

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE

HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTA

Hudební umění

Zvuková tvorba

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

METODY MODULAČNÍ SYNTÉZY ZVUKU

Jan Vaniš

Vedoucí práce: Ing. Milan Guštar, Ph.D.

Oponent práce: doc. MgA. Ing. Ondřej Urban, Ph.D.

Datum obhajoby: 8. září 2020

Přidělovaný akademický titul: BcA.

Praha, 2020

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

MUSIC AND DANCE FACULTY

Art of Music

Sound production

BACHELOR THESIS

SYNTHESIS METHODS USING SOUND MODULATION

Jan Vaniš

Thesis supervisor: Ing. Milan Guštar, Ph.D.

Opponent: doc. MgA. Ing. Ondřej Urban, Ph.D.

Date of defence: 8. September 2020

Academic degree confered: BcA.

Prague, 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Metody modulační syntézy zvuku“ vypracoval(a) samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne

.....

podpis diplomanta

Upozornění

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

Evidenční list

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto práci použil pouze ke studijním účelům a prohlašuje, že jí vždy řádně uvede mezi použitými prameny.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Milanu Guštarovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, za cenné rady a trpělivost při konzultacích.

Abstrakt

Práce si klade za úkol popsat jednotlivé metody syntézy zvuku, které využívají modulaci jeho parametrů v čase. Vysvětluje, jak se liší jednotlivé metody, jak v barvě zvuku, tak ve svém principu a praktickém využití. Uvádí také nejběžnější zvukové efekty, které využívají modulaci. Poukazuje na podobnosti, ale i rozdíly mezi syntetickým zvukem a zvukem akustických hudebních nástrojů. Zaměřuje se také na společensko-historický kontext syntézy zvuku a vývoj elektronických hudebních nástrojů. Cílem práce je seznámit hudebníka s tvůrčím využitím zvukové syntézy s důrazem na modulační syntézu.

Součástí práce je také experiment, který zkoumá hranici mezi modulačním efektem a modulační syntézou.

Práce je doplněna o obrazovou přílohu.

Abstract

Main goal of the thesis is to explain ideas and principles of sound synthesis using modulation of sound parameters. The thesis explains the differences between the timbre, practical usage and other aspects of each type of modulation. It includes the most common sound effects, which use modulation of sound parameters. It also covers the similarities and differences between synthetic and acoustic sound. The thesis deals with social and historical context of sound synthesis and development of synthesizers. Whole thesis is designed for musicians, to help them understand sound synthesis using sound modulation.

Part of the thesis is practical experiment, that examines the boundary between modulation effect and modulation synthesis.

Thesis is supplemented with image attachments.

Obsah

Seznam příloh.....	1
Seznam použitého označování a zkratek	2
Předmluva.....	3
Úvod	4
1 Kmitavý pohyb.....	5
2 Mechanické vlnění	10
3 Objektivní vlastnosti periodických signálů.....	11
3.1 Frekvence	11
3.2 Délka periody.....	11
3.3 Amplituda.....	11
3.4 Fáze.....	11
3.5 Vlnová délka	11
3.6 Spektrální složení	12
3.7 Časový průběh	13
4 Zvuk	14
5 Subjektivní vlastnosti zvukových signálů	15
5.1 Výška tónu.....	15
5.2 Hlasitost.....	15
5.3 Barva zvuku.....	16
6 Topologie zvukových signálů	17
6.1 Stacionární signály	17
6.1.1 Deterministické signály	17
6.1.2 Stochastické signály.....	18
6.2 Nestacionární signály	18
6.2.1 Tranzientní signály	18
6.2.2 Kontinuální signály	18
7 Obecný model hudebního nástroje	19
7.1 Excitátor.....	19
7.2 Oscilátor	19
7.3 Rezonátor	20
7.4 Radiátor	21
8 Obecný model syntetizéru.....	22
8.1 Excitátor.....	22
8.2 Oscilátor	22
8.3 Filtr.....	23
8.4 Zesilovač	23

8.5	Generátor obálky	24
9	Syntéza zvuku a její historie.....	25
10	Modulace.....	29
10.1	Periodická a neperiodická modulace.....	29
10.2	Spojitá a diskrétní modulace	29
10.3	Amplitudová modulace	30
10.4	Spektrální modulace.....	34
10.5	Kruhová modulace.....	35
10.6	Frekvenční modulace	36
10.7	Fázová modulace	43
10.8	Fázové zkreslení	43
10.9	Modulace tvaru vlny.....	45
10.10	Modulace šířky pulzu	46
10.11	Modulace cyklu oscilátoru	47
10.11.1	Hard Sync	47
10.11.2	Soft Sync.....	48
11	Užívání modulace	51
11.1	Ve sdělovací technice.....	51
11.2	Modulace jako zvukový efekt.....	52
12	Hranice mezi syntézou a efektem	57
12.1	Modulátory	57
12.2	Závislost modulační frekvence na nosné frekvenci	61
12.2.1	Amplitudová a kruhová modulace.....	61
12.2.2	Frekvenční a fázová modulace	63
12.3	Závislost modulační frekvence na modulačním indexu	64
12.3.1	Amplitudová modulace.....	64
12.3.2	Frekvenční a fázová modulace	65
13	Závěr	67
	Seznam použité literatury	68
Příloha 1:	Tabulka naměřených hodnot 1.....	70
Příloha 2:	Tabulka naměřených hodnot 2.....	71

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot 1

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot 2

Seznam použitého označování a zkratek

- ADSR – jednotlivé části časového průběhu amplitudy signálu (Attack, Decay, Sustain, Release)
- AM – amplitudová modulace (Amplitude Modulation)
- ASK – klíčování amplitudovým posuvem (Amplitude Shift Keying)
- DAW – software určený ke zvukové tvorbě (Digital Audio Workstation)
- DCO – digitálně řízený oscilátor (Digitally-controlled Oscillator)
- DCA – digitálně řízený zesilovač (Digitally-controlled Amplifier)
- DCF – digitálně řízený filtr (Digitally-controlled Filter)
- FM – frekvenční modulace (Frequency Modulation)
- FSK – klíčování frekvenčním posuvem (Frequency Shift Keying)
- ISB – metoda stereofonní AM (Independent Side Band)
- ITU – Mezinárodní telekomunikační unie (International Telecommunication Union)
- LFO – nízko-frekvenční oscilátor (Low Frequency Oscillator)
- Master – řídící jednotka
- MIDI – standard pro digitální komunikaci mezi elektronickými nástroji (Musical Instrument Digital Interface)
- PAM – pulzně amplitudová modulace (Pulse Amplitude Modulation)
- Patch – projekt v prostředí MAX/MSP
- PCM – pulzně kódová modulace (Pulse Code Modulation)
- Plug-in – doplňující (zásvný) modul DAW, rozšiřující jeho funkčnost
- PM – fázová modulace (Phase Modulation)
- PSK – klíčování fázovým posuvem (Phase Shift Keying)
- PWM – modulace šířky pulsu (Pulse Width Modulation)
- RM – kruhová modulace (Ring Modulation)
- ROM – typ elektronické paměti (Read Only Memory)
- Slave – řízená jednotka
- Sweep – průběžná změna frekvence signálu s konstantní amplitudou
- VCO – napětím řízený oscilátor (Voltage-controlled Oscillator)
- VCA – napětím řízený zesilovač (Voltage-controlled Amplifier)
- VCF – napětím řízený filtr (Voltage-controlled Filter)
- VKV – velmi krátké vlny (frekvenční pásmo 30-300 MHz)
- VST – softwarové rozhraní pro komunikaci mezi DAW a plug-iny (Virtual Studio Technology)

Předmluva

O syntetizéry se zajímám zhruba stejně dlouho jako se věnuji tvůrčí práci se zvukem. Vždy mě na nich velice zajímalá ta prakticky nevyčerpatelná paleta zvukových možností. Dlouhou dobu jsem pracoval se syntetickými zvuky pouze ve formě plug-in uvnitř DAW, ale můj zájem o ně vzrostl teprve s koupí prvního hardwarového syntetizéru. Tou dobou jsem se začal zajímat o funkční principy syntetizérů a jejich vlivy na výsledný zvuk. Začal jsem objevovat stále složitější syntetizéry a modulární systémy. Avšak FM syntéza, ale i ostatní typy modulačních syntéz, pro mě vždy byly poměrně neuchopitelné. I z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že se ve své bakalářské práci budu věnovat tomuto tématu a pokusím se shrnout vše, co jsem se o syntéze zvuku pomocí modulace zatím dozvěděl.

Úvod

Tato práce postupně probere problematiku jednotlivých metod syntézy zvuku s důrazem na metody modulační syntézy. Rozebere jejich historii a principy a vysvětlí podobu výsledného spektra – barvy zvuku. Věnuje se také procesu programování jednoduchých modulátorů pracujících na různých principech. Na nich zkoumá, jestli je možné jednoznačně určit, kde se nachází hranice mezi vytvářením nového zvuku – syntézou a efektem.

V prvních třech kapitolách se věnuje signálům v obecné rovině. Popisuje, jakým způsobem vznikají a jaké jsou jejich objektivní vlastnosti.

Ve čtvrté až šesté kapitole popisuje, co jsou zvukové signály, jak je můžeme rozdělit a jaké subjektivní vlastnosti je definují.

V sedmé a osmé kapitole práce srovnává obecný model hudebního nástroje s obecným modelem syntetizéru. Vysvětluje, v čem se syntetizéry tradičním nástrojům podobají a v čem se naopak odlišují.

