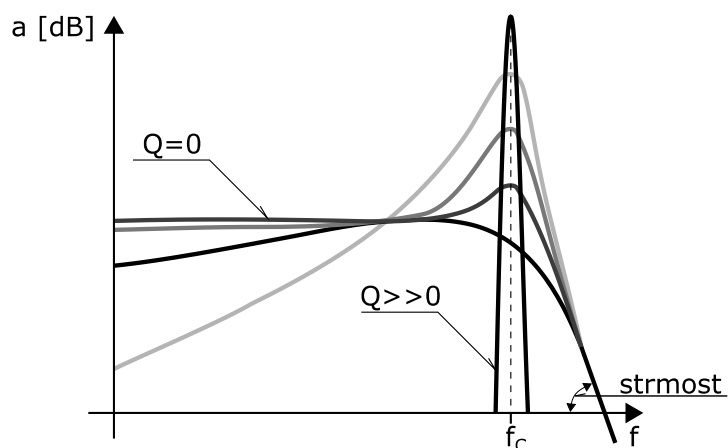
Rezonance

Pomocí rezonance je možné zvýraznit či potlačit úroveň signálu o frekvencích v okolí hodnoty mezní frekvence filtru. Pokud je rezonance větší než 0, objeví se na amplitudové frekvenční charakteristice v této oblasti překmit, svědčící o nárůstu přenosu filtru. Pokud je hodnota rezonance nastavena velmi vysoko, může se filtr sám od sebe rozkmitat, a to i bez přítomnosti jakéhokoli vstupního signálu, a pracovat tak jako samostatný oscilátor (proto rezonanční filtr) produkující harmonický signál, který je naladěný na mezní frekvenci filtru. V tomto případě teoreticky na výstup filtru neprojde žádný signál přiváděný na jeho vstup. Tuto vlastnost však mají jen některé filtry. Většina filtů část vstupního signálu propustí a výsledkem je specifický zvuk. Nejzajímavější je však provozování filtru na hranici vlastních oscilací. Takto nastavený filtr může vytvořit množství „nepřirozených“ zvuků, charakteristických pro elektronické syntezátory. Rezonance se označuje Q .

Vliv rezonance na tvar amplitudové frekvenční charakteristiky filtru typu dolní propust ilustruje *Obr. 4.6*. Je zde také vyznačena strmost filtru a jeho mezní frekvence. V praxi se objevuje problém spočívající v nastavování jednotlivých parametrů filtru tak, aby se vzájemně neovlivňovaly [3].

Filtry je rovněž možné navzájem kombinovat. Při použití většího množství pásmových propustí lze zvýraznit v signálu formanty, a napodobit tak zvuk lidského hlasu nebo některých tradičních hudebních nástrojů.

Závěrem této části lze konstatovat, že filtry jsou nejdůležitějšími komponenty analogových syntezátorů pracujících na principu subtraktivní syntézy a zásadně rozhodují o charakteru jejich zvuku. Pokud bychom například použili oscilátor ze syntezátoru značky Moog a signál z jeho výstupu upravili pomocí filtru z nástroje značky Korg, bude výsledný zvuk znít, jako by byl celý vytvářen nástrojem značky Korg [5].



Obr. 4.6 Amplitudová frekvenční charakteristika samokmitajícího filtru s různými úrovněmi rezonance [4]

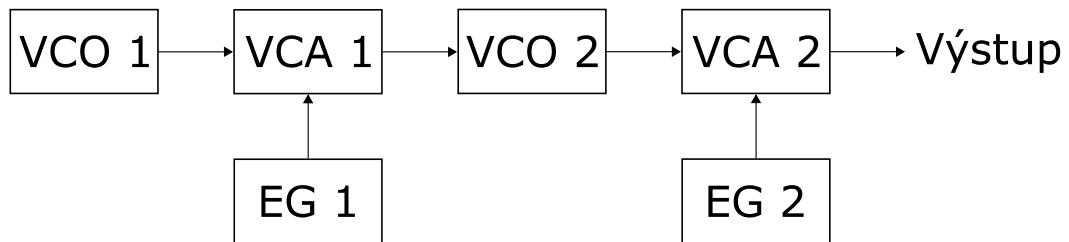
4.2.4 Shrnutí subtraktivní syntézy

Subtraktivní syntéza se stala v oblasti komerčně vyráběných analogových syntezátorů nejvíce rozšířenou. Její výhoda spočívá zejména v jednoduché konstrukci nástroje a snadném ovládní, vyplývajícím z využití principu přirozené tvorby zvuku v hudebních nástrojích. K jejím nevýhodám patří zejména nemožnost aktivního zásahu do struktury zpracovávaného signálu, neboť jeho spektrální složky jsou pouze zvýrazňovány a potlačovány. Proto bývá doplňována o modulace signálu, obdobně jako aditivní syntéza.

4.3 FM syntéza

4.3.1 Princip FM syntézy

Principem FM syntézy je frekvenční modulace signálu jednoho oscilátoru signálem jiného oscilátoru. Tímto způsobem vznikají zcela nové harmonické frekvence, které se přidávají k původnímu signálu modulovaného oscilátoru. Základní princip je demonstrován pomocí blokového schématu na *Obr. 4.7*.



Obr. 4.7 Princip FM syntézy

V tomto případě je frekvence oscilátoru VCO 2 modulována signálem VCO 1. Rovněž se zde nacházejí zesilovače a generátory obálek obdobně jako v případě subtraktivní syntézy. Filtry zde však používány nejsou.

4.3.2 Spektrum signálu

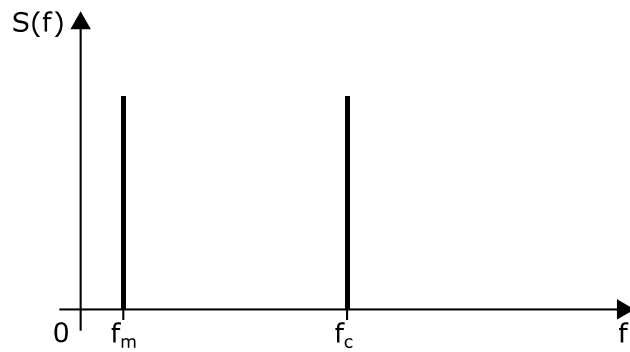
U FM syntézy se nejčastěji používají signály s harmonickým časovým průběhem stejně jako u syntézy aditivní. Výsledný signál má v případě FM syntézy však mnohem složitější spektrum, a to i v případě použití pouze dvou oscilátorů.

Uvažujme například harmonický nosný signál o frekvenci f_c a harmonický modulační signál o frekvenci f_m . Spektrum výsledného signálu pak bude tvořeno nosným signálem a dalšími složkami, jejichž frekvence jsou vzdálené od nosného signálu vždy o celočíselný násobek frekvence signálu modulačního:

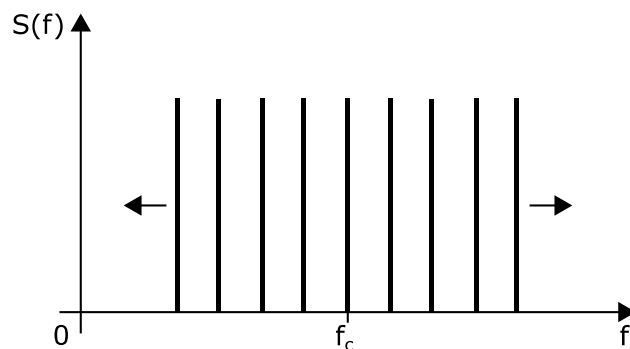
$$f_{sb} = f_c \pm n \cdot f_m \quad (4.1)$$

Frekvence modulačního a nosného signálu jsou vyneseny do grafu na *Obr. 4.8a*. Polohy harmonických složek ve spektru signálu vytvořeného pomocí FM modulace jsou na *Obr. 4.8b*. Podle vztahu (4.1) je těchto harmonických nekonečně mnoho. Ve skutečnosti je spektrum omezeno šířkou pásma komponentů, ze kterých je syntezátor fyzicky sestaven.

a)



b)



Obr. 4.8 Pozice harmonických složek signálu vytvořeného pomocí FM modulace:

a) modulační a nosný signál, b) výstupní signál

Amplitudy spektrálních složek

Pro zjištění tvaru spektra výsledného signálu je nutné uvést další parametr, týkající se frekvenční modulace, a to index modulace, značený β . Tento parametr je definován následujícím vztahem:

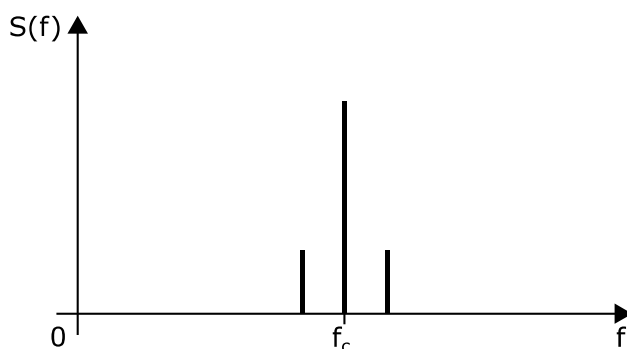
$$\beta = \frac{\Delta f_c}{f_m} \quad (4.2)$$

kde Δf_c je frekvenční zdvih a f_m frekvence modulačního signálu. Frekvenční zdvih je maximální změna frekvence nosného signálu během modulace a je přímo závislá na velikosti amplitudy signálu modulačního.

