

Synth challenge

průvodní zpráva
Miroslav Smutný

1) Vltava

Následující text popisuje použité metody syntézy a nástroje, které byly pomocí nich vytvořeny.

1.1 Karplus-Strongův algoritmus

Karplus-Strongův algoritmus je vhodný pro syntézu tónů s perkusním charakterem (drnknutí struny, úder do bicích) [1]. Řadí se mezi metody fyzikálního modelování, protože spočívá ve fyzikálním popisu vzniku zvuku nástroje. Drnknutím (nebo úderem) dodáme systému energii. Struna nebo blána (obecně oscilátor) se rozkmitá, nejprve chaoticky, protože impulsem se vedle základního vybudí i různé vyšší módy kmitání. Hmotností oscilátoru a odporem okolního vzduchu se nejprve utlumí tyto vyšší módy a nakonec dojde k utlumení i základní frekvence.

Nástroj si lze představit jako IIR filtr. Ten je tvořen zpožďovací linkou (bufferem), dolní propustí nebo kombinací dolní propusti a all-pass filtru a zpětnou vazbou s tlumením g . Nejprve naplníme buffer buzením (bílým šumem, nicméně lze použít i jiný frekvenčně bohatý signál – diracův impuls, jednu periodu trojúhelníkového průběhu, ...). Poté ve zpětné vazbě tento signál prochází filtrem (například dochází k průměrování dvou hodnot), čímž dochází k postupnému utlumování vyšších frekvencí.

Základní perioda tónu je určena délkou bufferu. Nevýhodou je, že délka bufferu musí být celočíselná, tudíž nelze realizovat jakoukoli frekvenci. Tomu se lze vyhnout modifikací algoritmu [2]. Dalšími modifikacemi můžeme zahrnout další parametry fyzikálního modelu, například tuhost strun nebo sílu úderu.

Implementovaný algoritmus se nachází v souboru `karStrModified.m`. Vedle „standardních“ parametrů jako požadovaná frekvence, doba trvání, vzorkovací frekvence je možné volit tlumení, sílu úderu a také prvotní náplň bufferu (na výběr je bílý šum, dvojice diracových pulsů a jedna perioda trojúhelníkového nebo obdélníkového signálu). Tím lze definovat počáteční spektrum tónu. Oba hudební nástroje (Orchestral harp a Pizzicato Strings), které jsou pomocí tohoto algoritmu syntetizovány, nicméně používají trojúhelníkové buzení, protože nezní tak ostře. Při syntéze pizzicata se ještě používá přenosobení první polovinou blackmanova okna, které zatluší počáteční buzení.

Protože výsledný zvuk Karplus-Strongova algoritmu pro účely pizzicata navíc příliš závisí na požadované frekvenci, je použita pseudo wavetable syntéza. Syntetizuje se pouze jediný tón (o kmitočtu 2000 Hz) a ten je následně převzorkován na požadovanou frekvenci. Tím se podařilo dosáhnout vyrovnanější kvality zvuku pro různé frekvence. Další zvláštností obou nástrojů syntetizovaných pomocí Karplus-Strongova algoritmu je jejich nezávislost na požadované délce noty. Tím zvuk více odpovídá skutečnosti, kdy hudebník netlumí strunu mezi jednotlivými tóny, ale ty se spíše skládají dohromady a postupně doznívají. Zvuk nástroje Pizzicato Strings je navíc konvolován s impulzní odezvou, která dále zvýší dobu trvání výsledného zvuku. Použitý MIDI toolbox si s delší dobou trvání nástroje korektně poradí.