Ve deváté kapitole dochází k nastínění jednotlivých metod modulační syntézy zvuku. Jsou zde popsány principy jednotlivých metod, případně nástroje pro určité metody typické.

Desátá kapitola se věnuje modulaci. Vysvětluje, jak se modulace rozdělují a jakou podobu mají jednotlivé metody.

Jedenáctá kapitola popisuje praktické využití modulace. Nastíňuje použití modulace ve sdělovací technice, ale také v hudbě.

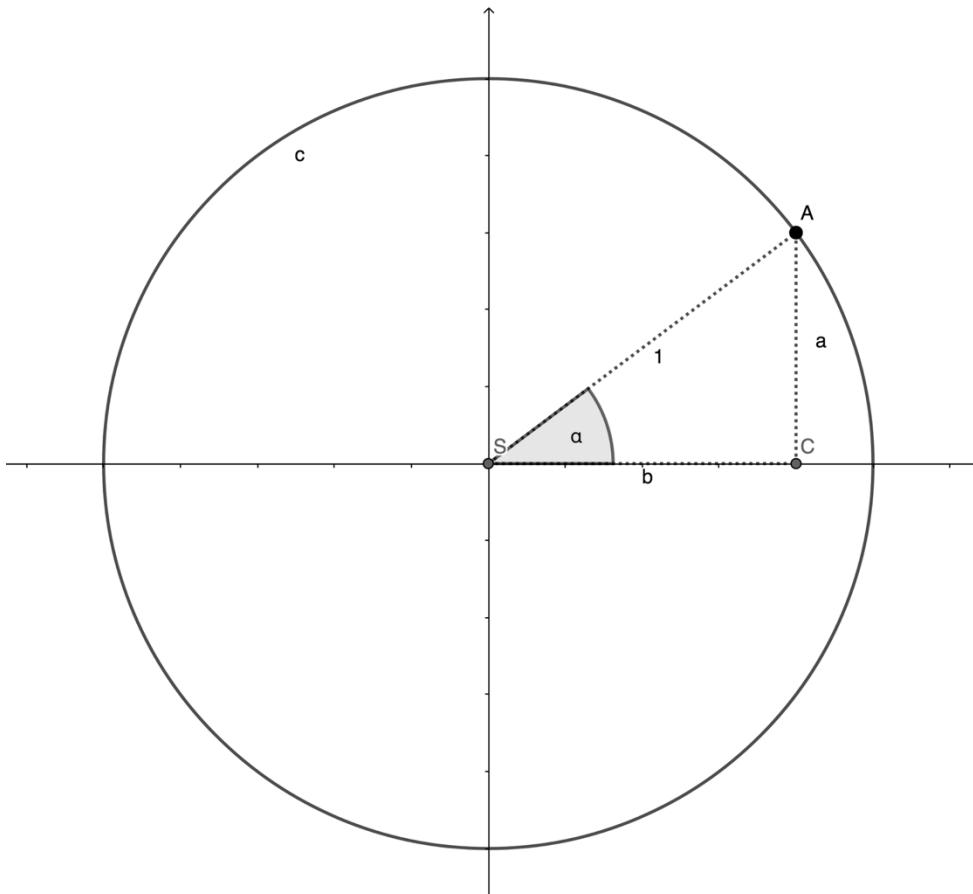
Dvanáctá kapitola obsahuje experiment, který se snaží zjistit kde leží pomyslná hranice mezi modulační syntézou a efektem.

1 Kmitavý pohyb

Jestliže na těleso nepůsobí žádné vnější síly nebo výslednice sil je nulová, pak těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Takto zní první Newtonův zákon – Zákon setrvačnosti. Rovnoměrný přímočarý pohyb je nejelementárnější druh pohybu tělesa. Těleso, pohybující se rovnoměrným přímočarým pohybem, má konstantní rychlosť a pohybuje se po přímce.

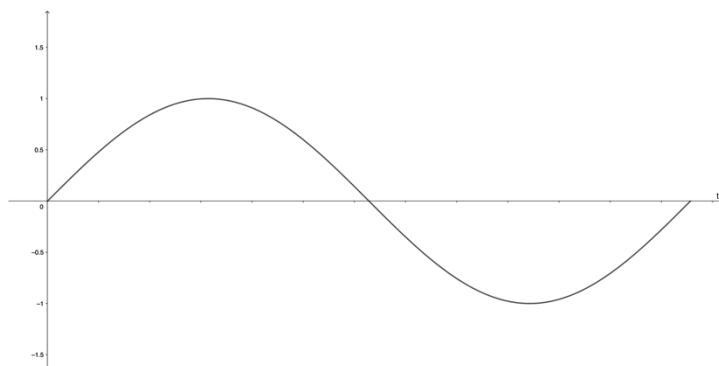
Pokud trajektorií není přímka, ale kružnice, mluvíme o rovnoměrném pohybu po kružnici. V takovém případě těleso začíná pohyb v určitém bodě kružnice a po oběhnutí celého jejího obvodu se do tohoto bodu navrací. Pokud je těleso v pohybu a nepůsobí na něj žádné vnější síly nebo výslednice sil je nulová, tento děj se nekonečně krát opakuje.

Ke grafickému znázornění časového průběhu takového pohybu můžeme využít jednotkovou kružnici v kartézské soustavě souřadnic. Poloměr takové kružnice je 1. V každém místě kružnice můžeme vytvořit úsečku mezi jejím středem S a pohybujícím se bodem A, stejně jako na obrázku. Úhel, který vznikne mezi úsečkou SA a osou x, označíme α . Doplňením kolmice na osu x, která prochází bodem A, vznikne pravoúhlý trojúhelník. K určení velikostí jeho stran tedy můžeme použít goniometrické funkce. Funkce $\sin(\alpha) = \frac{\text{protilehlá}}{\text{přepona}} = \frac{a}{1} = a$. Hodnotou funkce sinus tedy rozumíme souřadnici bodu A na ose y.



Obrázek 1.1: Jednotková kružnice

Protože bod A začíná svůj pohyb v místě, kde úhel $\alpha = 0^\circ$, bude i hodnota $\sin(\alpha)$ nulová. Bude-li se bod A po kružnici pohybovat rovnoměrným pohybem, bude časový vývoj souřadnic na ose y odpovídat funkci $\sin(x)$:



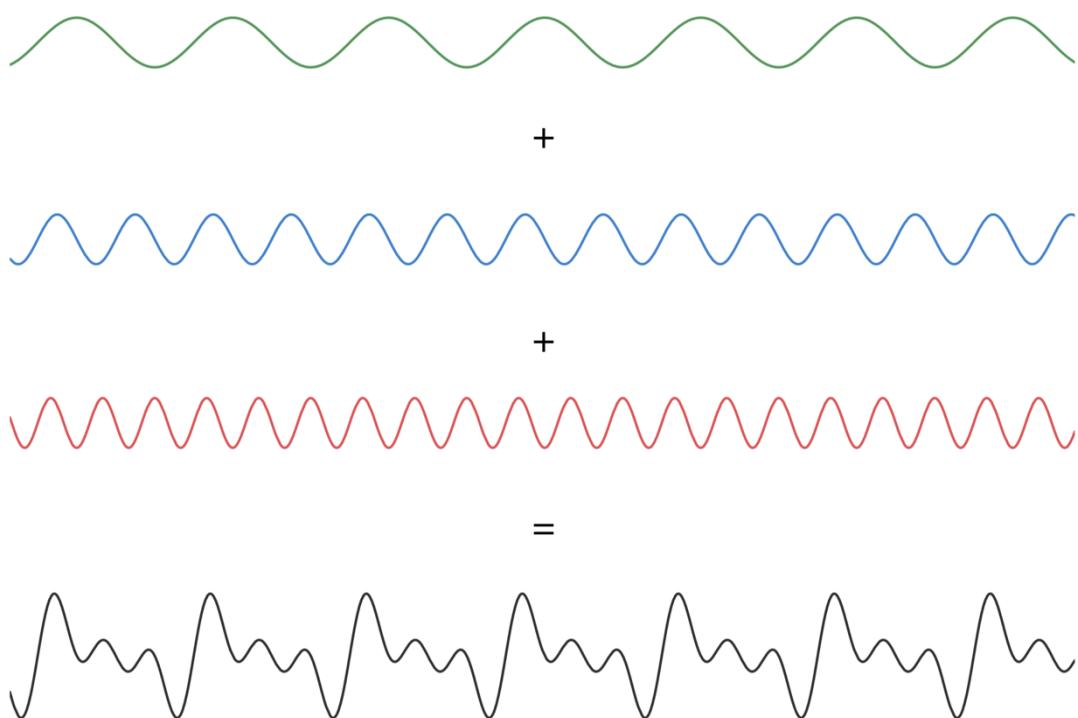
Obrázek 1.2: Jedna perioda funkce $\sin(x)$

Mějme bod B , který se nachází na ose y a v závislosti na funkci sinus mění svoji souřadnici $[0, y]$. Nebude se tedy jednat o pohyb po kružnici, ale o nerovnoměrný přímočarý pohyb. Pohyb bodu A , ale i pohyb bodu B můžeme interpretovat jako

harmonický kmitavý pohyb (oscilaci). Funkce sinus je tedy časovým průběhem neelementárnějšího harmonického kmitavého pohybu.