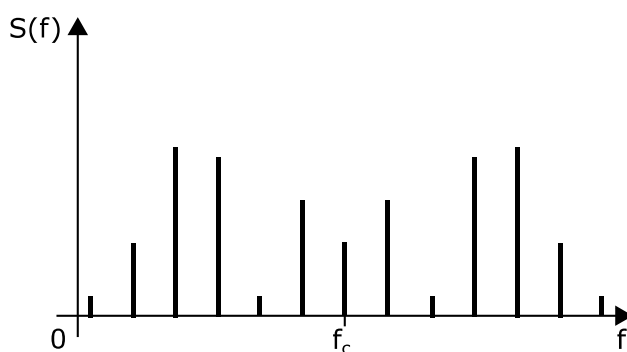
Pokud je hodnota indexu modulace nízká (např. menší než 0,1), je v signálu přítomna pouze frekvence nosného signálu a dvě okolní harmonické. Tento případ je na Obr. 4.9a. V případě významně vyšší hodnoty (např. 5) obdržíme velmi bohaté spektrum s množstvím frekvencí v postranních pásmech (Obr. 4.9b). V grafu si lze rovněž všimnout faktu, že nosná frekvence je v signálu přítomna v mnohem nižší úrovni. Je dokonce možné najít hodnotu β , při které nosná frekvence zmizí ze spektra kompletně. Výpočet přesných hodnot úrovní

jednotlivých harmonických je složitý a je k němu zapotřebí matematický prostředek zvaný Besselova funkce.

a)



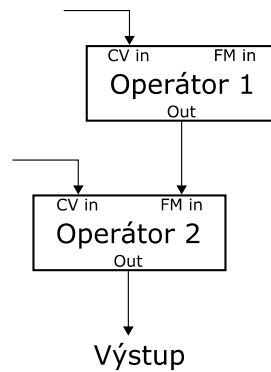
b)



Obr. 4.9 Spektrum frekvenčně modulovaného signálu: a) nízký index modulace, b) vysoký index modulace

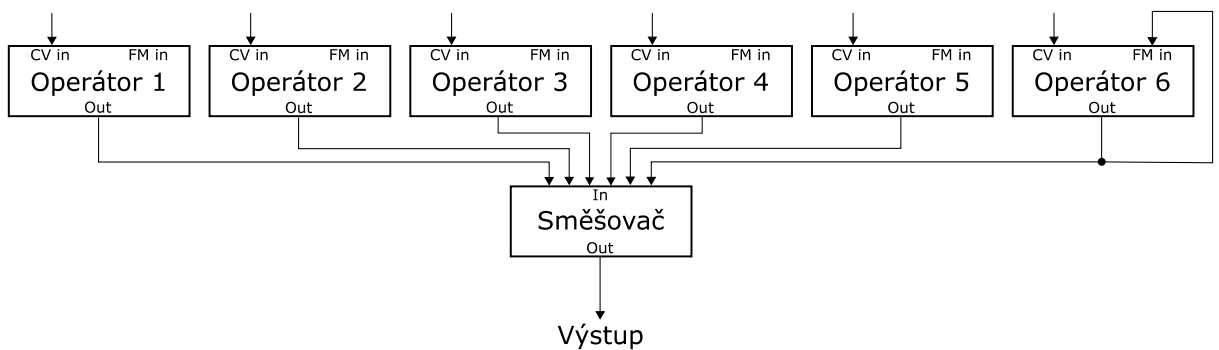
4.3.3 Algoritmy FM syntézy

Nejjednodušší FM syntezátor lze sestavit ze dvou oscilátorů a příslušných dalších komponentů (VCA, EG), přičemž jeden bude sloužit jako generátor nosné frekvence a druhý jako modulátor. Nicméně FM syntéza se stane flexibilní metodou až při vyšším počtu modulů. Potom je tyto moduly možné navzájem propojovat a vytvářet tak různé struktury. Tyto struktury se nazývají algoritmy. Při grafickém znázorňování algoritmů FM modulace pomocí jednotlivých modulů (viz Obr. 4.7) by byla výsledná schémata velmi rozsáhlá a nepřehledná. Proto se u FM modulace zavádí pojem operátor. Každý operátor je struktura tvořená jedním oscilátorem, jedním zesilovačem a jedním generátorem obálky. Blokové schéma z Obr. 4.7 by pak mělo podobu Obr. 4.10. Napětí přivedené na vstupy CV in určuje statickou frekvenci výstupního signálu operátoru, tj. frekvenci, na které oscilátor kmitá, aniž by byl jakkoli modulován. FM in je modulační vstup operátoru.



Obr. 4.10 Jednoduchý algoritmus FM syntézy

Základní algoritmus šestioperátorového FM syntezátoru je na Obr. 4.11. V souvislosti s nástrojem Yamaha DX7 je označován jako „varhanní“. Jedná se o prosté sečtení signálů jednotlivých operátorů. Žádná modulace se zde neuplatňuje, algoritmus vlastně představuje formu aditivní syntézy.

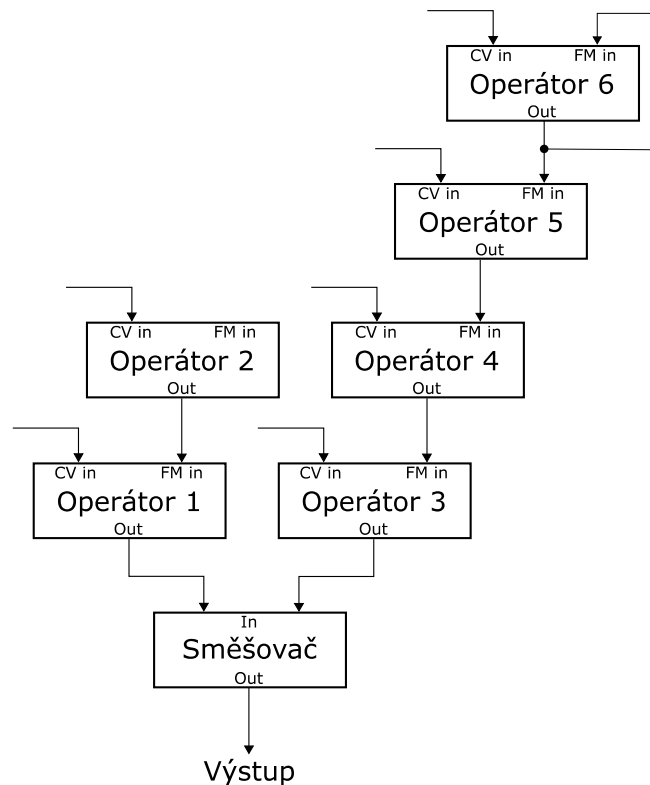


Obr. 4.11 Základní algoritmus FM syntézy s šesti operátory

Složitější algoritmus se šesti operátory ukazuje Obr. 4.12. Operátor 2 zde pracuje jako modulátor operátoru 1, kterýžto zastává funkci generátoru nosné. Zároveň s tím operátor 6 je modulátorem pro operátor 5, ten je modulátorem pro operátor 4. Operátor 3 zde zastává funkci druhého generátoru nosné a je modulován operátorem 4. Výstupní signály obou generátorů nosných frekvencí jsou následně sečteny za pomoci běžného směšovače. Další algoritmy lze nalézt například na již zmiňovaném nástroji Yamaha DX7. Seznam těchto algoritmů je uveden v příloze této práce [6].

V algoritmech na Obr. 4.11 a Obr. 4.12 má operátor 6 zavedenou zpětnou vazbu – moduluje sám sebe. Takovéto zpětnovazební symyčky dramaticky změni charakter signálu produkovaného tímto operátorem. Uvažujme například, že operátor sám o sobě generuje signál s frekvencí 100 Hz. Z důvodu existence zpětné vazby je tím samým signálem modulován. Výsledkem je signál s bohatým spektrem tvořeným všemi harmonickými, jejichž

frekvence jsou dány celočíselnými násobky 100 Hz. Tímto způsobem je možné vytvořit generátor pilovitého průběhu.



Obr. 4.12 Složitější algoritmus FM syntézy s šesti operátory

4.3.4 Shrnutí FM syntézy

FM syntéza nebyla v komerční sféře příliš rozšířena, neboť je velmi těžké (u složitějších algoritmů prakticky nemožné) předvídat charakter výsledného zvuku. Nicméně několik vyráběných syntezátorů tuto metodu používalo. Velmi dobře je možné ji vytvořit virtuálně – počítačovým modelem – neboť k její realizaci je zapotřebí relativně málo výpočetního výkonu [7].

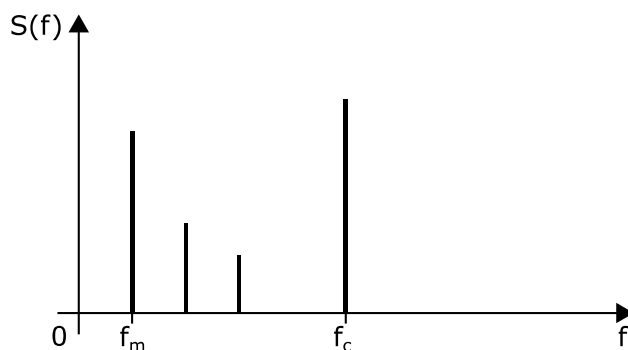
4.4 DSB-SC modulace

Tento druh modulace nebývá využíván jako samostatná metoda syntézy, je však možné jím vhodně doplnit syntezátor pracující na principu aditivní či subtraktivní syntézy. Jedná se o amplitudovou modulaci s potlačenou nosnou frekvencí (Dual Side Band, Suppressed Carrier – dvě postranní pásma).

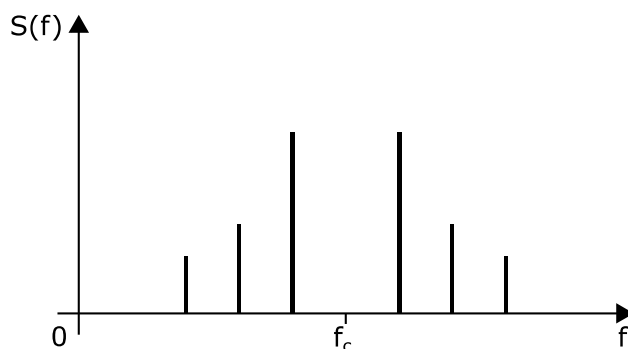
DSB-SC modulace je založena na principu násobení dvou signálů. Pro modulaci je používán kruhový modulátor. Na výstupu modulátoru se objevuje součtová a rozdílová složka obou signálů, přičemž původní signály jsou potlačeny. Na *Obr. 4.13a* jsou spektra vstupních signálů. Příklad je uveden pro harmonický nosný a neharmonický modulační signál (například první tři harmonické pilovitého průběhu). f_c je frekvence nosného harmonického signálu a f_m základní harmonická modulačního neharmonického signálu. Spektrum výsledného signálu je na *Obr. 4.13b*.

Pokud by modulační i nosný signál měly neharmonický časový průběh, vznikl by na výstupu modulátoru signál s velmi složitým spektrem, neboť by se všechny harmonické složky modulačního a nosného signálu mezi sebou násobily. DSB-SC modulace je užitečná při syntéze některých perkusních nástrojů, například zvonů.

a)



b)



Obr. 4.13 Spektrum signálu při DSB-SC modulaci: a) vstupní signály, b) výstupní signál

5 Návrh syntezátoru

Cílem práce má být návrh syntezátoru, který obsahuje především subtraktivní syntézu s případnou rozšiřitelností o metody ostatní. Také je požadována v rámci každé metody implementace určitého stupně polyfonie a schopnosti hraní více různě znějících zvuků současně (angl. multitimbrality). Zejména je však cílem možnost plně číslicového řízení syntezátoru. Při tom lze vycházet z tradiční koncepce modulárních syntezátorů.

5.1 Tradiční koncepce

5.1.1 Moduly

Základní koncepcí modulárních analogových syntezátorů (dále jen syntezátorů) je syntezátor, jehož elementárními prvky představují jednotlivé bloky příslušné metody syntézy, případně některé další.