Použitá impulzní odezva je načítána ze souboru `IR1.mat`. Jedná se o impulzní odezvu „French 18th Century Salon.wav“ z archivu `IMreverbs.zip` ze stránek `voxengo.com`.¹

1.2 Aditivní syntéza

Aditivní syntéza je založená na Fourierově řadě. Jakýkoli periodický průběh lze rozložit na lineární kombinaci nekonečného množství harmonických funkcí s různou frekvencí. Aditivní resyntéza spočívá v analýze frekvenčního složení zvuku hudebního nástroje (a časového průběhu amplitudy jednotlivých frekvenčních složek) a následného vygenerování průběhu s použitím získaných parametrů (pouze pro nejvýznamější vrcholky ve spektru). Nevýhodou je velký počet oscilátorů nutný pro dostatečnou věrnost.

S pomocí aditivní syntézy byly (použitím údajů uvedených v [3]) vygenerovány tympany a trubka (která ve Vltavě úspěšně hraje part tuby). U trubky je navíc přidáno tremolo vytvořené amplitudovou modulací (objevuje se, pokud je doba trvání tónu trubky delší než půl sekundy).

¹ <http://www.voxengo.com/impulses/>. Přečtěte si prosím licenci k impulzním odezvám v souboru `licence.txt` uvedeném v kořenovém adresáři semestrální práce.

1.3 Subtraktivní syntéza

Subtraktivní (filtrační) syntéza spočívá v tom, že z nějakého frekvenčně bohatého signálu odfiltrujeme nežádoucí složky. Jako zdrojový frekvenčně bohatý signál obvykle slouží bílý šum, obdélníkový signál, trojúhelníkový signál nebo obdélníkové pulsy. Použitý filtr se většinou definuje vektorem rezonančních frekvencí (formantů), které budou ve výsledném signálu zvýrazněny a jejich příslušnou šířkou pásma.

Pomocí filtrační syntézy byly vytvořeny čtyři nástroje. Fagot, činely a smyčce (String Ensemble 1 a String Ensemble 2).

V případě fagotu bylo použito buzení v podobě obdélníkových pulsů se střídou 0,32. Filtr byl definován následujícím způsobem.

```
F=[440 1180 3320];  
BW=[110 675 1125];
```

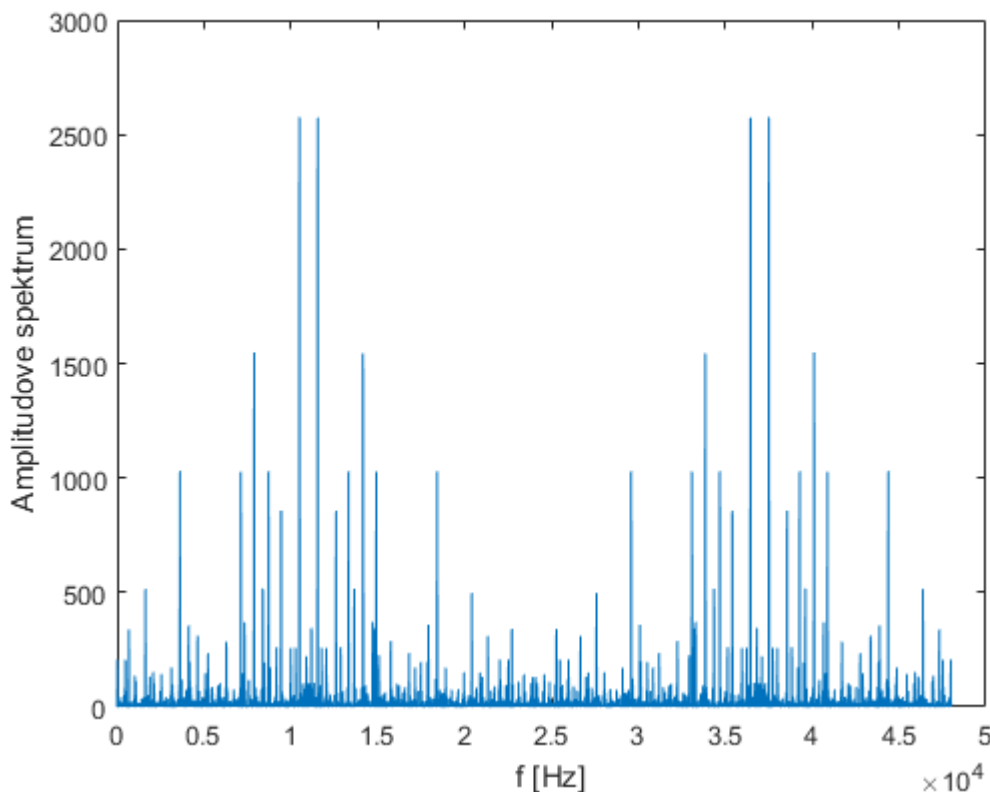
Zvuk činelu byl vytvořen váhovaným součtem dvou částí – šumové složky a harmonické složky. Šumová složka je vytvořena filtrováním bílého šumu IIR filtrem s následujícími parametry

```
fBoost=[2350 3200 4550 7000 8400 10000 11600 12700 15800 17550];  
RPolu=0.95;  
PhiPolu=2*pi*fBoost/fs;  
pol=RPolu.*exp(1i*PhiPolu);  
b=1;  
a=real(poly([pol, conj(pol)]));
```