Kmitání je pohyb tělesa, při kterém je toto těleso vázáno na určitou rovnovážnou polohu (polohu, při níž je výslednice všech sil působících na těleso nulová a těleso tak setrvává v klidu). Těleso se při kmitání od této rovnovážné polohy vzdaluje do určité maximální vzdálenosti a poté se do ní působením sil opět vrací. Příkladem může být pohyb tělesa zavěšeného na pružině, či kývání kyvadla.

Kmitá-li těleso periodicky a okamžité výchylky z rovnovážné polohy jsou závislé na funkci sinus, můžeme kmit vyjádřit pomocí vztahu $y = A \sin(\omega t + \varphi)$. Pak mluvíme o harmonickém kmitání. Je-li pohyb periodický, ale časový průběh výchylek neodpovídá funkci sinus, jedná se o anharmonické kmitání. Anharmonický kmit lze vyjádřit jako superpozici (Newtonův čtvrtý pohybový zákon) alespoň dvou harmonických kmitů. Frekvence jednotlivých harmonických složek anharmonického kmitu jsou v celočíselných poměrech, což popisují Fourierovy řady. Časový průběh anharmonického kmitu pak závisí na amplitudách jednotlivých harmonických složek. Následující obrázek ukazuje časový průběh tří harmonických kmitů a jejich superpozici. Poměry frekvencí harmonických kmitů jsou 1:2:3.



Obrázek 1.3: Superpozice tří sinových kmitů

Aby se kmitající těleso (oscilátor) uvedlo do kmitavého pohybu, musí na něj působit vnější síla, které říkáme buzení. Příkladem mechanického oscilátoru může být kyvadlo. Abychom kyvadlo vybudili, musíme mu dodat energii. Jeho celkovou energii pak můžeme rozdělit na potenciální a kinetickou. V krajních polohách (polohách s maximální výchylkou) je přítomná pouze potenciální energie. Působením gravitační síly se však kyvadlo vrací do rovnovážné polohy a potenciální energie se postupně přeměňuje v kinetickou. V rovnovážné poloze je naopak kinetická energie maximální (pokud je kyvadlo stále v pohybu) a potenciální je nulová. Tyto energetické změny se neustále opakují, dokud kyvadlo z důvodu tlumení kmitů (tření, odpor a další faktory) neztratí veškerou energii a nezastaví se. Takový druh kmitání je neperiodický a nazýváme ho tlumené kmitání. Pokud bychom kyvadlo chtěli ve kmitavém pohybu udržet, museli bychom mu dodávat energii, tedy pravidelně kompenzovat energetické ztráty způsobené tlumením. Pak by docházelo k nucenému kmitání kyvadla. Pokud bychom energii doplňovali se stejnou frekvencí, jako je vlastní frekvence kyvadla, došlo by k rezonanci. Rezonance je dle akademického slovníku

cizích slov „shoda kmitočtů vlastních kmitů soustavy (rezonátoru) s kmitočtem budícího zdroje.“¹ Při rezonanci dochází k efektivnějšímu přenosu budící energie na kmitající soustavu. Proto je díky rezonanci možné dosáhnout poměrně velkých amplitud poměrně malou budicí silou. Frekvencím, na kterých dochází k rezonanci, se říká rezonanční a může jich být více než jedna.

¹ PETRÁČKOVÁ, Věra – KRAUS, Jiří. *Akademický slovník cizích slov: [A-Ž]*. Praha: Academia, 1997. ISBN 80-200-0607-9.

2 Mechanické vlnění

Jako vlnění se označuje šíření kmitů prostorem. V prostředí, které je pružné, jsou částice provázány pružnými vazebními silami. Rozkmitá-li se jedna částice, kmit se silami přenese na sousední a dojde k šíření vlny. Existuje celá řada druhů vlnění, které se liší podle prostředí, způsobu šíření a dalších vlastností:

Vlnění dělíme podle orientace výchylek kmitů ke směru šíření vlny na příčné a podélné. Příčné vlnění je takové, které se skládá z kmitů kolmých na směr přenosu energie (příkladem může být vlnění struny či světelné vlnění). Naopak při podélném vlnění je výchylka kmitů rovnoběžná se směrem šíření vlny (zvuková vlna).² Zajímavé je, že v pevných látkách se může šířit vlnění příčné i podélné, kdežto v plynech a kapalinách pouze podélné.³

Další způsob, jak dělit vlnění, je podle typu šíření. Zde mluvíme o postupném a stojatém vlnění. Postupné vlnění je takové, které vzniká postupným rozkmitáním všech částic určitého pružného prostředí. Všechny částice v řadě následně kmitají se stejnou amplitudou, ale rozdílnou fází. Stojaté vlnění vzniká interferencí dvou stejných, avšak proti sobě jdoucích postupných vlnění. Vyznačuje se tím, že každá částice v řadě vlnění má stejnou fazu a různou, neměnnou amplitudu – místa s nejvyšší amplitudou se nazývají kmitny a místa s nejnižší, nulovou amplitudou se nazývají uzly. V realitě se však nejčastěji setkáváme s tzv. částečně stojatým vlněním. To vzniká, pokud interferující postupná vlnění nemají stejnou amplitudu a projevuje se větším či menším kmitáním uzlových bodů.

² Příčné vlnění. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-28]. Dostupné z:

cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%AD%C4%8Dn%C3%A9_vln%C4%9Bn%C3%AD

³ SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

3 Objektivní vlastnosti periodických signálů

K plnému pochopení modulace je třeba znát, jaké parametry má periodický signál – tedy co vše je vlastně možné modulovat. Každý signál má určité objektivní vlastnosti, které spolu úzce souvisí a signál definují. Jsou to:

3.1 Frekvence

Frekvence neboli kmitočet, je veličina, která vyjadřuje počet kmitů za vteřinu. Značí se f a má jednotku Hz (Hertz).

3.2 Délka periody

Periodu signálu vypočítáme jako převrácenou hodnotu frekvence:

$T = f^{-1}$. Perioda pak určuje dobu trvání jednoho cyklu kmitavého pohybu.

3.3 Amplituda

Amplituda je maximální výchylka hodnoty určité veličiny. Značí se zpravidla podle veličiny, která se mění. V akustice se můžeme setkat s označením A .

3.4 Fáze

Fáze signálu (φ) je bezrozměrná veličina, která popisuje okamžitý stav kmitavého pohybu. Fázi můžeme vyjádřit pomocí úhlu ve stupních či radiánech. Signál však nemusí nutně začínat (v čase $t = 0$) s nulovou fází. Pokud si pustíme dva po sobě jdoucí totožné zvukové signály, přičemž jeden bude oproti druhému fázově zpozděn, budou lidskému uchu znít zcela stejně. Fáze se ovšem vždy projeví při jejich interferenci. Amplitudy dvou interferujících signálů se odečtou, pokud bude fáze signálů opačná, a sečtou, pakliže bude fáze signálů stejná.

S fází úzce souvisí úhlová frekvence (ω), která vyjadřuje změnu fáze za jednotku času. Úhlovou frekvenci můžeme vyjádřit také pomocí periody či frekvence:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

3.5 Vlnová délka

Vlnová délka (λ) je vzdálenost dvou nejbližších bodů periodického vlnění, které vůči sobě kmitají ve fázi. Vlnová délka je tedy vzdálenost, kterou vlnění urazí během doby

jedné periody. Abychom mohli vlnovou délku určit, potřebujeme znát nejen dobu periody (případně frekvenci), ale také rychlosť šírenia vlnenia. V případě zvuku se jedná o rychlosť šírenia zvuku. Ta sa značí c a za standardných podmínek ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) se ve vzduchu rovná $343\text{ }m \cdot s^{-1}$ (obecně môžeme tvrdiť, že rychlosť zvuku roste s teplotou vzduchu a nezávisí na tlaku). Vlnovou délku pak môžeme určiť vztahem:

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f}$$

3.6 Spektrální složení

Spektrum zvukového signálu je numerické či grafické znázornenie závislosti veškerých složiek, ze ktorých sa signál skladá, na jejich frekvenci.⁴ K jeho vytvoreniu slouží Fourierova transformácia.

Deterministické signály majú spektrum čárové (diskrétné). Toto spektrum zobrazuje velkosť amplitúd jednotlivých frekvenčných složiek či ich fází. Na obrázku 3.6.1 je spektrum sinového signálu o frekvencii 1 kHz :