Každý modul je možné logicky rozdělit na dvě části. První částí je deska plošného spoje. Na ni jsou umístěny veškeré elektronické komponenty potřebné pro funkci daného modulu. Tato deska je při montáži modulu umístěna do vnitřní strany skříně a pro uživatele je nedostupná. Musí však být připojena (kabelem) na příslušný konektor napájecího systému syntezátoru.

Druhou částí modulu je uživatelské rozhraní. Toto rozhraní je po umístění modulu do skříně viditelné a dostupné uživateli. Deska tvořící základovou část rozhraní je na horním a dolním okraji opatřena otvory pro montáž do skříně. Při konkrétní realizaci modulu je tato deska zpravidla kolmá na desku plošného spoje.

5.1.2 Ovládání

Aby syntezátor tradiční koncepce mohl vytvářet zvuk požadovaných vlastností, je nutné nejprve sestavit strukturu syntézy. Struktura je vždy realizována propojením jednotlivých bloků pomocí kabelů. Potřebné délky kabelů jsou závislé na velikosti syntezátoru. Jednoduchý princip subtraktivní syntézy podle *Obr. 4.5* je možné realizovat propojením několika modulů podle *Obr. 5.1*. Barevné čáry představují jednotlivé propojovací kabely.

Syntezátor je řízen protokolem MIDI. Obrázek ilustruje jednotlivé moduly (zleva):

- převodník rozhraní MIDI na ovládací signály syntezátoru,
- modul pro spojení více kabelů do jednoho místa. Jedná se v podstatě o několik skupin navzájem vodivě propojených konektorů,
- napětím řízený oscilátor,
- napětím řízený univerzální filtr,
- dva generátory obálek,
- napětím řízený zesilovač.

Nízkofrekvenční oscilátor není v tomto příkladu použit.

Kromě prvních dvou obsahují všechny moduly ovládací prvky – potenciometry. Pomocí nich je možné nastavit počáteční hodnoty příslušných veličin, jež jsou charakteristické pro daný modul. Počátečními hodnotami jsou myšleny hodnoty statické, definované při určitých podmínkách. Může se jednat například o frekvenci oscilátoru při nulovém nebo jinak definovaném řídicím napětí. Zejména důležitá je tato funkce u generátorů obálek, neboť tyto moduly nemohou být jiným způsobem řízeny, nýbrž pouze spouštěny a zavírány. V příkladu na obrázku se tak děje pomocí signálu MIDI rozhraní – propojení pomocí kabelů reprezentovaných zelenými čarami. Řízením generátoru obálky je myšleno nastavování požadovaných hodnot jednotlivých úseků generované obálky – viz kapitolu popisující ADSR obálku.



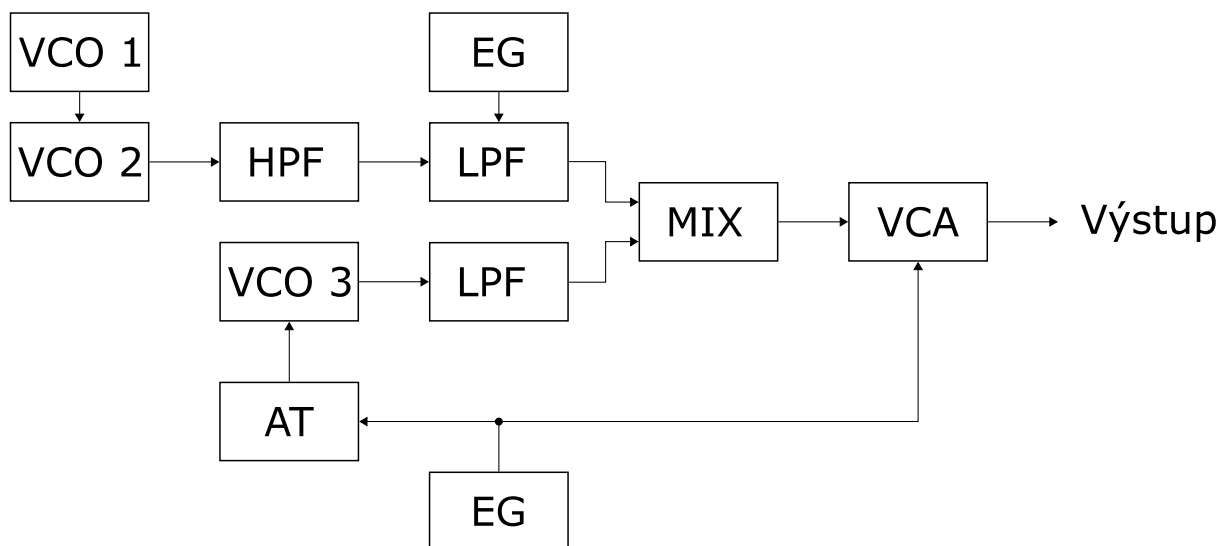
Obr. 5.1 Základní princip subtraktivní syntézy řešený modulárním syntezátorem v tradiční podobě [11]

5.1.3 Hlavní možnosti syntezátoru

Obr. 5.1 znázorňuje pouze malý zlomek modulů, které syntezátor obvykle obsahuje. Nejčastější rozšíření představuje přítomnost velkého počtu filtrů s navzájem různými vlastnostmi. Tyto filtry je možné mezi sebou vzájemně zaměňovat či kombinovat. Tímto způsobem lze počet možných generovaných zvuků značně rozšířit, neboť filtr se na charakteru výsledného zvuku podílí nejvíce (viz kapitolu o subtraktivní syntéze).

Další možností je přidání libovolného počtu oscilátorů. Typická hodnota pro rozsáhlejší systémy je 5. Takto lze realizovat například primitivní podobu aditivní syntézy nebo FM syntézu. FM syntéza se však v tomto případě téměř vůbec nepoužívá, použití nachází pouze jako dopňková metoda, kde je modulován hlavní oscilátor subtraktivní syntézy.

Obr. 5.2 ukazuje použití vyššího počtu modulů pro realizaci syntézy basového bubnu. Při syntéze jsou použity tři oscilátory, přičemž dva z nich (VCO 1 a VCO 2) jsou spojeny a vytvářejí FM modulaci. Rovněž zde nalezly uplatnění celkem tři filtry. Generátor obálky pro VCA je zde výjimečně použit po utlumení atenuátorem (AT) i pro ovládání frekvence oscilátoru VCO 3. Toho zpravidla není možné docílit pomocí jiné koncepce. Oba generátory obálek mají AR charakteristiku, přičemž fáze A je mnohem kratší než fáze R. Protože syntezátory obsahují téměř výhradně obálkové generátory typu ADSR, je nutné upravit ovládání těchto generátorů, a to tak, aby reagovaly pouze na stisk klávesy, nikoli na držení. Fáze S by se při syntéze basového bubnu (a obecně perkusních nástrojů) uplatňovat neměla, nebo jen po velmi krátkou dobu.



Obr. 5.2 Propojení modulů při syntéze basového bubnu [12]

5.1.4 Výhody a nevýhody tradiční koncepce

Syntezátor tradiční koncepce může být velmi univerzálním nástrojem a uživatel si jej při dostatečných finančních a prostorových prostředcích může sestavit přesně podle svých představ. Při velkém počtu modulů se však stává velmi rozměrným zařízením a jeho ovládání pak může být značně náročné. Další nevýhodou je fakt, že tyto syntezátory bývají konstruovány zpravidla jako monofonní.

5.2 Tradiční koncepce s číslicovým ovládáním

Jistého vylepšení lze dosáhnout zavedením číslicového ovládání jednotlivých modulů. Celý syntezátor by tak bylo možné řídit z jednoho místa, například pomocí dotykového displeje. Úprava by spočívala v rozvedení řídicí digitální sběrnice po celém syntezátoru. Pro rozsáhlejší systém, kterýmž syntezátor obvykle bývá, je nejvhodnější použití některé z průmyslových sběrnic, mezi které patří RS485, CAN nebo Ethernet, neboť ty jsou uzpůsobeny pro provoz na delší vzdálenosti a jsou odolné proti rušení. Protokol implementované sběrnice by měl zahrnovat Network Management, který by umožňoval automatické rozpoznání přidaného či odebraného modulu bez nutnosti aktivního zásahu uživatele do sítě. Nemusí být však nezbytně nutné rozpoznání modulu během funkce syntezátoru (tzv. hot plug), bylo by postačující inicializování prvku až po opětovném zapnutí (resetu) systému. Důležité je uvážení možností sítě z hlediska maximálního počtu připojených uzlů. Kupříkladu na jeden segment sběrnice RS485 je možné připojit pouze 32 stanic, při vyšším počtu je nutné použít opakovače. Opakovače však mohou být potřebné i v případě použití sběrnice CAN, a to zejména při sestavování sítě rozvětvené topologie. Nevýhoda použití opakovačů obecně spočívá především v zanášení zpoždění do sítě. To však v akustických aplikacích není příliš podstatné.

U této koncepce musí být každý modul osazen mikroprocesorem, který podporuje protokol použité sběrnice. Rovněž musí na každém modulu být přítomen budič dané sběrnice. Dále je nutné každý digitálně řízený modul doplnit alespoň jedním digitálně – analogovým převodníkem s odpovídajícím rozlišením a modul kalibrovat tak, aby jeho vlastnost mohla být číslicově ovládána v požadovaném rozsahu. Vzhledem ke kombinaci analogové a číslicové techniky je zde nutné uvážit rušení analogových obvodů syntezátoru řídicími signály ze sběrnice. U takovýchto systémů je zpravidla používáno dvojího napájení – jednak pro analogovou část (nejčastěji symetrické ± 15 V) a jednak pro digitální část – přičemž rozvody napájení analogových obvodů musí být dostatečně prostorově vzdáleny od vodičů pro digitální signály. Také zde stále zůstává jedna z nevýhod modulárních analogových syntezátorů, a to nutnost propojování modulů pomocí kabelů.

Jednou z výhod této koncepce je kromě číslicového řízení i fakt, že lze vytvořit jakýkoli tvar obálky signálu, neboť obálku samotnou je v tomto případě již možné rovněž generovat číslicově.

5.3 Semi-modulární řešení

Při požadavku snadného a pokud možno výhradně číslicového ovládání představuje jediné východisko omezení možnosti propojování modulů. V rámci jednoho bloku je tak možné sestavit skupinu modulů, které půjdou mezi sebou určitým způsobem propojovat, a tyto bloky budou spojovány do větších celků. V této části bude také uvažována problematika polyfonie a schopnosti hraní většího množství různých zvuků zároveň (angl. multitimbrality). Dále zde budou diskutovány možnosti začlenění ostatních metod analogové syntézy.