Harmonická složka byla vytvořena složením sinusovek s danými parametry:

```
f=[45 310 438 526 750 1021 1590 1848 2300 3130 3900 6920 7400];  
amp=[0.2 0.2 0.1 5 0.5 0.5 0.5 0.5 2 3 2 0.1 2];
```

a jejich kruhovou modulací s obdélníkovým signálem s frekvencí 11018Hz. Výsledkem je bohaté spektrum (viz obrázek 1).



Obrázek 1: Amplitudové spektrum harmonické části zvuku činelu

Dále byl filtrační metodou vytvořen zvuk houslí. Oproti údajům uvedeným v [4] byly použity jinak umístěné formanty, díky kterým výsledný zvuk víc působí jako housle.

```
F=[600 2500 4200];  
BW=[300 400 1800];
```

Jako buzení je použit pilový průběh. Aby nedocházelo k lupání na začátku tónů, je upravena počáteční fáze průběhu.

```
T=1/freq;  
source=sawtooth(2*pi*freq*(t-0.5*T));
```

Protože nástroj v nižších polohách nezní příliš dobře, je i zde použita metoda převzorkování, resp. generuje se tón o frekvenci 220Hz (malé a), ale s kratším trváním a s vyšší vzorkovací frekvencí. Při přehrávání původní vzorkovací frekvencí zní tón s požadovanou výškou.

```
if(freq<220)  
    fs=fs*(220/freq);  
    dur=dur*(freq/220);  
    freq=220;  
end
```

Na oba typy String Ensemble byl dále použit efekt chorus. Ten náhodně zpozdí několik realizací tónu. Každá realizace je navíc generovaná s odlišnou základní frekvencí (je možné volit rozptyl frekvence, konkrétně pro String Ensemble je volen 2 Hz).

String Ensemble 1 se od String Ensemble 2 liší v době náběhu a dozvuku. String Ensemble 2 má pomalejší náběh a delší dozvuk; v nastavení chorusu je proto voleno delší zpoždění (a každá realizace tónu navíc používá ADSR obálku s pomalejším attackem). Pro String Ensemble 2 je dále užita impulzní odezva uložená v souboru IR2.mat. Jedná se o impulzní odezvu „Large Long Echo Hall.wav“ z archivu IMreverbs.zip ze stránek voxengo.com.² Pro nižší tóny než malé a je nutné impulzní odezvu převzorkovat.

1.4 Frekvenční modulace

Jedná se o metodu, kterou poprvé pro syntézu zvuku použil John Chowning [5].