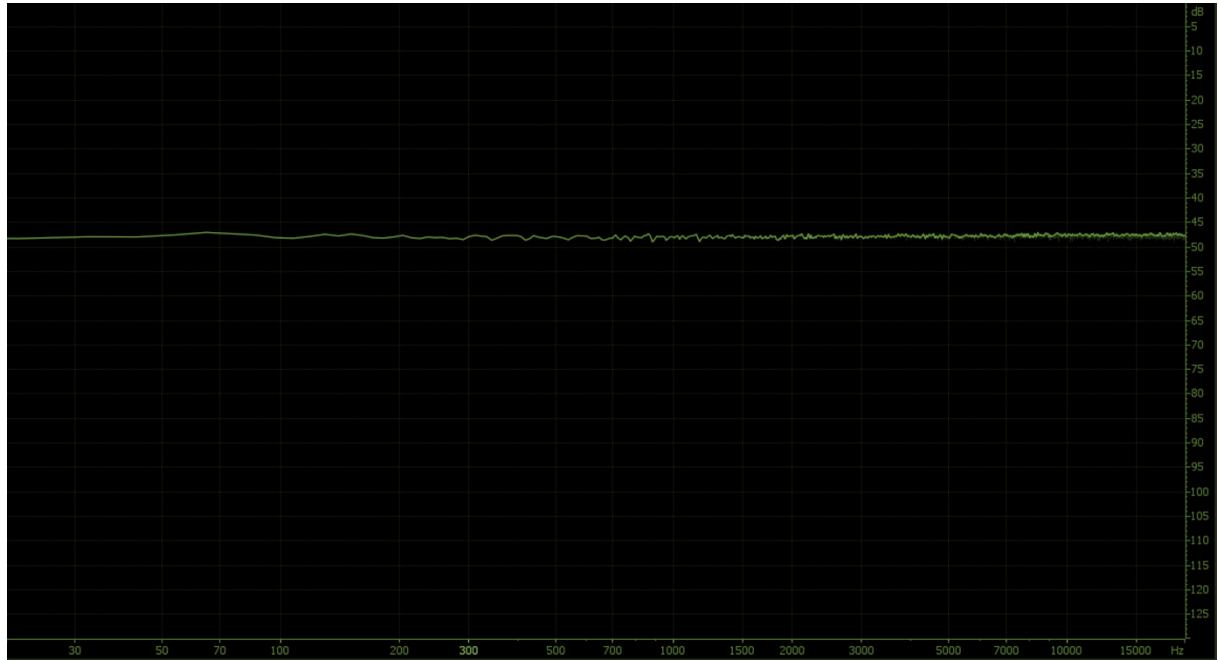


Obrázek 3.6.1: Spektrum sinového signálu o frekvencii 1 kHz

Stochastické signály vykazujú spektrum spojité. Toto spektrum namiesto svislých čiar zobrazuje jednu spojitou čáru. Ta zobrazuje závislosť hustoty amplitúd či výkonu

⁴ SYROVÝ, Václav – GUŠTAR, Milan. *Malý slovník základných pojmov z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 2. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2012. ISBN 978-80-7331-237-4.

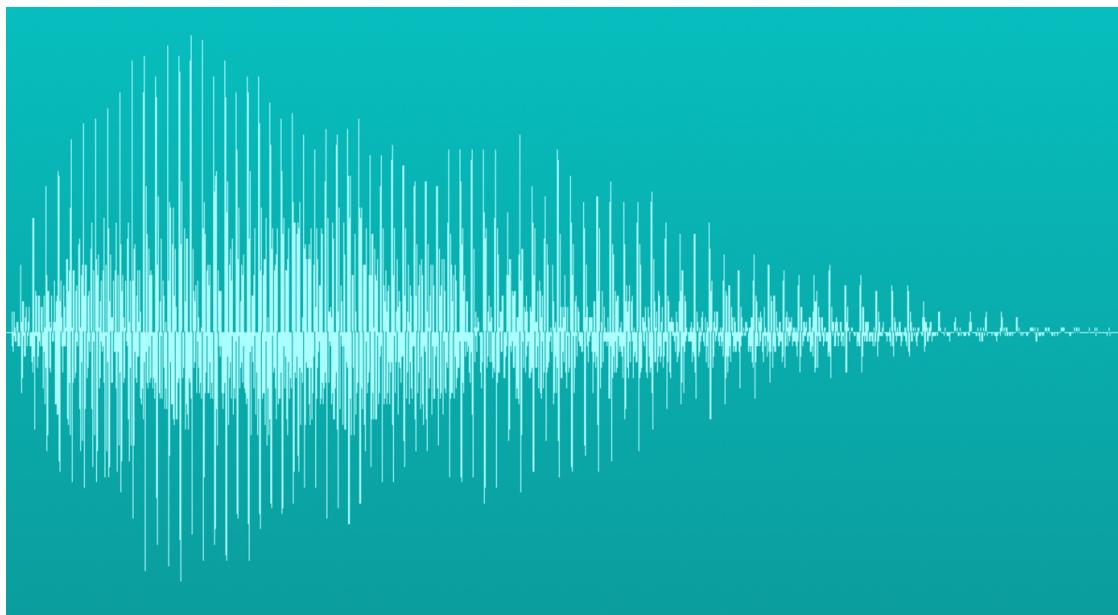
frekvenčních složek na frekvenci.⁴ Na obrázku 3.6.2 je spektrum bílého šumu (všechny frekvenční složky jsou rovnoměrně zastoupeny):



Obrázek 3.6.2: Spektrum bílého šumu (průměr z 10 sekund)

3.7 Časový průběh

Časový průběh zobrazuje závislost určitého parametru zvukového signálu (nejčastěji amplitudy) na čase. Jeho grafické znázornění se nazývá oscilogram. Na obrázku 3.7.1 je oscilogram lidské řeči (samohláska A):



Obrázek 3.7.1: Oscilogram samohlásky A

4 Zvuk

Zvuk je definovaný jako mechanické vlnění, které je schopno vyvolat sluchový vjem. Aby takové vlnění vzniklo, musí dojít k rozkmitání akustických částic v pružném prostředí zdrojem zvuku. V závislosti na pohybu částic tak vzniknou místa s menší a větší hustotou. Tyto změny v hustotě prostředí se projeví jako výchylky statického barometrického tlaku, které se označují jako akustický tlak. Rychlosť kmitání akustických částic se označuje jako akustická rychlosť a není shodná s rychlosťí šíření zvuku.

Jestliže se vlna, šířící se pomocí provázaných akustických částic, dostane až ke vnějšímu uchu, rozvibraruje také převodní systém středního ucha a díky smyslovým buňkám ve vnitřním uchu vnikne nervový vzruch. Aby posluchač tento vzruch dokázal vyhodnotit jako zvuk, musí se signál nacházet v tzv. sluchovém poli.

Sluchové pole je množina všech frekvencí a příslušných amplitud, které dokáže posluchač vnímat jako zvuk. Za stran je ohraničeno frekvenčním prahem sluchu (asi 20 Hz–16 kHz), zespoda amplitudovým prahem sluchu a shora prahem bolesti (asi 120–130 dB). Důležitým prahem je také tzv. mezní časový práh. Jedná se o nejkratší dobu, za kterou dokáže sluchový orgán postřehnout určitou změnu zvukového signálu. Tento práh je definovaný dobou přibližně dvě milisekundy.⁵

⁵ SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

5 Subjektivní vlastnosti zvukových signálů

Každý zvukový signál má určité subjektivní vlastnosti, které vznikají odrazem jeho objektivních vlastností v našem vědomí. Protože každý posluchač vnímá tyto subjektivní vlastnosti odlišně, může být jejich měření poněkud obtížné.

5.1 Výška tónu

Jedná se o smyslový vjem, způsobený danou frekvencí. Ačkoliv je frekvence měřitelná, subjektivní vjem výšky měřitelný není. Přesnost, se kterou posluchač dokáže výšku tónu určit, je definovaná jeho individuálními schopnostmi. Výška je jednorozměrná vlastnost. Tóny dle výšky rozdělujeme na vyšší a nižší.

5.2 Hlasitost

Hlasitost je závislá na velikosti amplitudy výchylek akustického tlaku. Protože lidské ucho je schopné slyšet zvuky s extrémně malými nebo naopak extrémně velkými hodnotami akustického tlaku (rozsah přesahuje sedm dekadických řad), používáme pro přehlednější vyjádření hladiny zvuku decibely (dB).

Hladina akustického tlaku je vyjádřena vztahem $L_p = 20 \log \frac{p}{p_{ref}}$. Referenční hodnota akustického tlaku byla určena pro průměrný práh sluchu (0 dB) v oblasti frekvence 1 kHz a její velikost je $p_{ref} = 2 \times 10^{-5} Pa$.

K výpočtu hladiny zvuku můžeme využít také intenzitu zvuku. Ta je definovaná jako množství energie, které projde jednotkovou plochou, kolmou na směr šíření zvuku, za jednotku času. Hladinu intenzity můžeme vypočítat pomocí vzorce $L_i = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$. Referenční hodnota intenzity byla určena stejně jako referenční hodnota akustického tlaku a rovná se $10^{-12} W m^{-2}$.

Hlasitost je jednorozměrná vlastnost. Zvuky rozděluje na silnější a slabší. Vjem hlasitosti je však závislý na výšce i barvě tónu. Tóny různých výšek se tak mohou jevit různě hlasitě, i když se jejich intenzita rovná.

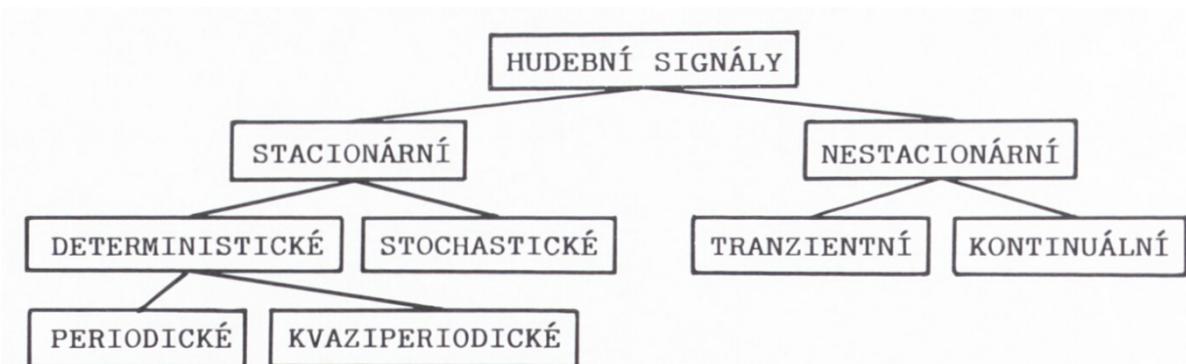
5.3 Barva zvuku

Odraz všech objektivních vlastností (fyzikální struktury) zvukového signálu v našem vědomí je vjem barvy zvuku.⁶ Barvu zvuku můžeme chápat jako doplněk výšky a hlasitosti, můžeme ji však brát také jako vlastnost nadřazenou. Pokud slyšíme dva tóny, které mají stejnou délku trvání, hlasitost i výšku, a přesto se liší, liší se právě barvou.