5.3.1 Subtraktivní syntéza

V souvislosti s možnostmi subtraktivní metody syntézy nejprve zmiňme jeden z komerčně vyráběných (nemodulárních) analogových syntezátorů – nástroj Alesis Andromeda A6. Nejedná se vlastně o čistě analogový syntezátor, nýbrž o syntezátor hybridní koncepce. Číslicově jsou řešeny generátory obálek, ale také nízkofrekvenční oscilátory (LFO). Komponenty přímo související s generováním a úpravou zvukového signálu („audio cesta“) však zůstaly analogové.

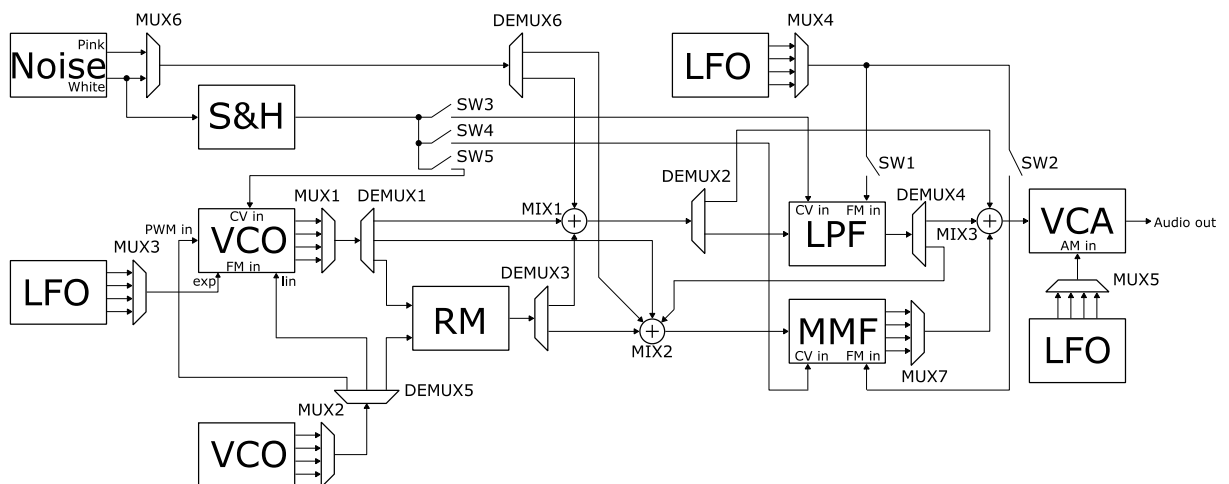
Zmiňovaný syntezátor byl nejen polyfonní, ale navíc multitimbrální. Podle potřeby bylo možné mezi stupni těchto vlastností přepínat. Celkově byl syntezátor schopen hrát 16 zvuků současně. Mohl tak vzniknout například nástroj schopný vytvářet zvuk čtyř různých současně hrajících nástrojů, přičemž každý z těchto nástrojů mohl mít maximálně čtyřhlasou polyfonii. Syntezátor disponoval následujícími počty jednotlivých prvků syntézy:

- 32 VCO (2 pro každý hlas)
- 16 kruhových modulátorů (1 pro každý hlas)
- 1 generátor šumového signálu
- 32 VCF (2 pro každý hlas – 1 LPF – čtyřpólový a 1 MMF – dvojpólový)
- 48 LFO (3 pro každý hlas)
- 16 S&H (1 pro každý hlas)
- 48 EG (3 pro každý hlas)

Diskutujeme nyní možné struktury pracující na principu subtraktivní syntézy, které by se z těchto komponentů daly pro jeden hlas sestavit:

- použít jediný VCO jako generátor zdrojového signálu nebo jej pomocí druhého oscilátoru rozladit a realizovat tak frekvenční modulaci,
- oba VCO připojit na vstupy kruhového modulátoru a realizovat tak DSB-SC modulaci,
- použít šum jako zdrojový signál,
- zvolit jeden ze dvou typů filtrů či je navzájem kombinovat,
- použít samostatný LFO pro oscilátory, další pro filtry a poslední pro zesilovač
- pomocí vzorkovacího obvodu vzorkovat šumový signál a jím následně řídit ostatní komponenty syntezátoru.

Navrhovaná koncepce realizace jednoho hlasu subtraktivní syntézy pro jeden hlas je znázorněna pomocí blokového schématu na *Obr. 5.3*. Generátory obálek nejsou pro jednoduchost vyznačeny.



Obr. 5.3 Navrhovaná koncepce jednoho hlasu subtraktivní syntézy

Pomocí prvků znázorněných v obrázku pomocí symbolů multiplexorů nebo demultiplexorů je možné sestavovat různé cesty signálů, a realizovat tak funkci propojovacích kabelů, i když jen v omezeném rozsahu. V následujícím textu je popsána funkce jednotlivých spínačů.

- Přepínače MUX1 až MUX5 jsou připojeny na výstupy oscilátorů, ať už audio nebo nízkofrekvenčních. Pomocí těchto přepínačů je možné zvolit vždy jeden z časových průběhů, které je oscilátor schopen generovat. Jedná se zpravidla o tyto průběhy: harmonický, trojúhelníkový, pilovitý a impulsní.
- Přepínač MUX6 přepíná šumové signály. Je možné vybrat z šumu bílého a šumu růžového.

- Přepínačem MUX7 lze zvolit jeden z výstupů univerzálního filtru – dolní propust, horní propust, pásmovou propust nebo pásmovou zádrž.
- Přepínačem DEMUX1 je signál z hlavního VCO přiveden na vstup jednoho z dostupných filtrů nebo na vstup kruhového modulátoru v případě jeho použití.
- Přepínačem DEMUX2 je možné přemostit oba filtry a zdrojový signál tak přivádět na výstup syntezátoru bez spektrálních úprav.
- Přepínač DEMUX3 se uplatňuje pouze při použití DSB modulace. Pomocí něj lze přivést modulovaný signál na jeden z filtrů, případně přímo na výstup syntezátoru.
- Přepínač DEMUX4 umožňuje oba dostupné filtry řadit kaskádně.
- Pomocí přepínače DEMUX5 lze volit mezi jednotlivými druhy modulace hlavního oscilátoru v akustickém pásmu. Na výběr jsou pulsně-šířková, frekvenční a DSB-SC.
- Přepínačem DEMUX6 lze přivádět šumový signál po případném smíchání se signálem z oscilátoru na vstup jednoho z filtrů.
- Spínače SW1 a SW2 umožňují připojit modulační nízkofrekvenční oscilátor k jednomu z filtrů, případně k oběma.
- Spínači SW3 až SW5 lze přivést navzorkovaný šumový signál na vstupy kontrolního napětí hlavního oscilátoru, případně některého z filtrů.

Na základě předchozích úvah lze nyní sestavit tabulku potřebného počtu jednotlivých elementů v závislosti na počtu hlasů (*Tab. 5.1*). N je počet hlasů. Generátor šumu by postačil jediný pro celý syntezátor.

N	VCO	VCF	VCA	LFO	RM	EG	S&H
1	2	2	1	3	1	3	1
2	4	4	2	6	2	6	2
3	6	6	3	9	3	9	3
4	8	8	4	12	4	12	4
5	10	10	5	15	5	15	5
6	12	12	6	18	6	18	6
7	14	14	7	21	7	21	7
8	16	16	8	24	8	24	8
9	18	18	9	27	9	27	9
10	20	20	10	30	10	30	10
11	22	22	11	33	11	33	11
12	24	24	12	36	12	36	12
13	26	26	13	39	13	39	13
14	28	28	14	42	14	42	14
15	30	30	15	45	15	45	15
16	32	32	16	48	16	48	16

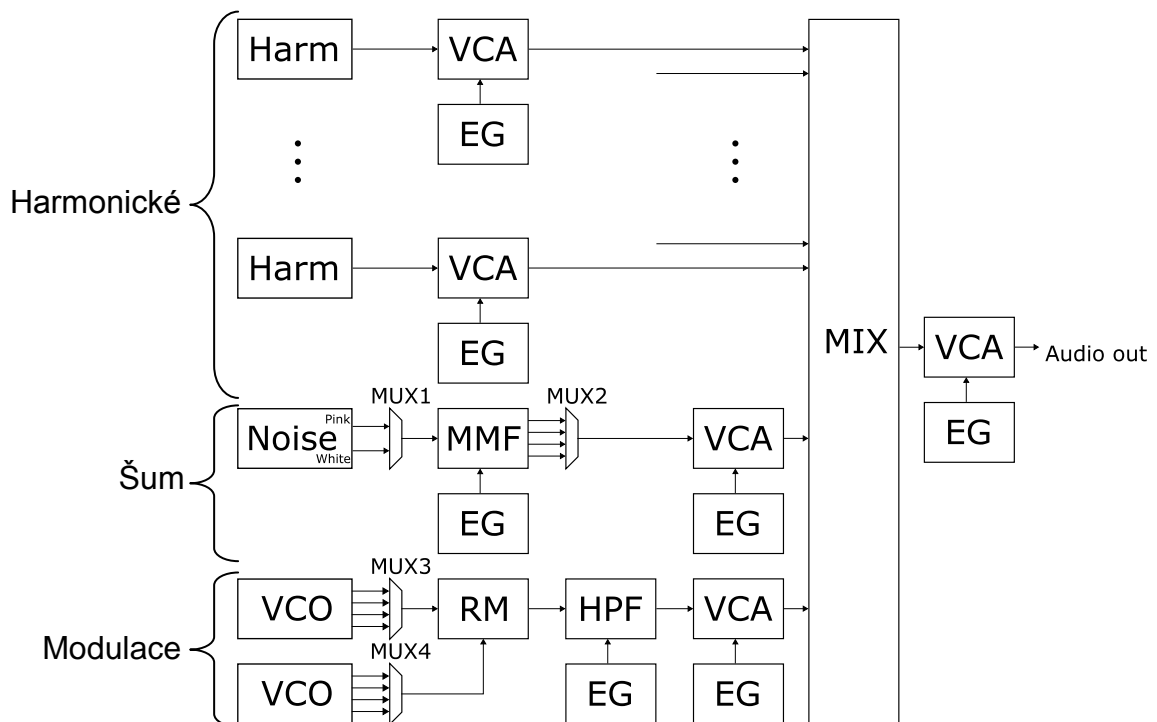
Tab. 5.1 Počet elementů subtraktivní syntézy v závislosti na počtu hlasů

5.3.2 Aditivní syntéza

Blokové schéma aditivní syntézy implementovatelné v syntezátoru by z převážné většiny korespondovalo s *Obr. 4.3*. Místo bloku spouštění by samozřejmě bylo vhodné ke každému VCA připojit samostatný generátor obálky, řešený nejlépe číslicově, a navíc jeden zesilovač s vlastním generátorem obálky umístit na výstup syntezátoru. Dále stojí za uvážení doplnění syntézy o generátor šumu a DSB-SC modulaci, čímž by se rozšířil repertoár generovaných zvuků. Blokové schéma jednoho hlasu syntézy by pak zjednodušeně vypadalo podle *Obr. 5.4*. Přepínače MUX1 až MUX4 zde zastávají obdobnou úlohu jako přepínače MUX6, MUX7, MUX1 a MUX2 u subtraktivní syntézy na *Obr. 5.3*.