Předpis frekvenční modulace je následující [6]:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

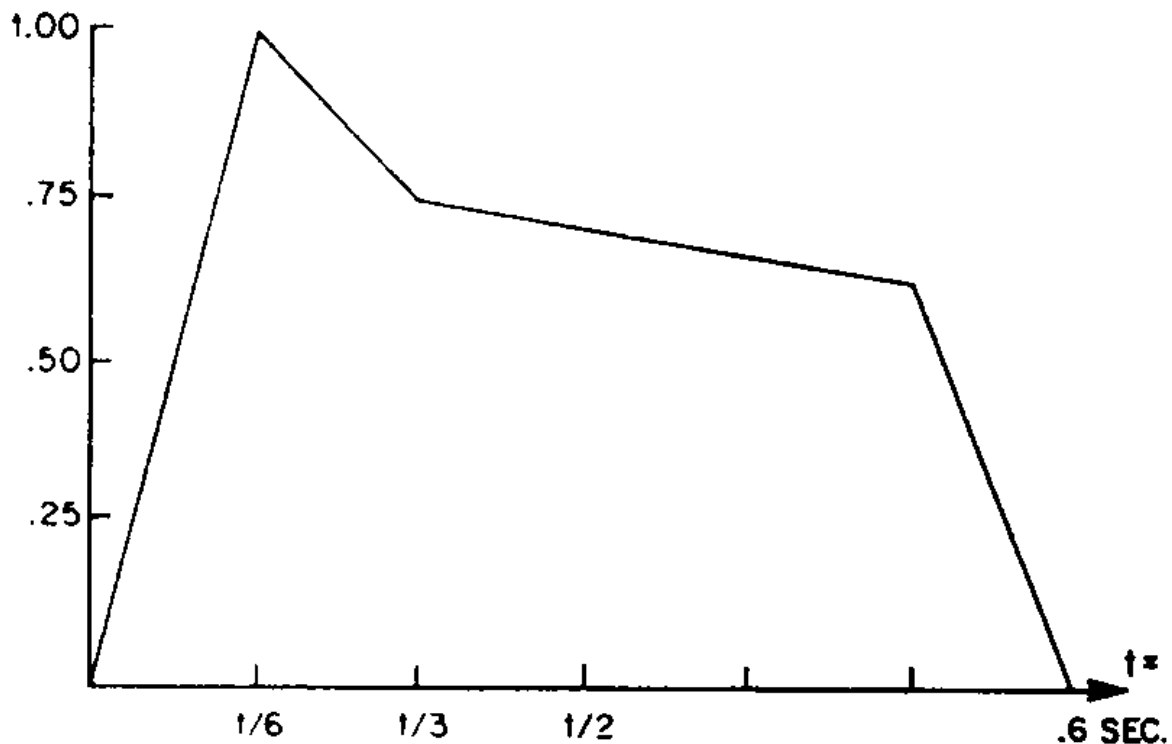
kde A je amplituda, f_c je nosná frekvence, f_m je modulační frekvence a β je modulační index. Spektrum frekvenční modulace (a obecně úhlových modulací) lze popsat pomocí Besselových funkcí. Nevýhodou je, že spektrum je obecně nekonečně široké. Nicméně vyšší spektrální čáry padají postupně k nule, takže pro šířku pásma, kde se nacházejí podstatné spektrální čáry se dá nalézt empirický Carsonův vztah

$$B \approx 2(1 + \beta) f_m$$

Pomocí FM syntézy byly vytvořena čtveřice žesťových nástrojů (viz brassFM.m – lesní roh, pozoun, tuba a „generic brass“). Nicméně ve Vltavě hraje pouze lesní roh, protože aditivně syntetizovaná trubka zní jako tuba o něco lépe a pozoun v midi skladbě nehraje.

Všechny žesťové nástroje byly vytvořeny použitím obálky na obrázku 2 (převzato z [5]) jak na amplitudu, tak na modulační index. Jednotlivé nástroje se od sebe liší jen drobnými úpravami obálky (poloha bodů) a parametry modulace, jako například maximem modulačního indexu (tedy šířkou spektra) nebo poměrem mezi nosnou a modulační frekvencí (H).