⁶ SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

6 Topologie zvukových signálů

Zvukové signály můžeme rozdělit do několika tříd na základě chování jejich parametrů.



Obrázek 6.1: Topologie zvukových signálů (převzato Syrový: Hudební Akustika⁷)

Veškeré zvukové signály můžeme rozdělit na stacionární (stálé) a nestacionární (nestálé):

6.1 Stacionární signály

Stacionární jsou takové signály, které na dostatečně dlouhém intervalu nemění svoje vlastnosti.⁷ Mezi stacionární signály můžeme zařadit deterministické a stochasticke.

6.1.1 Deterministické signály

Deterministické signály jsou takové, jejichž spektrum je diskrétní. Dále je dělíme na:

6.1.1.1 Periodické signály

Tyto signály kmitají periodicky a jejich spektrum je harmonické.

6.1.1.2 Kvaziperiodické signály

Tyto signály kmitají téměř periodicky (v čase dochází k varírování délky periody, amplitudy či tvaru kmitu) a jejich frekvenční složky mohou být v iracionálních poměrech.

⁷ SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

6.1.2 Stochastické signály

Stochastické (náhodné) signály se popisují statisticky (nelze je vyjádřit funkcí). Takové signály mají šumový či hlukový charakter a vykazují spojité spektrum.

6.2 Nestacionární signály

Tyto signály se vyznačují velkou variabilitou svých vlastností. Dělíme je na:

6.2.1 Tranzientní signály

Tranzientní signály jsou impulzní, jednorázové a vykazují spojité spektrum.

6.2.2 Kontinuální signály

Jedná se o signály s průběžně proměnnými vlastnostmi, které do určité míry kombinují jak deterministické, tak stochastické signály.

Pokud bychom aplikovali tyto definice na zvukové signály v každodenním světě, zjistili bychom, že jsou téměř vždy tvořeny kombinací signálů víceho tříd. Například zvukový signál hudebního nástroje je tvořen kombinací stacionárních a nestacionárních signálů.

Po vybuzení hudebního nástroje dochází ke vzniku tranzientu. Jedná se o oblast nakmitávání tónu. Signál v této oblasti odpovídá nestacionárnímu signálu, protože v jeho parametrech dochází ke změnám. Podle rychlosti a velikosti těchto změn přispívá tranzient „značnou měrou k typickému zabarvení hudebního nástroje.“⁸ Po určité době může dojít k ustálení parametrů a signál může připomínat stacionární. I přesto se však v parametrech signálu objeví drobné výchylky, a proto se tato část nazývá kvazistacionární. Po ukončení buzení nastanou v parametrech opět rychlé změny odpovídající nestacionárnímu signálu.

⁸ SYROVÝ, Václav – GUŠTAR, Milan. *Malý slovník základních pojmu z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 2. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2012. ISBN 978-80-7331-237-4.

7 Obecný model hudebního nástroje

Hudební nástroj je definovaný jako „vhodně uspořádaná, kmitání schopná hmota, která svou kmitavou energii vyzařuje do prostoru formou zvukové vlny.“⁹ Aby byl tento předpoklad splněn, musí se hudební nástroj skládat z oscilátoru (kmitající část), excitátoru (budicí část) a rezonátoru/radiátoru (vyzařující části). Všechny tyto části se navzájem ovlivňují a v různých formách je najdeme u každého zdroje zvuku, ať už se jedná o klasický akustický nástroj či například reproduktor.

7.1 Excitátor

Excitátor je budicí element. Budicí energie je v hudebních nástrojích zpravidla lidská. Touto energií budí excitátor kmity oscilátoru. Hráč sám může být excitátorem (například hra prstem nebo vydechovaný proud vzduchu), ale přenos budicí síly na oscilátor může být také zprostředkováný další mechanickou částí (smyčec, kladívko, palička a jiné). Existují i nástroje, které budicí sílu samy generují a člověk ji pouze ovládá – například varhany. Excitátorem ve varhanách je proud vzduchu generovaný dříve měchy, dnes ventilátory. Traktura varhan rozvádí proud vzduchu do jednotlivých strojů na základě pohybu kláves či rejstříkových táhel.

Časový průběh buzení je zcela zásadní pro výsledný charakter zvuku. Pokud dochází ke kontinuálnímu buzení, bude oscilátor kmitat nuceně a zvuk bude neperkusní (hra na housle smyčcem). Bude-li buzení impulzní, bude oscilátor kmitat volně a zvuk bude perkusní (hra na housle s artikulací pizzicato). Navázání excitátoru na oscilátor je důležité pro výsledné spektrum zvuku. Excitátor svojí polohou může ovlivnit amplitudy jednotlivých frekvenčních složek.

7.2 Oscilátor

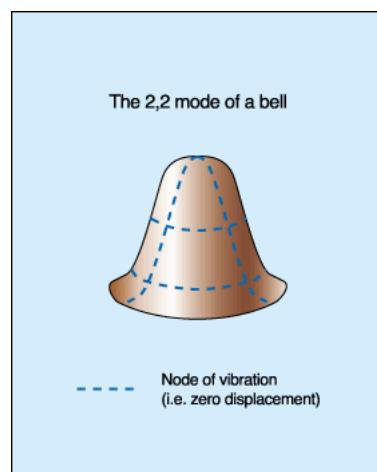
Oscilátor je podle obecné definice zařízení schopné vykonávat kmitavý pohyb. V hudebních nástrojích bychom mohli oscilátor definovat jako hmotu schopnou kmitat po vybuzení excitátorem. Dle typu oscilátoru rozdělujeme nástroje na strunné (chordofony), dechové (aerofony), blanozvučné (membranofony) a samozvučné (idiofony). Oscilátory těchto nástrojů se zásadně liší svými dimenzemi. Zatímco

⁹ SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

strunu bychom mohli chápat jako systém provázaných hmotných bodů, tak membrána již vykazuje určitou plochu a samozvučné nástroje mají dokonce určitý objem.

Pokud vybudíme oscilátor v určitém místě, bude se od tohoto místa šířit postupné vlnění až k jeho konci (uchycení struny, přitlačení struny na hmatník, okraj membrány a tak dále). V závislosti na mechanickém uchycení oscilátoru se vlna odrazí zpět s opačnou či stejnou fází. Děj se opakuje a odražené vlny spolu interferují. Takto vzniká stojaté vlnění. S počtem dimenzí oscilátoru roste i počet směrů, ve kterých může stojaté vlnění vznikat. Tyto polohy stojatého vlnění na oscilátoru se nazývají módy. Každý mód vzniká při určité frekvenci, která se nazývá rezonanční.

Na obrázku 7.1 je zvýraznění módu 2,2 na zvonu. Čísla značí dvě vertikální a dvě horizontální uzlové čáry:



Obrázek 7.1: Mód 2,2 (převzato Sound On Sound: Synthesizing Bells)¹⁰

Takovýchto módů existuje celá řada. Vzhledem ke konstrukci oscilátorů jsou akustické rozměry, a tedy i frekvence, pro jednotlivé módy různé. To je dán například tloušťkou a ohybem strun, materiélem oscilátoru, nedokonalostmi v hustotě prostředí a dalšími faktory. Vhodným vybuzením oscilátoru může hráč vynutit vyšší amplitudu konkrétním módům a tím ovlivnit barvu zvuku.

7.3 Rezonátor

Rezonátor upravuje spektrální složení zvuku, což vnímáme jako změnu barvy zvuku. Oscilátor na rezonátor přenáší svoji kmitavou energii, čímž dochází k rozkmitání

¹⁰ REID, Gordon. Synthesizing Bells. *Sound on Sound* [online]. 2002 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/techniques/synthesizing-bells>

rezonátoru. Rezonátor má stejně jako oscilátor určité módy, tedy rezonanční frekvence. Výsledná barva zvuku je pak dána konvolucí („součinem“) spektra kmitů oscilátoru a frekvenční charakteristiky rezonátoru.¹¹

7.4 Radiátor

Radiátor je ta část nástroje, která jeho zvuk vyzařuje do okolního prostředí formou zvukové vlny. Často přímo splývá s rezonátorem (například housle či klavír), ale může být zcela samostatný (roztrub u žestových nástrojů) nebo jaksi kombinovaný – korpus klarinetu funguje jako radiátor pouze nižší tóny, zatímco vyšší tóny jsou vyzařovány tónovými otvory.¹²

¹¹ SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

¹² SUCHÁNEK, Tomáš. Analýza spektra klarinetů od různých výrobců. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

8 Obecný model syntetizéru

Vzhledem k velkému množství metod syntézy zvuku, a ještě většímu množství elektronických nástrojů, je poměrně obtížné popsat stavbu syntetizéru v obecné rovině. Na rozdíl od tradičních nástrojů, popsaných v předchozí kapitole, se stavba a principy syntetizérů liší spolu s konkrétními metodami syntézy zvuku. K obecnému modelu hudebního nástroje bychom mohli přirovnat syntetizér fungující na principu subtraktivní syntézy. U jiných metod syntézy však různé časti zanikají, jako například filtr u aditivní syntézy. Ve všech syntetizérech však v určité podobě najdeme alespoň jednu z následujících elementárních částí, jejichž vzájemné vazby definují konkrétní metodu syntézy a výsledný zvuk. Tyto základní části syntetizérů jsou vhodně zapojené elektrické obvody a suplují to, čemu u akustických nástrojů říkáme vhodně uspořádaná hmota.