Jak je patrné z *Obr. 5.4*, při rozšíření možností aditivní syntézy tímto způsobem je nutné do struktury zakomponovat filtry. Ty však mohou mít jednodušší strukturu než samokmitající dolní propust v zapojení subtraktivní syntézy.

Při návrhu je zde důležité uvážit počet harmonických, ze kterých se má jeden hlas hudebního signálu skládat. Vzhledem k asi nejznámějšímu hudebnímu nástroji pracujícím na principu aditivní syntézy – Hammondovým varhanám – se nabízí číslo 9. Rozhodujícími faktory budou zejména prostorové možnosti vyplývající z technologie použité pro konstrukci oscilátorů, a to jednak z hlediska způsobu generování (lze uvažovat i o číslicovém řešení) a jednak z hlediska technologie (THT či SMT komponenty).



Obr. 5.4 Navrhovaná koncepce jednoho hlasu aditivní syntézy

V Tab. 5.2 jsou uvedeny počty základních stavebních prvků aditivní syntézy v závislosti na počtu hlasů polyfonie syntezátoru a na počtu harmonických, ze kterých by mohl být jeden hlas skládán. N je počet hlasů a H je počet harmonických. Z důvodu rozměrů tabulky jsou některé hodnoty vynechány. VCOH označuje harmonické oscilátory.

N	H	VCOH	VCA	MIX	VCO	VCF	RM	EG
1	6	6	9	1	2	2	1	9
	8	8	11	1	2	2	1	11
	9	9	12	1	2	2	1	12
2	10	10	13	1	2	2	1	13
	6	12	18	2	4	4	2	18
	8	16	22	2	4	4	2	22
4	9	18	24	2	4	4	2	24
	10	20	26	2	4	4	2	26
	6	24	36	4	8	8	4	36
6	8	32	44	4	8	8	4	44
	9	36	48	4	8	8	4	48
	10	40	52	4	8	8	4	52
9	6	36	54	6	12	12	6	54
	8	48	66	6	12	12	6	66
	9	54	72	6	12	12	6	72
10	10	60	78	6	12	12	6	78
	6	54	81	9	18	18	9	81
	8	72	99	9	18	18	9	99
9	9	81	108	9	18	18	9	108
	10	90	117	9	18	18	9	117
	6	60	90	10	20	20	10	90
10	8	80	110	10	20	20	10	110
	9	90	120	10	20	20	10	120
	10	100	130	10	20	20	10	130

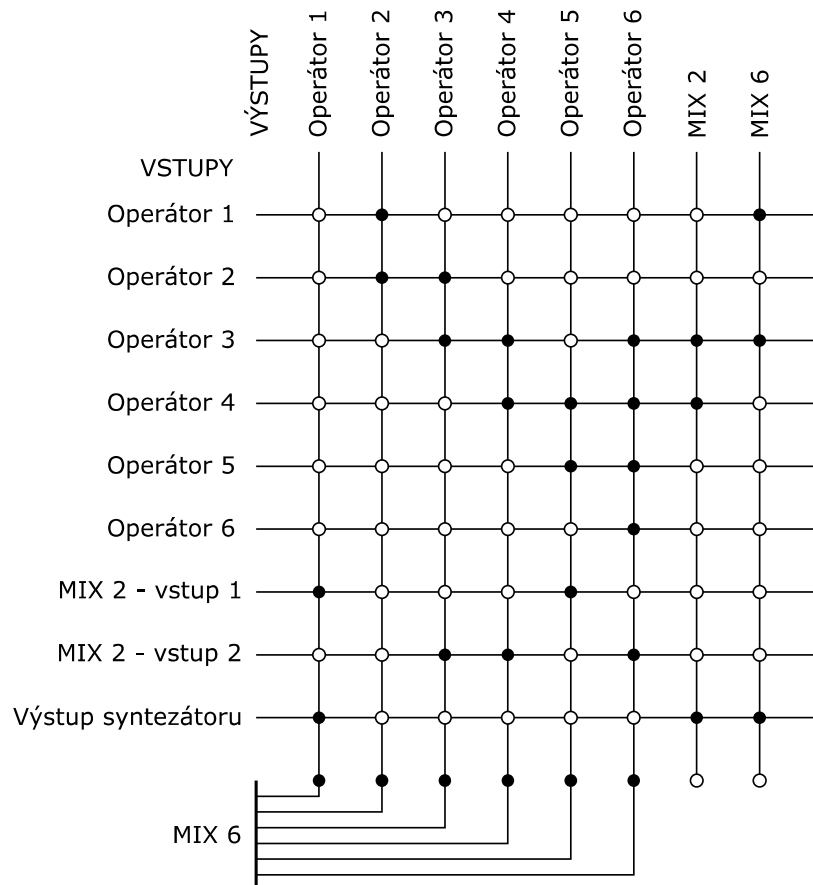
Tab. 5.2 Počet elementů aditivní syntézy v závislosti na počtu hlasů a na počtu harmonických

5.3.3 FM syntéza

Pro rozvažování o možnostech FM syntézy si můžeme vzít jako příklad věhlasný syntezátor Yamaha DX7, zmíněný v teoretické části této práce. Nástroj disponoval šestioperátorovými algoritmy a šestnáctihlasou polyfonií. Zaměříme se nyní na realizaci algoritmů FM syntézy, které tento syntezátor umožňoval. Jejich seznam je uveden v příloze. Při detailnějším prozkoumání lze zjistit, že pro realizaci všech algoritmů jsou zapotřebí dva směšovače, kterými budou realizována spojení výstupních signálů více operátorů do jednoho. Kupříkladu v algoritmu číslo 12 jsou sečteny výstupní signály operátorů 4, 5 a 6 a výsledný signál je přiveden na vstup operátoru 3. Dále jsou sečteny výstupní signály operátorů 1 a 3, přičemž výsledný signál je již výstupním signálem syntezátoru. Pro realizaci algoritmu číslo

32 musí mít syntezátor dostupný směšovač se šesti vstupy. Při ostatních algoritmech budou některé jeho vstupy nevyužité. Druhý směšovač může být dvouvstupový.

Výsledkem rozboru všech možných uspořádání operátorů je modulační matice na *Obr. 5.5*. Místa plných spojů vertikálních a horizontálních úseček představují potřebné možnosti spojení jednotlivých prvků. Například plný bod ve spoji prvního řádku a druhého sloupce značí, že k realizaci některého algoritmu je zapotřebí propojení výstupu operátoru 2 s modulačním vstupem operátoru 1.



Obr. 5.5 Modulační matice FM syntézy s šesti operátory

Tuto matici by bylo zřejmě nejjednodušší realizovat pomocí nějakého programovatelného analogového pole o minimálních rozměrech 8 krát 9 (přesněji řečeno osm vstupů pole a devět výstupů pole – analogové spínače jsou však obousměrné). Vstupy šestivstupého směšovače byly z těchto úvah vynechány, neboť při realizaci tímto způsobem by zbytečně navyšovaly složitost a rozměry pole. V tomto případě stačí přivést výstupy všech šesti operátorů přes jednoduché spínače na jednotlivé vstupy směšovače. Zredukuje se tak počet spínačů souvisejících s tímto směšovačem z 36 na 6. Při řešení celého pole pomocí jednotlivých spínačů bude těchto zapotřebí množství rovné počtu plných bodů v matici, což je 30.

Všechny předchozí úvahy však byly vztaženy na jeden hlas syntézy. Pro získání konečného počtu potřebných prvků se vše musí násobit polyfonií, případně dále ještě multitimbrality. Pro realizaci jednotlivých operátorů budou použity harmonické oscilátory podobně jako u aditivní syntézy.

Rozvahy o FM syntéze jsou zakončeny tabulkou *Tab. 5.3* znázorňující potřebné počty jednotlivých prvků, ze kterých bude jeden zvuk syntézy sestaven. Poslední řádek je shodný s nástrojem Yamaha DX7.

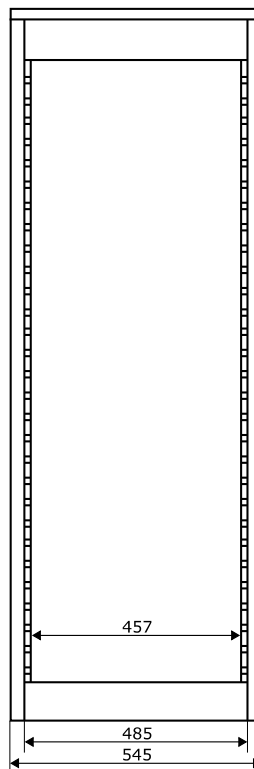
N	VCO, VCA, EG	MIX	
		2-input	6-input
1	6	1	1
2	12	2	2
3	18	3	3
4	24	4	4
5	30	5	5
6	36	6	6
7	42	7	7
8	48	8	8
9	54	9	9
10	60	10	10
11	66	11	11
12	72	12	12
13	78	13	13
14	84	14	14
15	90	15	15
16	96	16	16

Tab. 5.3 Počet elementů FM syntézy v závislosti na počtu hlasů

5.4 Konstrukce

5.4.1 Rack

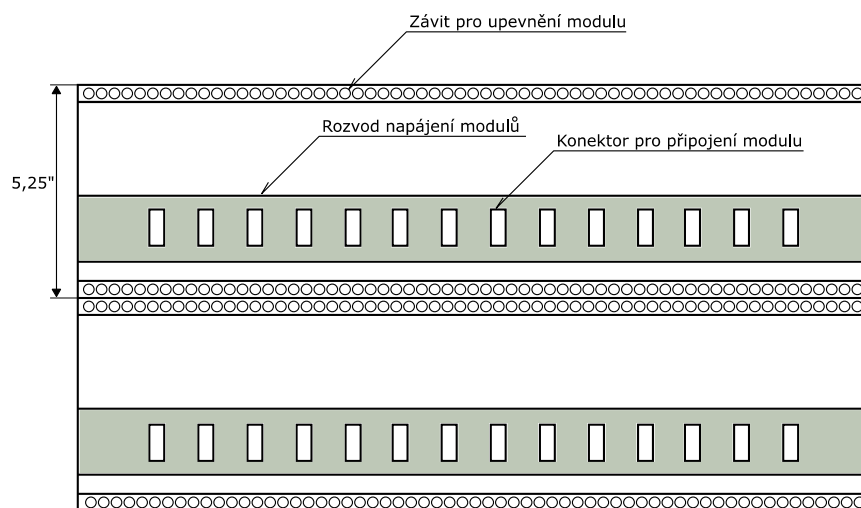
Rack (z angl. stojan, nosič) je standardizovaný systém umožňující přehlednou montáž a propojování elektrických a elektronických zařízení. Rám nejrozšířenějšího racku 19“ je tvořen dvěma svislými plochými kolejnicemi, vzdálenými od sebe přibližně 18 palců. V kolejnicích jsou čtvercové nebo kulaté otvory s vodorovnou roztečí necelých 19 palců (465 mm). Maximální šířka montovaného zařízení včetně uší na přichycení je právě 19 palců (483 mm). Při označování rozměrů skříní určených pro zařízení (tzv. racků) je zvykem rozměry udávat v jednotkách „rack unit“, značené U. Platí, že jedna racková jednotka (1U) je rovna 1,75 palce, což odpovídá 44,45 milimetru. Celý rack má výšku obvykle 42U. Hloubka racku je nejčastěji 60 cm, existují však i skříně hlubší [13]. Narys racku je na *Obr. 5.6*.