² <http://www.voxengo.com/impulses/>. Přečtěte si prosím licenci k impulzním odezvám v souboru licence.txt uvedeném v kořenovém adresáři semestrální práce.



Obrázek 2: Obálka pro žesťový charakter zvuku (převzato z [5])

1.5 Waveshaping syntéza

Jedná se o zkreslovací syntézu, [1] kdy si připravíme přenosovou funkci systému, do ní vložíme vstupní signál (sinus, kosinus) a na výstupu získáme výsledný (zkreslený) signál s bohatším spektrem. Přenosová funkce může být obecně jakákoliv.

K napodobování amplitudového spektra nástrojů se nicméně používají Čebyševovy polynomy prvního druhu. Polynom prvního druhu n -tého stupně totiž syntetizuje právě n -tou harmonickou. Tudíž stačí ováhat příslušné polynomy hodnotami pro jednotlivé harmonické odečtenými z amplitudového spektra nástroje a výsledek sečíst a tím získáme přenosovou funkci. Když do ní dosadíme harmonický signál, získáme signál s amplitudovým spektrem podobným původnímu nástroji.

Do Vltavy byly pomocí této metody syntetizována trojice dřevěných dechových nástrojů (viz funkce reedWaveShaping.m). Konkrétně byl syntetizován hoboj, klarinet a flétna. Amplitudové spektrum nástrojů bylo odečteno ze souborů z databáze na stránkách předmětu³.

Odečtené vrcholky jednotlivých harmonických:

Hoboj (soubor hobo_j_1.wav):

```
amp1=[0.0310 0.0222 0.0366 0.1062 0.0603 0.0079 0.0019 ...
      0.0030 0.0061 0.0079 0.0068 0.0054 0.0019 0.0009];
```

Klarinet (soubor klarinet_3.wav):

```
amp1= [0.1708 0.0010 0.1062 0.0038 0.0456 ...
      0.0052 0.0061 0.0016 0.0041 0.0035 ...
      0.0013 0.0024 0.0010 0.0013 0.0018];
```

Flétna (soubor flétna_03.wav)

```
amp1=[0.0984 0.0908 0.0398 0.0057 0.0036];
```

³ <http://sami.fel.cvut.cz/syn/>

Použitím následujícího kódu lze v MATLABu (2014b a novější) získat výsledný polynom použitý ve funkci reedWaveShaping.m:

```
syms x;  
k=1:length(ampl);  
polynoms=chebyshevT(k, x);  
weighedPolynoms=ampl.*polynoms;  
polynom=sum(weighedPolynoms);  
digits(7)  
vpa(expand(polynom))
```

Výsledný polynom:
hoboj:

```
sig=7.3728*x.^14 +7.7824*x.^13 -14.7456*x.^12 - 18.3296*x.^11 ...  
+ 6.3488*x.^10 + 14.0288*x.^9 + 3.4048*x.^8 - 3.2128*x.^7 ...  
- 2.5536*x.^6 + 0.5424*x.^5 + 0.9152*x.^4 - 0.8808*x.^3 ...  
- 0.6646*x.^2 + 0.2142*x + 0.0757;
```

klarinet:

```
sig=29.4912*x.^15 + 10.6496*x.^14 - 106.496*x.^13 ...  
- 32.3584*x.^12 + 153.9072*x.^11 + 38.2976*x.^10 ...  
- 112.6912*x.^9 - 22.6304*x.^8 + 43.5456*x.^7 ...  
+ 7.3056*x.^6 - 7.7584*x.^5 - 1.3856*x.^4 + 0.2924*x.^3 ...  
+ 0.1436*x.^2 + 0.0461*x - 0.0032;
```

flétna:

```
sig=0.0576*x.^5 + 0.0456*x.^4 + 0.0872*x.^3 ...  
+ 0.136*x.^2 - 0.003*x - 0.0851;
```

1.6 Rissetův buben

Metoda pro syntézu bicích, vytvořená Jean-Claudem Rissetem. Jádru (funkce rissetDrumKernel.m) bylo vytvořeno v rámci minulé semestrální práce [7].