8.1 Excitátor

Stejně jako tradiční hudební nástroj, i syntetizér potřebuje ke své funkci budicí sílu. Tato síla však není mechanická, ale elektrická. Jak ale definovat onen budicí element? Připojíme-li oscilační obvod ke zdroji napětí, rozkmitá se a je „buzen“ nepřetržitě. Z toho důvodu u většiny elektronických nástrojů excitátor zcela chybí. S tím souvisí i problematika „simulování“ buzení, popsaná v kapitole 5.5 Generátor obálky.

8.2 Oscilátor

Elektrické oscilátory jsou elektrické obvody, jejichž důsledkem vznikají periodické změny napětí. K vytvoření těchto změn využívají oscilátory různé fyzikální principy (rezonanční obvod, relaxační obvod a další), které vycházejí z vlastností použitých elektrických součástek. Elektrické oscilátory produkují zpravidla harmonické signály různých průběhů. Určují tedy kromě frekvence také spektrum produkovaného signálu.

Aby bylo možné měnit produkovanou frekvenci, řídí se oscilátory buď velikostí přiváděného napětí (VCO) či informací v číslicové podobě (DCO).

Digitálně řízené oscilátory se používají i v analogových nástrojích, respektive použití digitálně řízeného oscilátoru nedělá syntetizér digitálním či hybridním. Způsob generování zvuku v takovém oscilátoru je totiž analogový a informace v číslicové

podobě řídí pouze frekvenci – výšku zvuku. Typickým příkladem analogových nástrojů s DCO je Juno-60 firmy Roland nebo Prophet 08 firmy Dave Smith Instruments (původně Sequential Circuits).

8.3 Filtr

Filtr je zásadní součástí syntetizérů pracujících na principu subtraktivní syntézy. Můžeme jím však doplnit celou řadu jiných metod syntézy zvuku.

Stejně jako rezonátor, i filtr ovlivňuje spektrální složení přiváděného signálu. Jeho frekvenční charakteristika říká, kterou část spektra zvýrazňuje či potlačuje. Podle toho můžeme filtry rozdělit na horní, dolní či pásmovou propust/zádrž.

Dalším parametrem filtru je jeho strmost. Strmost definuje, o kolik decibelů bude zeslabena každá následující oktáva nad či pod mezní frekvencí. Tato hodnota se udává v decibelech na oktávu (dB/okt.) a určuje stupeň filtru. Například jeden stupeň pasivního RC (odpor, kondenzátor) filtru má strmost 6 dB/okt. a s každým dalším článkem o 6 dB/okt. roste.¹³

Důležitým parametrem filtru je také jeho činitel jakosti Q – rezonance. Ta vytváří v oblasti mezní frekvence filtru amplitudové maximum, které vzniká rezonancí obvodu filtru (podobně jako u oscilátoru). Rezonance se dá docílit také zpětnou vazbou, která vznikne zavedením signálu zpět na vstup filtru. U celé řady syntetizérů (Minimoog, Korg MS-20 a další) jsou filtry (zpravidla dolní propust) tvořeny tak, aby při maximální rezonanci fungovaly jako další „oscilátor“ se sinovým průběhem.

Filtr se dá, podobně jako oscilátor, řídit vstupním napětím či informací v číslicové podobě. Pak mluvíme o VCF a DCF.

8.4 Zesilovač

Zesilovač je aktivní prvek, který zesiluje signál o nastavenou hodnotu. Zesilovače bychom mohli rozdělit podle zisku, šířky zesilovaného pásma a zkreslení. Tyto parametry však v syntetizérech nejdou běžně nastavovat a jsou dány použitým typem zesilovače.

¹³ GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.

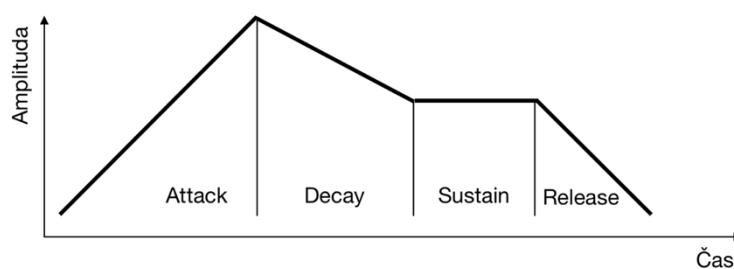
Také zesilovač můžeme řídit pomocí vstupní informace v podobě napětí nebo čísla. Zesilovače pak označujeme jako VCA nebo DCA. Pomocí takového řízení je možné upravovat časový průběh signálu či modulovat jeho amplitudu jiným signálem.

8.5 Generátor obálky

Elektrický oscilátor je po přivedení napětí buzen nepřetržitě. K vhodnému napodobení charakteru zvuku tradičních hudebních nástrojů je ale zapotřebí, aby signál syntetizéru vykazoval ve svém časovém průběhu určité změny. Toho se dosahuje pomocí generátoru obálky. Ten generuje neperiodický signál, jehož průběh je odvozený od stisku klávesy. Tímto signálem se nejčastěji moduluje amplituda signálu syntetizéru či mezní frekvence filtru. Dochází tak ke změně parametrů v čase, podobně jako při buzení tradičního hudebního nástroje.

Nejjednodušší generátor obálky (AR) má části *attack* a *release*, tedy nakmitávání a dokmitávání. Po stisku klávesy je po nastavenou dobu aktivní část attack, po uvolnění klávesy pak release. Takový generátor je vhodný například pro napodobování perkusních zvuků, protože mu chybí zakmitaný stav.

Asi nejuniverzálnější generátor obálky je ADSR. Ten je doplněn o *decay* a *sustain*. Decay je pokles z maximální hodnoty nakmitávání do zakmitaného stavu. Sustain je pak onen zakmitaný stav. Časový průběh signálu běžného ADSR generátoru obálky může vypadat například takto:



Obrázek 8.1: Průběh signálu ADSR

Existují i složitější generátory, které dělí průběh ADSR signálu na další dílčí části (ADDSR, ADSSR). Těchto částí však může být ještě více.

9 Syntéza zvuku a její historie

Syntéza zvuku je fenomén, který je poměrně starý. Od nepaměti se mistři klasických nástrojů snažili vylepšovat jejich zvuk a mechanismy s cílem dosáhnout určitého zvukového ideálu. S novými technologiemi a s vývojem techniky se však začaly otevírat dveře úplně novým možnostem. Již v 19. a 20. století, spolu s prohlubováním lidských znalostí v oblasti elektroniky, začaly vznikat první elektromechanické a elektronické nástroje – elektrofony.

Elektromechanické nástroje byly jakousi kombinací klasických nástrojů a elektrotechnických vynálezů. Zvuk se v těchto nástrojích tvořil mechanicky, ale díky elektrodynamickým či elektrostatickým snímačům bylo možné zvuk nástroje zesilovat a dále upravovat. Existovaly také mechanické nástroje, jejichž mechanismy byly ovládány elektřinou – například *Clavecin électrique*. V tomto nástroji docházelo k rozeznívání dvojice zvonků pomocí elektrostaticky ovládaných kladívek.¹⁴ Postupem času začala mít technika v nástrojích stále větší úlohu. Již se nepoužívala pouze ke snímání a zesilování zvuku, ale také k jeho generování. Tradiční oscilátory postupně nahradily elektromechanické generátory zvuku. Jednalo se hlavně o rotační generátory, a to o elektrostatické (jejichž rotací vznikaly periodické změny kapacity kondenzátoru), elektrooptické (jejichž rotací byl periodicky přerušován snímaný tok světla), či elektromagnetické (jejichž rotací vznikaly periodické změny indukce cívky). Za zmínu stojí asi nejpopulárnější elektromagnetický nástroj, kterým byly *Hammondovy varhany* ze 30. let 20. století. Verze tohoto nástroje s největším tónovým rozsahem má 91 rotačních generátorů.