Obr. 5.6 Čelní pohled na 19“ rack

5.4.2 Eurorack

Nejčastější řešení syntezátorů tradiční koncepce je umístování modulů do připravené skříně. Jednotlivé moduly jsou na sobě navzájem funkčně zcela nezávislé, zpravidla mají pouze společné napájení, kteréžto je rozvedeno uvnitř skříně. Aby bylo možné jednotlivé moduly do skříně umístit, musí mít čelní panely všech modulů stejnou výšku, totožnou s příslušným rozměrem skříně. Typ skříně používaný pro syntezátory se běžně nazývá „Eurorack“ a výška modulu umístitelného do skříně je 5,25 palce, což odpovídá 133 milimetrům. Výška jednoho „patra“ skříně je tedy 3U. Podoba skříně se dvěma patry je schématicky naznačena na *Obr. 5.7*. V obrázku je též naznačen nejčastěji používaný rozvod napájení.



Obr. 5.7 Schématické znázornění skříně Eurorack

Pokud má použitá skříň odpovídající šířku a boční úchyty, může být vestavěna do 19“ racku. Někteří amatérští konstruktéři se však této koncepci nechrání a raději volí rack vlastní výroby, nejčastěji dřevěný. Takto postavený modulární syntezátor pak může (zejména při velkých rozměrech) připomínat část nábytku.

5.4.3 Dostupné konstrukční prvky

Konstrukci jednotlivých částí syntezátoru bude nejvhodnější koncipovat tak, aby bylo jednotlivé moduly možné umístit do 19“ racku, a to s ohledem na dostupnost konstrukčních prvků. V katalozích českých výrobců lze nalézt skříně s výškou od 1U do 4U a hloubkou od 200 do 400 mm určené pro zařízení. Šířka skříně může být rovna 430 nebo 440 mm podle zvoleného výrobce [14],[15]. V každé skříně by mohlo být umístěno několik zásuvných desek.

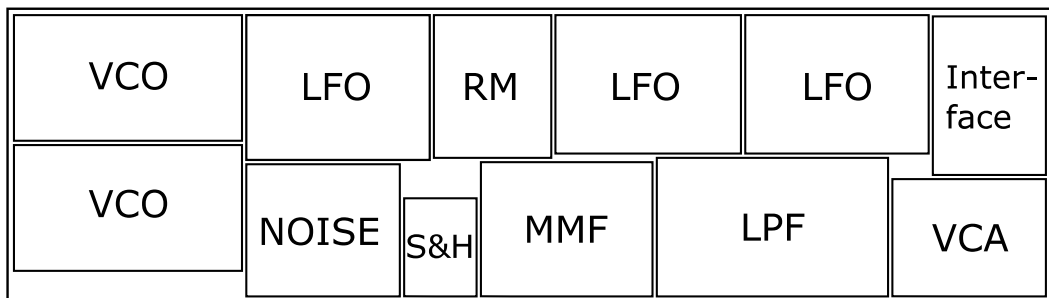
5.5 Architektura modulů

5.5.1 Metoda jednoho hlasu polyfonie na jedné kartě

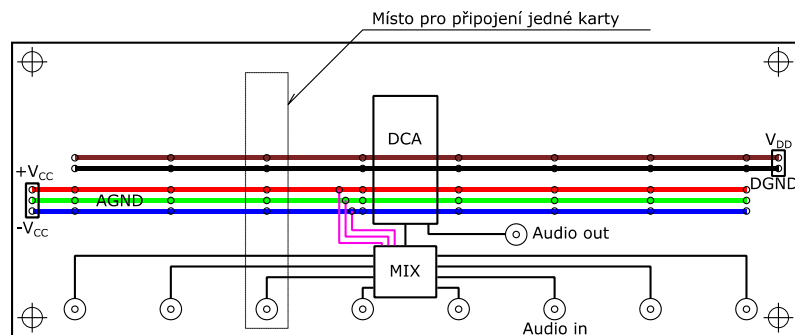
První možností je integrace všech komponentů potřebných pro realizaci jednoho hlasu polyfonie syntézy na jednu desku plošného spoje. Pro subtraktivní syntézu by to znamenalo integrovat dva VCO, jeden LPF, MMF, VCA, tři LFO, zdroj šumu, RM a S&H na jednu desku, a to včetně příslušejících D/A převodníků, multiplexorů, mikroprocesoru (či několika) a budiče sběrnice. Jednotlivé desky by pak byly na sobě zcela nezávislé a byly by pouze připojeny na společné napájení a společnou komunikační sběrnici. Z každé desky by byl vyveden pouze jeden audio signál jakožto jeden hlas polyfonie jednoho zvuku.

Rozmístění prvků syntézy na plošném spoji by mohlo vypadat např. podle *Obr. 5.8*. Poměry rozměrů jednotlivých prvků jednoho hlasu jsou odhadnuty zejména podle plošných spojů v literatuře [16]. Podoba propojovací desky (zatím bez komunikační sběrnice) je na *Obr. 5.8b*. Tato deska by byla v krabici umístěna kolmo na jednotlivé karty. DCA je digitálně řízený audio zesilovač.

a)



b)



Obr. 5.8 Návrh jednoho hlasu subtraktivní syntézy na jedné kartě: a) struktura karty,

b) podoba propojovací desky.

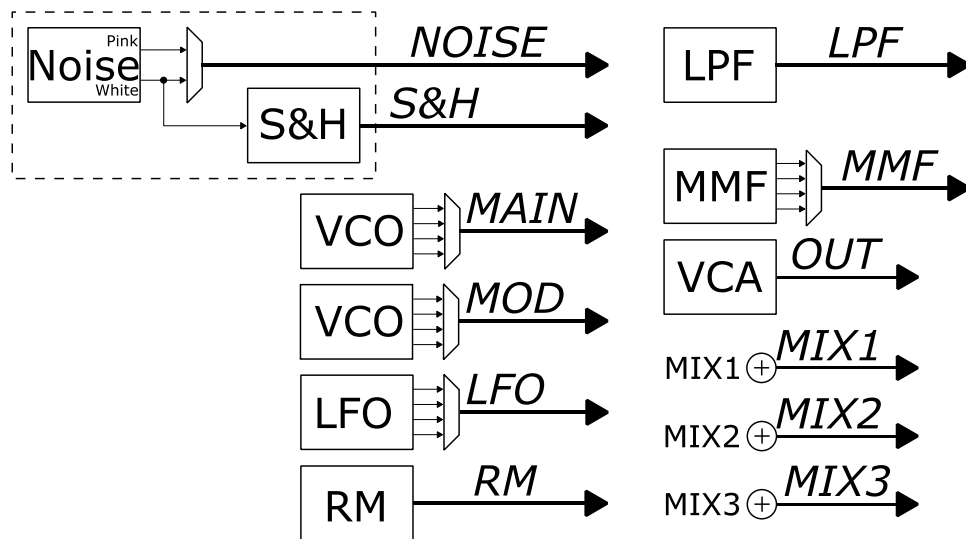
Výhodou této koncepce je jednoduché propojení jednotlivých karet. Nevýhodou je velmi složitá konstrukce karet. Zejména se jedná právě o subtraktivní syntézu (tj. základní metodu), neboť jednotlivé prvky jednoho hlasu syntézy mohou být mezi sebou propojeny velmi složitým způsobem (viz *Obr. 5.3.*) Konkrétní řešení pak muselo být výhradně v rukou konstruktéra, což by průběh konstrukce komplikovalo. U ostatních metod syntézy by podobná architektura šla použít, neboť jednotlivé propojení jednotlivých prvků syntézy zde již nejsou tak složitá. Struktura aditivní syntézy je tvořena několika navzájem izolovanými menšími bloky (generátor jedné harmonické, generátor šumové složky, generátor DSB modulace), jejichž výstupní signály jsou následně sečteny pomocí společného směřovače. FM syntéza pak obsahuje pouze tři opakující se komponenty: generátor harmonického signálu, napětím řízený zesilovač a generátor obálky.

5.5.2 Metoda skupiny komponentů stejného typu na jedné kartě

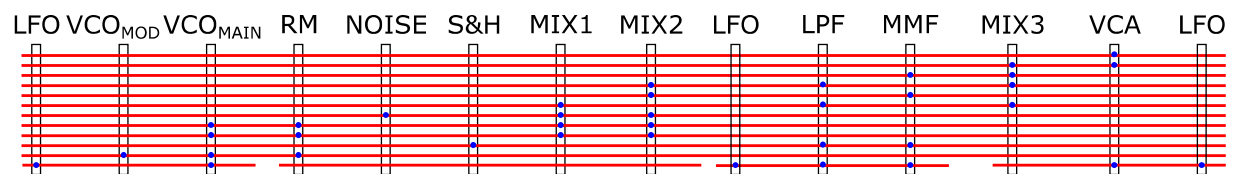
Druhou možností je integrace většího množství komponentů stejného typu na jednu kartu. Jedna karta by tak obsahovala určité množství VCO, další karta VCA atd. Struktura každého hlasu polyfonie by pak byla realizována vzájemným propojením jednotlivých karet pomocí analogové sběrnice. Podle základního návrhu by pak každý modul realizující jeden zvuk subtraktivní syntézy obsahoval tolik karet, z kolika komponentů je jeden hlas syntézy sestaven. Počet prvků integrovaných na jedné kartě by se rovnal polyfonii syntézy. Podle potřeby (např. vzhledem k rozměrům skříně) může být na jedné kartě integrováno větší množství komponentů – vhodná by se zdála být zejména integrace generátoru šumu spolu se vzorkovacími obvody, neboť tyto prvky spolu úzce souvisí. Multiplexory z *Obr. 5.3* by byly integrovány na desce s určitým komponentem, ke kterému daný přepínač logicky přísluší. Na *Obr. 5.9a* jsou zobrazeny jednotlivé komponenty subtraktivní syntézy s vyznačením signálů, jež budou tvořit jednotlivé vodiče propojovací sběrnice. Názvy těchto signálů jsou v obrázku psány kurzívou.