Jedná se o metodu, kdy se sčítá základní tón, inharmonická složka (neceločíselné násobky základní frekvence) a sinusovkou kruhově modulovaný filtrovaný šum.

Do Vltavy byly touto metodou syntetizovány tři perkusní nástroje – velký buben, triangel a ride činel (pouze v delší verzi Vltavy).

2) Nekonečné glissando (vlastní téma)

Jako volné téma jsem zvolil nekonečné glissando (nebo také Sheperdův tón)[8]. Psycholog Roger Sheperd zjistil, že ačkoliv člověk slyší tóny stále ve stejné frekvenční oblasti, má pocit, že frekvence se neustále snižuje ačkoliv zůstává pořád ve stejném rozsahu. Jean Claude-Risset metodu rozšířil rovněž na plynulý přechod – glissando. Následující obrázek přibližuje jeho metodu (převzato z [8])

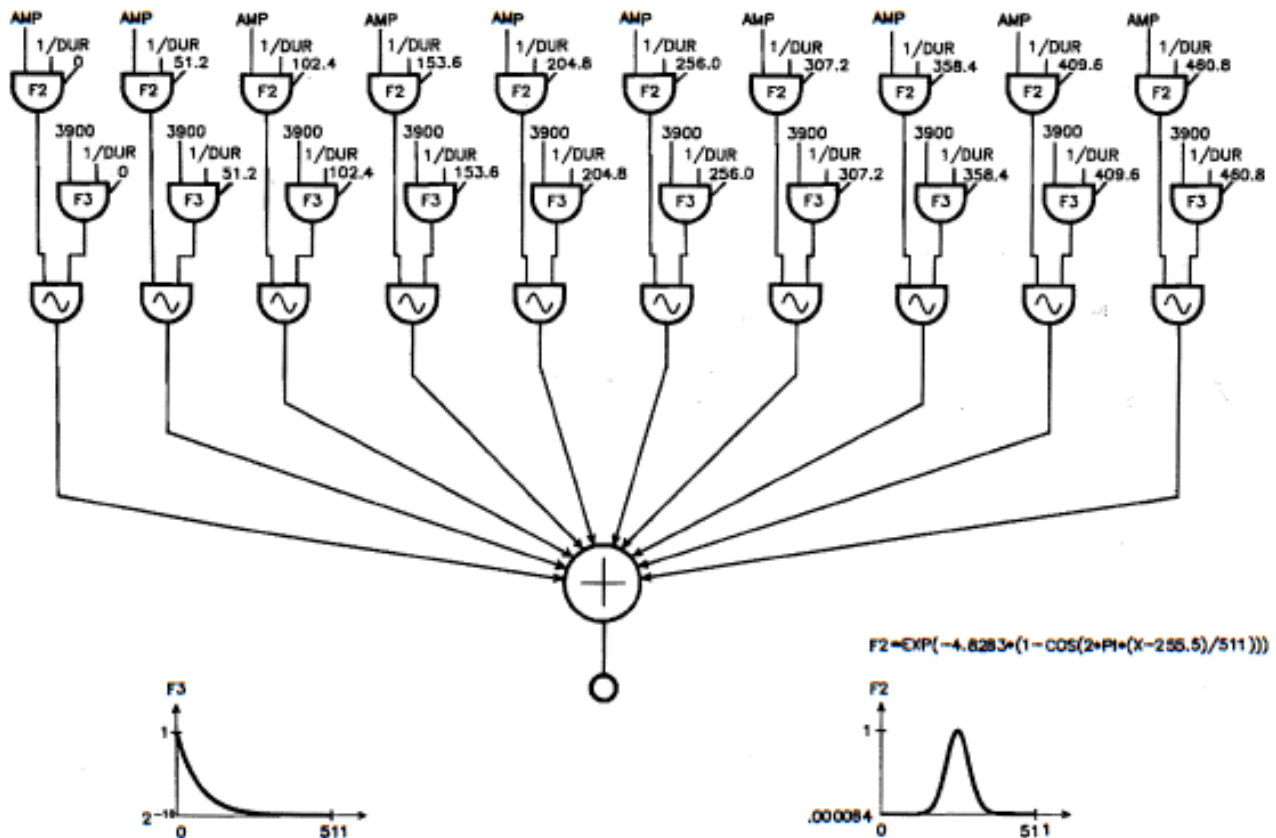


FIGURE 4.29 Design for endless glissando based on Risset. (Based on example in Risset's Introductory Catalogue of Computer-Synthesized Sounds. Reprinted with permission of Jean-Claude Risset.)

Obrázek 3: Nekonečné glissando podle Jean Clauda Risseta (převzato z [8])

Jedná se o desítku oscilátorů, kde každý sleduje stejnou amplitudovou i frekvenční obálku, jen posunutou o desetinu délky obálky.

Frekvenční a amplitudové obálky jsou následující:

$$fo = \exp(-10 * \log(2) * t / T);$$

$$ao = \exp(-4.8283 * (1 - \cos(2 * \pi * (t / T - 0.5))));$$

$$ao = ao - ao(1);$$

Protože amplitudová obálka nekončí v nule a přestože je nízká, tak je syntetizovaný tón stále slyšet, je od amplitudové obálky odečtena hodnota na jejím začátku.

Jelikož se jená o desítku stejných oscilátorů se stejnými obálkami, je možné mít jeden syntetizovaný průběh (periodu) a ten s patřičným zpožděním přičíst k výslednému průběhu. Proto celá syntetizující část se dá shrnout následujícím kódem.