V elektronických nástrojích nahradily mechanické oscilátory vhodně zapojené elektrické obvody. Za první elektronický nástroj je možné označit vynález Williama Du Bois Duddella *Singing Arc* (zpívající oblouk). Tento nástroj byl vynalezen v podstatě náhodou. Duddell se snažil odstranit rušivé zvuky, které vydávaly obloukové lampy. Při tom objevil, že produkovaná frekvence se mění s přiváděným napětím. I další vynálezci začali objevovat nové možnosti vytváření oscilací, a tak se rozšířil například elektronkový oscilátor. Elektronika mimo tvoření zvuku umožňovala také zcela nové techniky hry. Příkladem může být *Theremin*, jehož frekvenci

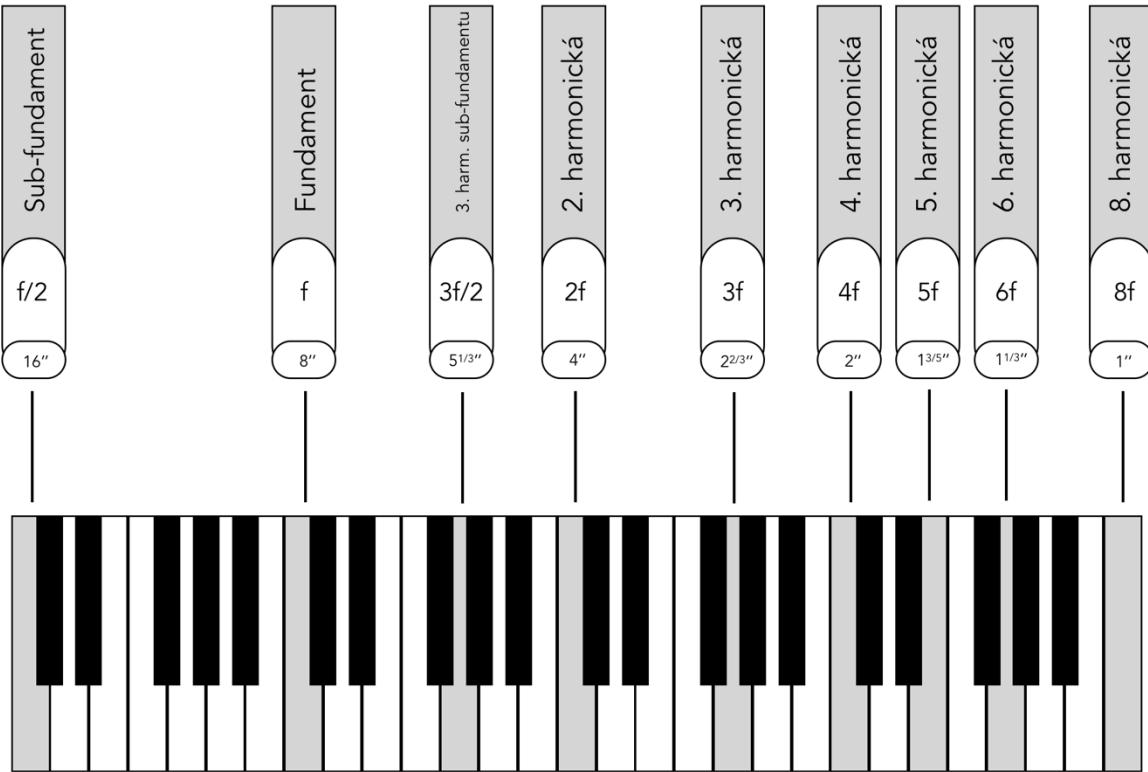
¹⁴ GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.

ovlivňuje hráč přiblížením těla k anténě. Elektronické nástroje mohly být díky rychlému vývoji techniky stále složitější. S vynálezem napětím řízených a integrovaných obvodů byly sestrojeny nové syntetizéry a modulární systémy. Možnosti práce se zvukem v těchto nástrojích byly velké, a tak se syntetizéry rozšířily jak mezi vážnou, tak populární hudbu. Vznikaly také zcela nové typy syntézy zvuku.

Definice syntézy dle slovníku cizích slov zní „*sjednocení jednotlivých částí, složení v celek*“.¹⁵ Tento proces se během syntézy zvuku skutečně odehrává, a to buď analogově nebo digitálně. Existuje celá řada metod syntézy zvuku, kterými lze dosáhnout odlišných zvukových výsledků:

Nejlépe definici syntézy vyhovuje *aditivní syntéza*. Během té dochází ke skládání výsledné podoby spektra pomocí jednotlivých signálů sinového průběhu. Frekvence těchto signálů přitom mají harmonické vztahy. Tato metoda syntézy je sice jedna z nejvěrnějších, ale také jedna z technicky náročnějších, protože v polyfonii vyžaduje relativně velké množství oscilátorů. Typickým elektroakustickým nástrojem s aditivní syntézou jsou například zmiňované Hammondovy varhany. Na obrázku 9.1 můžeme vidět táhla, která ovládají intenzitu jednotlivých tónů v aditivní syntéze:

¹⁵ PETRÁČKOVÁ, Věra – KRAUS, Jiří. *Akademický slovník cizích slov: [A–Ž]*. Praha: Academia, 1997. ISBN 80-200-0607-9.



Obrázek 9.1: Táhla Hammondových varhan

Další metodou syntézy zvuku je *subtraktivní syntéza*. Zde se onen „celek“ tvoří spojením signálu s velkým počtem frekvenčních složek a filtru. Výsledná barva vzniká pomocí zvýrazňovaní či potlačování frekvenčních složek signálu filtrem. Vzhledem k technické jednoduchosti její realizace se jedná se o asi nejrozšířenější typ syntézy. Svým principem do velké míry připomíná klasické hudební nástroje.

Vytvořit nový zvuk můžeme rovněž pomocí *tvarování* časového průběhu signálu. Zde máme dokonce několik možností, jak takové tvarování provést. Můžeme použít přenosovou nelinearitu. Díky té ve výsledném signálu vzniknou, v závislosti na tvarovací funkci, další frekvenční složky (jedná se vlastně o zkreslení signálu). Tato metoda se nazývá *nelineární tvarování*. Dále můžeme vytvarovat ručně celý časový průběh signálu. Zatímco dříve se k tomuto účelu používaly optické snímače křivek,¹⁶ dnes přímé zadávání časového průběhu probíhá v grafických prostředích.

¹⁶SYROVÝ, Václav. Analýza a syntéza hudebního signálu. *Hudební nástroje: časopis pro výzkum, vývoj, výrobu a užití hudebních nástrojů*. Hradec Králové: Československé hudební nástroje, 1964-1991, 1986(4), 127-130.

Na principu tvorby zvuku v klasických hudebních nástrojích pracuje tzv. virtuální akustická syntéza, známá spíše jako *fyzikální modelování*. V devadesátých letech s tímto konceptem přišla firma Yamaha. Akustickým měřením vznikly fyzikální modely různých hudebních nástrojů. Modely obsahují vlivy materiálu, způsob tvoření zvuku a další vlastnosti hudebního nástroje. Nejen že tento typ syntézy dokáže věrně napodobit klasické hudební nástroje, ale také uživateli umožňuje vytvářet takové nástroje, které by ve skutečném světě jen stěží mohly fungovat (například buben, který má místo membrány struny rozeznívané pomocí nátrubku...).

Dále existuje také celá řada „syntéz“, které ale nesplňují definici syntézy, protože ke svému fungování potřebují již „hotovy“ nestacionární signál. Ten pak dále upravují. Může to být například *samplingování* čili přehrávání předem nahraných samplů – vzorků. Tyto vzorky vznikají tak, že se nahraje jeden či více tónů konkrétního nástroje v jedné či více dynamikách (tzv. multisampling). Vzorky se následně přiřadí jednotlivým klávesám elektronického nástroje. Kvazistacionární část vzorku se často přehrává ve smyčce, aby hráč mohl vzorek uměle prodloužit.

Speciální případ přehrávání samplů je *granulární syntéza*. Ta dělí vstupní signál na velice krátké vzorky, tzv. zrnka (typicky 1–50 milisekund), a ty přehrává. Z takto krátkých vzorků lidské ucho nedokáže identifikovat originální zvuk. Během přehrávání navíc dochází ke změně různých parametrů jednotlivých zrnek (zisk, časový průběh, frekvence, délka zrnka, panorama, pořadí zrnek a tak dále), díky čemuž člověk vnímá výsledný signál jako úplně novou zvukovou barvu.

Barvu zvuku můžeme ovlivnit také modulací jeho parametrů v čase. Modulovat můžeme různé parametry zvuku – frekvenci, amplitudu, fázi, spektrum, šířku pulsu nebo tvar vlny. Souhrnně se takovému typu syntézy říká *modulační syntéza* a jedná se o velice mocný nástroj. Na základě malých změn v parametrech modulačního řetězce můžeme docílit velkých změn v barevné povaze zvuku. Modulační syntéza je schopná jednoduše vytvářet zvuky s neharmonickým spektrem, typickým zejména pro idiofony, díky čemuž se stala velmi oblíbenou.

10 Modulace

Modulace je proces, během kterého jeden signál (modulační) ovlivňuje parametr druhého signálu (nosného). Tímto procesem vzniká modulovaný signál, jehož vlastnosti se odvíjejí od typu modulace a parametrů modulačního a nosného signálu. Opakem modulace je demodulace. Demodulace je proces, který dokáže z modulovaného signálu extrahovat nepozměněný modulační signál.