Na *Obr. 5.9b* je návrh signálové sběrnice, realizující propojení jednotlivých modulů v rámci jednoho hlasu polyfonie. Názvy nad sběrnicí označují pozice umístění jednotlivých karet. Modré body obrázku značí propojení signálu sběrnice s danou kartou. Spodní vodič sběrnice je sdílen nízkofrekvenčními oscilátory. Protože jsou v syntezátoru přítomny tři, bude nutné tuto sběrnici rozdělit, aby nedošlo ke zkratu výstupů jednotlivých oscilátorů. V důsledku to znamená pouze částečné omezení z hlediska pořadí modulů, neboť to již nemůže být zcela libovolné. Pořadí jednotlivých signálů ve sběrnici na *Obr. 5.9b* je uvedeno v *Tab. 5.4.*

a)



b)



Obr. 5.9 Návrh signálové sběrnice subtraktivní syntézy: a) označení signálů modulů, b) podoba sběrnice a umístění modulů

Číslo signálu	Význam
1	OUT
2	MIX3
3	MMF
4	LPF
5	MIX2
6	MIX1
7	NOISE
8	RM
9	MAIN
10	S&H
11	MOD
12	LFO

Tab. 5.4 Pořadí signálů signálové sběrnice

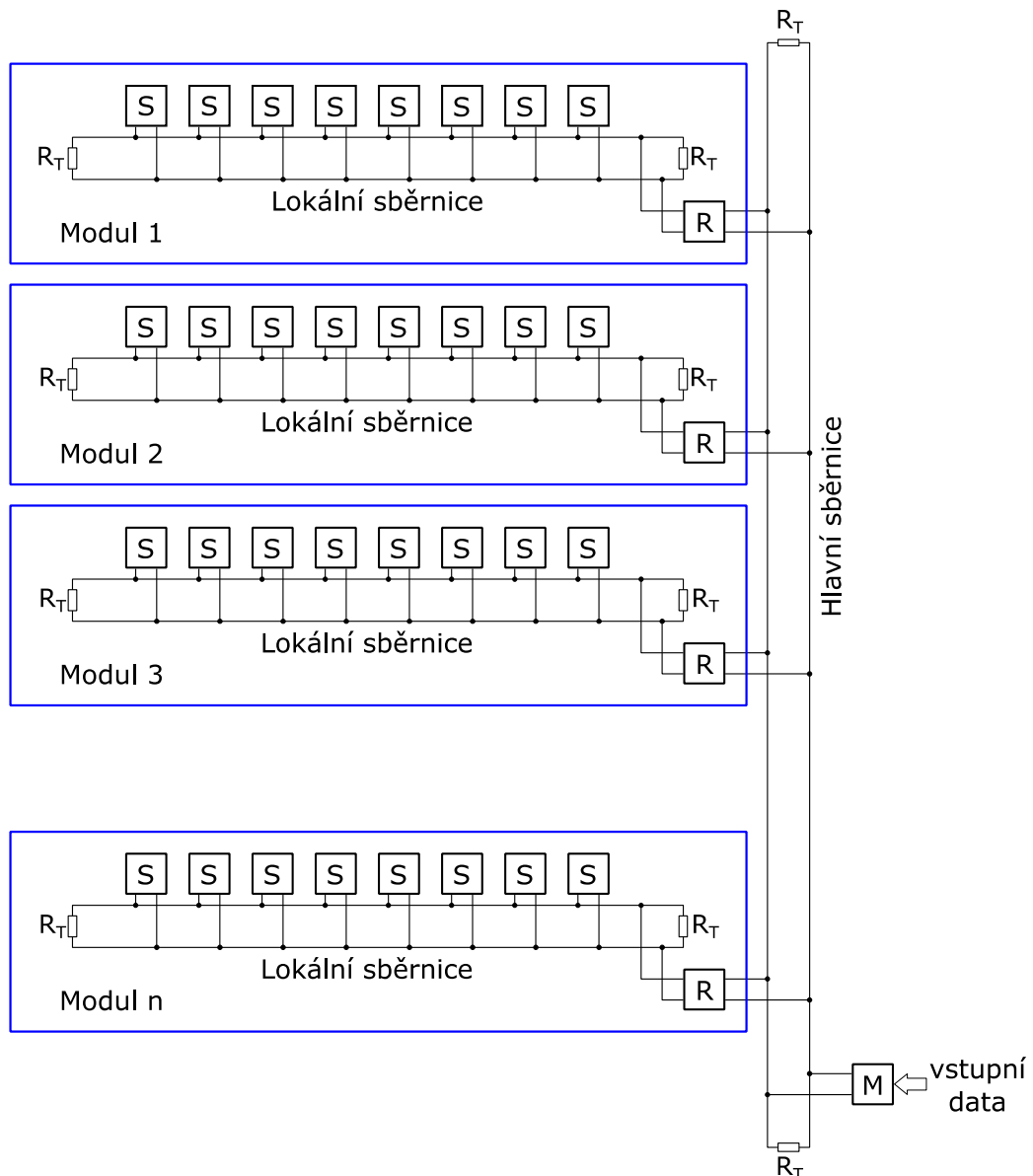
Takovýchto sběrnic bude v každém modulu množství rovné počtu hlasů polyfonie jednoho zvuku. Sběrnice pro jednotlivé hlasy na sobě budou navzájem nezávislé, pouze vodič označený jako OUT bude přiveden do společného směšovače. Propojení jednotlivých karet by

zde bylo výhodnější realizovat na spodní straně skříně oproti předchozímu návrhu. Podoba celého modulu je v příloze této práce.

Popisovaná koncepce představuje kompromis mezi tradičním řešením v podobě absolutní modularity (kap. 5.1) a návrhově náročnou koncepcí představující integraci celého hlasu polyfonie na jednu kartu (kap. 5.5.1). Z těchto důvodů bude tato koncepce pravděpodobně zvolena.

5.6 Návrh komunikační sběrnice

Topologie navrhované řídicí sběrnice by měla být v souladu s logickým uspořádáním syntezátoru. Nejmenšími stavebními prvky syntezátoru budou karty, z nichž na každé bude integrováno určité množství prvků syntézy. Tyto karty budou seskupeny do modulu, který bude realizovat jeden zvuk dané metody syntézy. Celkový počet modulů bude roven množství daným součtem všech zvuků jednotlivých metod syntézy. Na *Obr. 5.10* je navrhovaná topologie. Ve schématu je sběrnice naznačena jako dvojvodičová, což bude pravděpodobně odpovídat realitě, neboť je zamýšleno použití sběrnice CAN. S je jedna karta modulu syntezátoru a bude ve většině případů pracovat jako slave. M je stanice, jejíž úloha bude spočívat v řízení všech částí syntezátoru. Jak však bylo zmíněno v části popisující tradiční řešení syntezátoru, ovšem s číslicovým řízením, připojená stanice, pracující jako slave, musí být po svém připojení schopna upozornit řídicí stanici na svoji přítomnost. Ovládání syntezátoru (tj. vstupní data stanice M) bude pravděpodobně řešeno protokolem MIDI, což je již po velmi dlouhou dobu nejpoužívanější standard digitální komunikace v hudební sféře. Stanice M bude tedy mimo jiné mít za úkol převádění dat ve formátu MIDI na formát použitelný pro sběrnici zvolenou pro syntezátor. R jsou opakovače a R_T terminátory sběrnice.



Obr. 5.10 Návrh struktury komunikační sběrnice

5.6.1 Řídicí signály

Většina komponentů, realizujících některou metodu syntézy, je řízena stejnosměrným napětím přivedeným na příslušný vstup komponentu. Velikost napětí určuje míru nastavovaného parametru. Jestliže je řízení jednotlivých modulů syntezátoru číslicové, bude nutné zařadit do řídicí struktury digitálně/analogové převodníky s odpovídajícím rozlišením. Generátory obálek jako takové budou řešeny číslicově (softwarově), nicméně aktuální hodnota obálky musí být na analogové napětí rovněž převedena, neboť jí budou řízeny analogové komponenty syntezátoru – zesilovače a filtry. Tím pádem je vhodné integrovat generátory obálek na jednu kartu společně s řízenými prvky. Všechny části syntezátoru navíc budou řízeny pomocí signálů ze společné sběrnice, tudíž každá karta modulu musí obsahovat alespoň jeden mikroprocesor disponující řadičem zvolené sběrnice a rovněž budič sběrnice.

6 Závěr

V rámci diplomové práce byly popsány nejvíce rozšířené principy, na kterých pracují analogové syntezátory, případně i syntezátory číslicové. Nejrozšířenějším principem, na jehož základě analogové syntezátory během svého vývoje pracovaly, je subtraktivní syntéza. Tato metoda je jednoduchá na implementaci a představuje nejefektivnější řešení syntézy zvuku na analogovém principu. Při použití aditivní syntézy je nutné vynaložit velké úsilí pro dosažení uspokojivého výsledku, neboť zvukový signál je zde skládán z mnoha dílčích signálů, z nichž u každého z nich je nezbytné přesné nastavení frekvence a úrovně. Nevýhoda FM syntézy spočívá v nepředvídatelnosti výsledného zvuku a v tom, že generovaný signál může relativně snadno přejít v šum. Nicméně zde byla vyvinuta skupina algoritmů, které se v této metodě osvědčily. Tato metoda se jen částečně rozšířila do komerční sféry, a to s nástupem číslicové techniky.

V souvislosti s vlastním návrhem zařízení byl nejprve zmíněna koncepce tradičně používaná amatérskými konstruktéry modulárních syntezátorů. Tato koncepce byla shledána nevhodnou z důvodu složitosti ovládání. Tento problém by mohl být částečně vyřešen použitím komunikační sběrnice, nicméně toto řešení nebylo shledáno optimálním z důvodu zachování tradičního složitého způsobu propojování. Následně byl uveden návrh zavedení elektronických spínačů namísto kabelů, což omezí modularitu syntezátoru, ale značně usnadní ovládání. V další části byla popsána fyzická konstrukce s ohledem na dostupnost konstrukčních prvků vyráběných v České republice. Pro základní konstrukci byl zvolen 19“ rack, kterýžto je vhodný pro přehlednou montáž nejrůznějších elektronických zařízení. Byly prozkoumány katalogy několika českých výrobců a nalezeny krabice, které je možno do racku vestavět a ve kterých mohou být umístěny elektrické obvody realizující funkci jednotlivých modulů syntezátoru.