```
signal=zeros(1, dur*fs);
per=(ao.*cos(2*pi*f*fo.*(t+4*iStep/fs)));
for(k=0:nOsc-1)
    signal=signal+per(1+mod(x+k*iStep, length(per)));
end
```

3) Seznam použité literatury

- [1]: BURK, Phil, Larry POLANSKY, Douglas REPETTO, Mary ROBERTS a Dan ROCKMORE. *Music and Computers. A Theoretical and Historical Approach* [online]. 1997-2008 [cit. 2016-12-31] Dostupné z: <http://cmc.music.columbia.edu/MusicAndComputers/>
- [2]: SMITH, Julius. *Making Virtual Electric Guitars and Associated Effects Using Faust* [PDF]. [cit. 2016-12-31] Dostupné z: https://ccrma.stanford.edu/realsimple/faust_strings/faust_strings.pdf
- [3]: ČMEJLA, Roman. *SYN03lab (Materiál k třetímu cvičení předmětu Syntéza audio signálů)* [online]. [cit. 2016-12-31] Dostupné z: <http://sami.fel.cvut.cz/syn/SYN03lab.txt>
- [4]: ČMEJLA, Roman. *SYN06Lab (Materiál k šestému cvičení předmětu Syntéza audio signálů)* [online]. [cit. 2016-12-31] Dostupné z: <http://sami.fel.cvut.cz/syn/SYN06lab.txt>
- [5]: CHOWNING, John M.. *The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation* In: *Journal of Audio Engineering Society*, Volume 21, Number 7, pp. 526-534. 21.7.1973 Dostupné také z: <http://users.ece.gatech.edu/~mcclella/2025/labs-f04/Chowning.pdf>
- [6]: DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD: *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN: 80-7300-132-2
- [7]: SMUTNÝ, Miroslav: *Rissetův buben. Zpráva k semestrální práci z předmětu Syntéza multimediálních signálů*. Praha: ČVUT v Praze, 2015. ISBN: nemá
- [8]: DODGE, Charles a JERSE, Thomas A.: *Computer music: synthesis, composition and performance*. New York: Schirmer Books, 2 ed. 1997. ISBN: 9780028646824