Následovala nejdůležitější část práce, a to návrh vnitřního uspořádání jednotlivých modulů syntezátoru. Jako první byla navržena koncepce spočívající v integrování všech prvků potřebných pro jeden hlas subtraktivní syntézy na jednu kartu, přičemž výstup karty by tvořil pouze jeden audio signál. Toto řešení bylo shledáno nevhodným z důvodu náročnosti konstrukce každé karty. Druhé navrhované řešení spočívalo v integraci většího množství prvků syntézy stejného typu na jednu kartu. Jednotlivé prvky integrované na jedné kartě by pak na sobě byly nezávislé a propojení by bylo řešeno vně karet. Vzhledem k velkému počtu prvků jednoho hlasu subtraktivní syntézy a maximálním výškám dostupných krabic připadá

v úvahu integrace několika prvků různého typu na jednu kartu (typicky šumový signál a vzorkovací obvody), nicméně tato rozhodnutí budou záležet na konstruktérovi syntezátoru.

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Harmonický signál: časový průběh (vlevo) a frekvenční spektrum (vpravo)	10
Obr. 2.2	Časové průběhy (vlevo) a frekvenční spektra (vpravo) neharmonických deterministických signálů.....	12
Obr. 2.3	Spektrum bílého šumu	13
Obr. 2.4	Spektrum růžového šumu	14
Obr. 2.5	Amplitudová frekvenční charakteristika dolnofrekvenční propusti	15
Obr. 2.6	Amplitudová frekvenční charakteristika hornofrekvenční propusti	15
Obr. 2.7	Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti	16
Obr. 2.8	Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové zadržky.....	16
Obr. 3.1	Ovládání hlasitosti zvuku	18
Obr. 3.2	ADSR obálka	18
Obr. 3.3	Úprava úrovně signálu pomocí napětím řízeného zesilovače	19
Obr. 3.4	Časové průběhy signálu upravovaného zesilovačem řízeným generátorem obálky	20
Obr. 3.5	Časové diagramy ovládacích signálů a ADSR obálky	21
Obr. 3.6	Tvar ADSR obálky syntezátorů při překrývání gate signálů.....	22
Obr. 3.7	Obálka zvuku žesťového nástroje [11]	23
Obr. 3.8	Číslíkově generovaná obálka [12]	24
Obr. 4.1	Pilovitý signál: a) časový průběh, b) frekvenční spektrum	25
Obr. 4.2	Časový průběh pilovitého signálu aproximovaného pomocí devíti harmonických	26
Obr. 4.3	Základní blokové schéma aditivní syntézy.....	27
Obr. 4.4	Princip subtraktivní syntézy: signál a jeho řízená filtrace [1]	30
Obr. 4.5	Základní blokové schéma subtraktivní syntézy.....	31
Obr. 4.6	Amplitudová frekvenční charakteristika samokmitajícího filtru s různými úrovněmi rezonance [4]	33
Obr. 4.7	Princip FM syntézy.....	34
Obr. 4.8	Pozice harmonických složek signálu vytvořeného pomocí FM modulace.....	35
Obr. 4.9	Spektrum frekvenčně modulovaného signálu.....	36
Obr. 4.10	Jednoduchý algoritmus FM syntézy	37
Obr. 4.11	Základní algoritmus FM syntézy s šesti operátory	37
Obr. 4.12	Složitější algoritmus FM syntézy s šesti operátory	38
Obr. 4.13	Spektrum signálu při DSB-SC modulaci: a) vstupní signály, b) výstupní signál.....	39

Obr. 5.1 Základní princip subtraktivní syntézy řešený modulárním syntezátorem v tradiční podobě [11]	41
Obr. 5.2 Propojení modulů při syntéze basového bubnu [12]	42
Obr. 5.3 Navrhovaná koncepce jednoho hlasu subtraktivní syntézy	46
Obr. 5.4 Navrhovaná koncepce jednoho hlasu aditivní syntézy	48
Obr. 5.5 Modulační matice FM syntézy s šesti operátory	50
Obr. 5.6 Čelní pohled na 19“ rack	52
Obr. 5.7 Schématické znázornění skříně Eurorack	53
Obr. 5.8 Návrh jednoho hlasu subtraktivní syntézy na jedné kartě	54
Obr. 5.9 Návrh signálové sběrnice subtraktivní syntézy	56
Obr. 5.10 Návrh struktury komunikační sběrnice.....	58

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Počet elementů subtraktivní syntézy v závislosti na počtu hlasů	47
Tab. 5.2 Počet elementů aditivní syntézy v závislosti na počtu hlasů a na počtu harmonických	49
Tab. 5.3 Počet elementů FM syntézy v závislosti na počtu hlasů	51
Tab. 5.4 Pořadí signálů signálové sběrnice.....	56

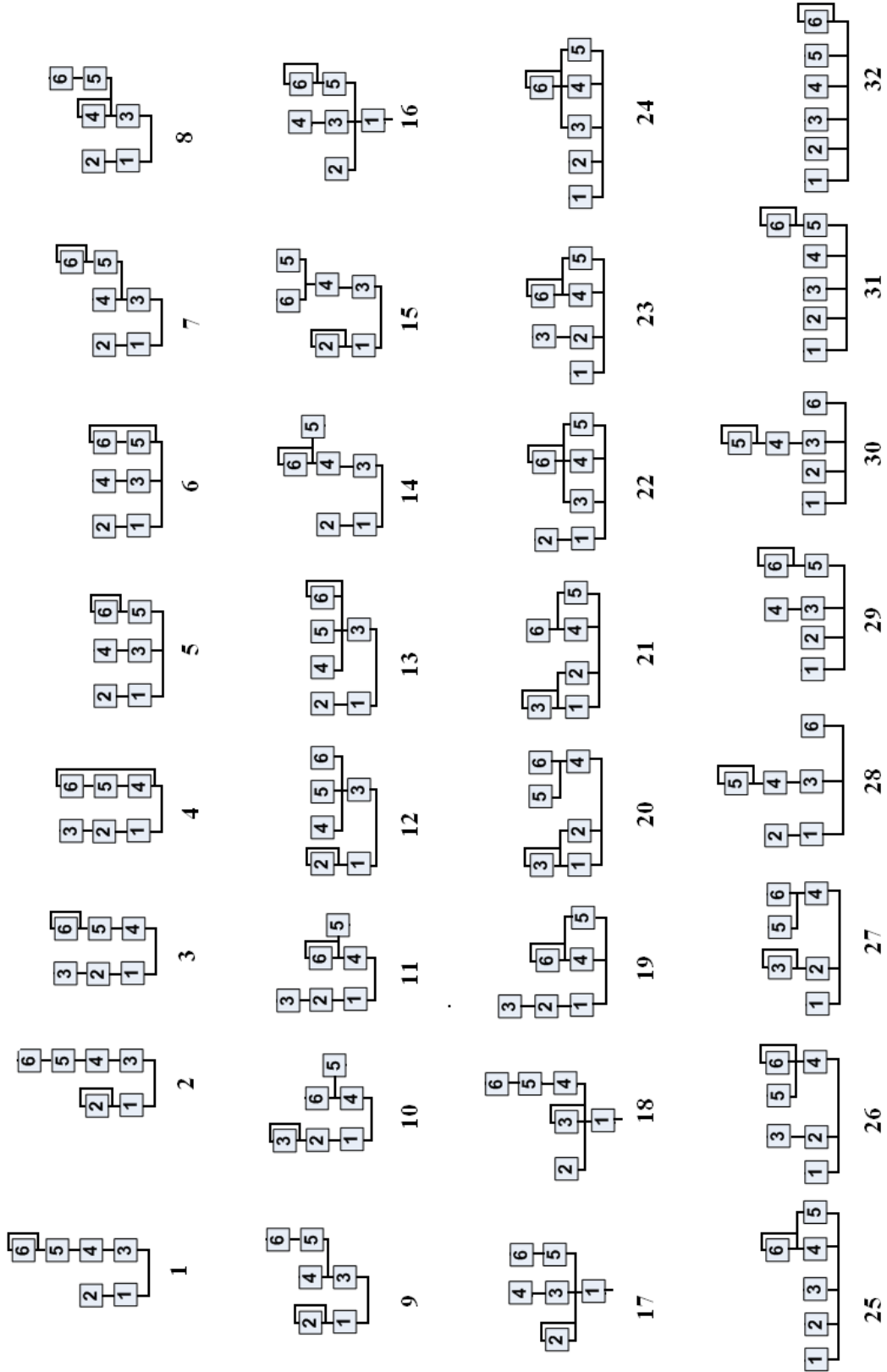
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Metody zvukové syntézy [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy/>
- [2] PINKER, Jiří a Václav Koucký. Analogové elektronické systémy. 4. vydání, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. 328 s. ISBN: 978-80-7043-917-3.
- [3] Syntezátor [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/syntezeator/>
- [4] Thor demystified 15: Filters pt 3: Resonance – Blog – Propellerhead [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<https://www.propellerheads.se/blog/thor-demystified-15-filters-pt-3-resonance>
- [5] Synth Secrets, Part 6: Of Responses & Resonance [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.soundonsound.com/sos/oct99/articles/synthsecrets.htm>
- [6] Yamaha DX7 Algorithms | NoisyLittleBugger [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<https://stimresp.wordpress.com/2011/04/18/yamaha-dx7-algorithms/>
- [7] Sound Design II - Způsoby syntézy zvuku – aditivní syntéza - muzikus.cz [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-serialy/Sound-Design-II-Zpusoby-syntezy-zvuku-aditivni-synteza~05~unor~2008/>
- [8] Synth Secrets, Part 7: Envelopes, Gates & Triggers [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.soundonsound.com/sos/nov99/articles/synthsecrets.htm>
- [9] Synth Secrets, Part 8: More About Envelopes.html [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.soundonsound.com/sos/dec99/articles/synthsecrets.htm>
- [10] Quick Guide to Envelopes – Making Music [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://making-music.com/quick-guides/envelopes/>
- [11] Beginners Tutorial for Modular Synthesizers - Analog Modular Synthesizers for Electronic Music by Synthesizers.com.html [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.synthesizers.com/begin.html>

- [12] SYNTH SECRETS [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.soundonsound.com/sos/jan02/articles/synthsecrets0102.asp>
- [13] Rack – Wikipedie [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rack>
- [14] REVATECH s.r.o. Katalog 19“ prvků a skříněk 2014 – 2015. 2014. 20s. Dostupné z:
http://www.revatech.cz/download/revatech_14_15.pdf
- [15] 1PS04P400N - 4U rack krabice plechová, 400mm, 4mm - rack panel černý - modushop.cz [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.modushop.cz/1PS04P400N-4u-rack-krabice-plechova-400mm-4mm-rack-panel-cerny.html>
- [16] Music From Outer Space - Your Synth-DIY Headquarters [online]. [cit. 4.5.2015]. Dostupné z: <http://www.musicfromouterspace.com/>

Přílohy

Příloha A - Seznam algoritmů FM syntézy nástroje Yamaha DX7



Příloha B – půdorys jednoho modulu syntezátoru