Podle podoby modulačního signálu bychom mohli modulace rozdělit na:

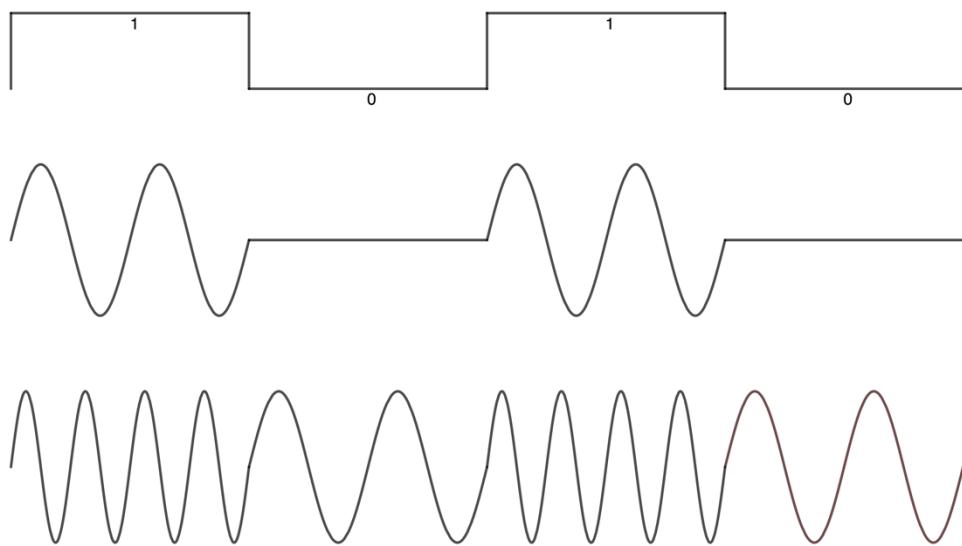
10.1 Periodická a neperiodická modulace

Je-li modulační signál periodický, mluvíme o *periodické modulaci*. Pokud je modulační signál jakýkoliv jiný (šumový, kontinuální, kvaziperiodický a tak dále), jedná se o *neperiodickou modulaci*. Tato práce se zabývá především periodickými modulacemi.

10.2 Spojitá a diskrétní modulace

Spojité analogové modulace jsou takové, jejichž nosný signál je nejčastěji sinový a modulační signál je jakýkoliv analogový (nabývá v čase nekonečného počtu hodnot).

Spojité digitální modulace jsou takové, jejichž nosným signálem je analogový signál a modulačním je diskrétní signál. Typickým příkladem spojité digitální modulace je klíčování amplitudovým (ASK), frekvenčním (FSK) či fázovým posuvem (PSK). Na obrázku je zjednodušené srovnání ASK (druhý průběh) a FSK (třetí průběh):



Obrázek 10.2.1: ASK a FSK

Diskrétní modulace jsou takové, u kterých se nosná či modulační vlna mění skokem, nespojitě. Jako nosný či modulační signál využívají obdélníkový průběh. Mezi tyto modulace patří pulzně amplitudová modulace (PAM), pulzně šířková modulace (PWM) či pulzně kódová modulace (PCM). Těmito modulacemi se však tato práce dále zabývat nebude.

Dále bychom mohli modulace rozdělit podle toho, jaký parametr signálu modulujeme, na:

10.3 Amplitudová modulace

Amplitudová modulace nastane, jestliže bude modulační signál modulovat amplitudu nosného. V praxi si amplitudovou modulaci můžeme představit jako pravidelné zesilování a zeslabování hlasitosti nosného signálu. V případě amplitudové modulace nedochází ke změně frekvence ani fáze nosné vlny. Amplitudová modulace nejčastěji využívá jako modulační signál periodický signál sinového průběhu. Matematicky můžeme rovnici modulované vlny vyjádřit jako

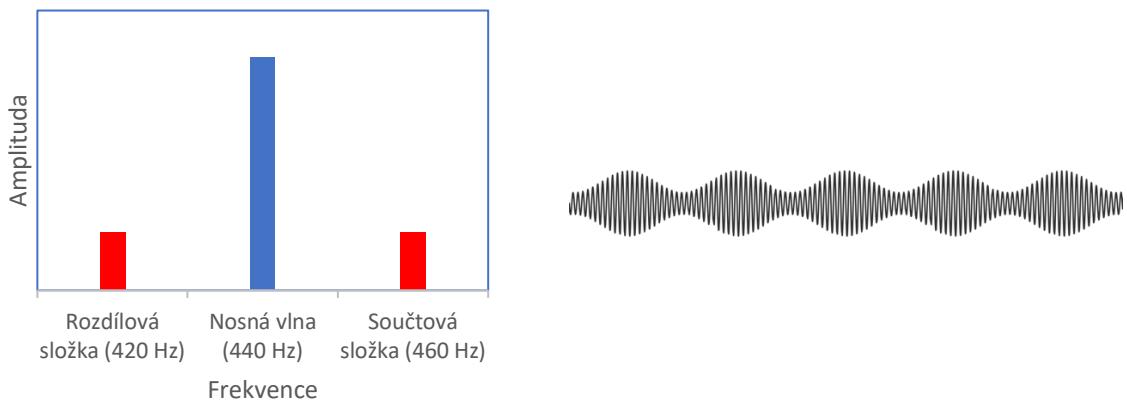
$A = A_n(1 + m \sin \omega_m t)\sin(\omega_n + \varphi)$, kde A_n je amplituda nosné vlny, m je modulační index, ω_n, ω_m jsou úhlové frekvence nosného a modulačního signálu a φ je fázový

posun modulační vlny oproti nosné.¹⁷ Chceme-li dosáhnout amplitudové modulace na syntetizéru, nejjednodušší cesta je modulovat zisk zesilovače.

Produktem takové modulace jsou vždy tři frekvenční složky. Nosná vlna a dále součtová a rozdílová složka. Existují i takové metody amplitudové modulace, při kterých se záměrně potlačuje nosná vlna (modulační index je větší než 1), či jedno z postranních pásů. Tyto metody můžeme pro účely této práce zanedbat.

Řekněme, že nosná vlna má frekvenci 440 Hz a modulační 20 Hz. Na obrázku 10.3.1 a 10.3.2 je spektrum a časový průběh zvuku produkovaného takovou amplitudovou modulací pro odlišné modulační indexy.

$$m = 0,5$$



Obrázek 10.3.1: Spektrum a časový průběh AM signálu

¹⁷ SIEGEL, Rudolf – TUSCHER, Vladimír. *Kmitočtová modulace*. I. vydání. Praha: Naše vojsko, 1956

$$m = 1$$



Obrázek 10.3.2: Spektrum a časový průběh AM signálu

Pásma, ve kterých se vyskytuje rozdílová a součtová složka, vznikají vždy souměrně k nosné vlně. Amplituda postranních složek je přímo úměrná modulačnímu indexu a vypočítáme jí ze vztahu $m \frac{A_n}{2}$. Modulační index je koeficient, který se pohybuje mezi hodnotami 0 a 1. Jeho hodnota se také někdy udává v procentech. Maximální amplituda postranních složek se tedy rovná polovině amplitudy nosné vlny.

Hodnota modulačního indexu vyjadřuje poměr amplitud nosné a modulační vlny a určuje hloubku modulace. Modulační index se tedy dá vyjádřit také jako $m = \frac{A_m}{A_n}$.

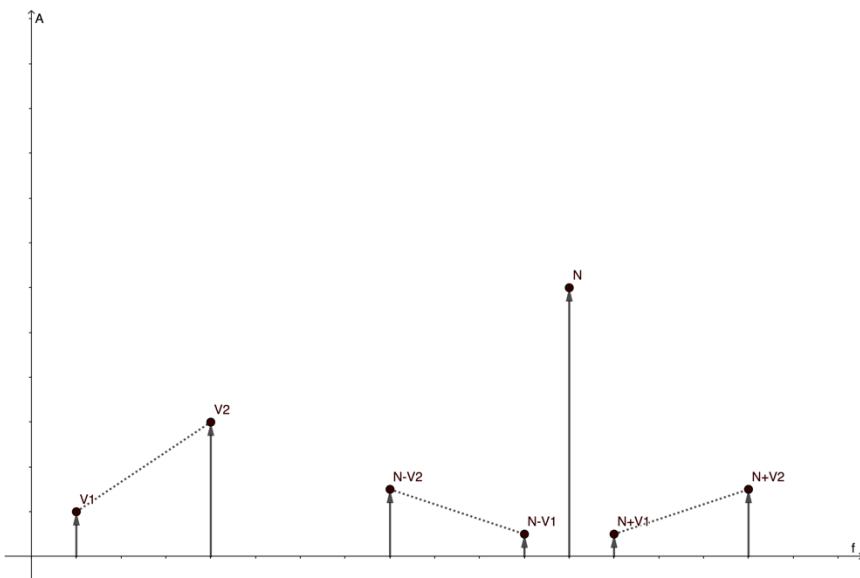
Pokud je rozdílová složka záporná (frekvence modulačního signálu je vyšší než frekvence nosné), zrcadlí se do pozitivní části spektra s inverzní fází. Zde může nastat několik případů:

Pokud bude modulační frekvence přesně dvojnásobek nosné frekvence, dojde k oslabení nosné. Kdybychom toto aplikovali na předchozí příklad, byla by modulační frekvence 880 Hz. Rozdílová složka vychází -440 Hz, což můžeme vyjádřit jako 440 Hz s inverzní fází. Protože i nosná frekvence je 440 Hz, uslyšíme pouze dva tóny, a to oslabenou nosnou vlnu a součtovou složku.

Pokud bude frekvence modulačního signálu shodná s frekvencí nosné, bude mít rozdílová složka 0 Hz. Takový tón představuje pouze stejnosměrnou složku signálu a ta nehraje ve zvuku žádnou roli. Uslyšíme tedy opět dva tóny, a to nosnou vlnu a součtovou složku.

Pokud bude frekvence modulačního signálu vyšší než dvojnásobek frekvence nosné, rozdílová složka bude záporná. Její zrcadlový obraz bude mít ale vyšší frekvenci, než je frekvence nosné. Obě složky se tak dostanou nad nosnou vlnu a nedojde ke vzniku spodního pásmo.

Při amplitudové modulaci komplexním signálem se spektrum tohoto signálu zrcadlí kolem nosné. Označíme-li nejnižší frekvenci modulačního signálu V_1 a nejvyšší V_2 , můžou postranní pásma vypadat například takto:¹⁸

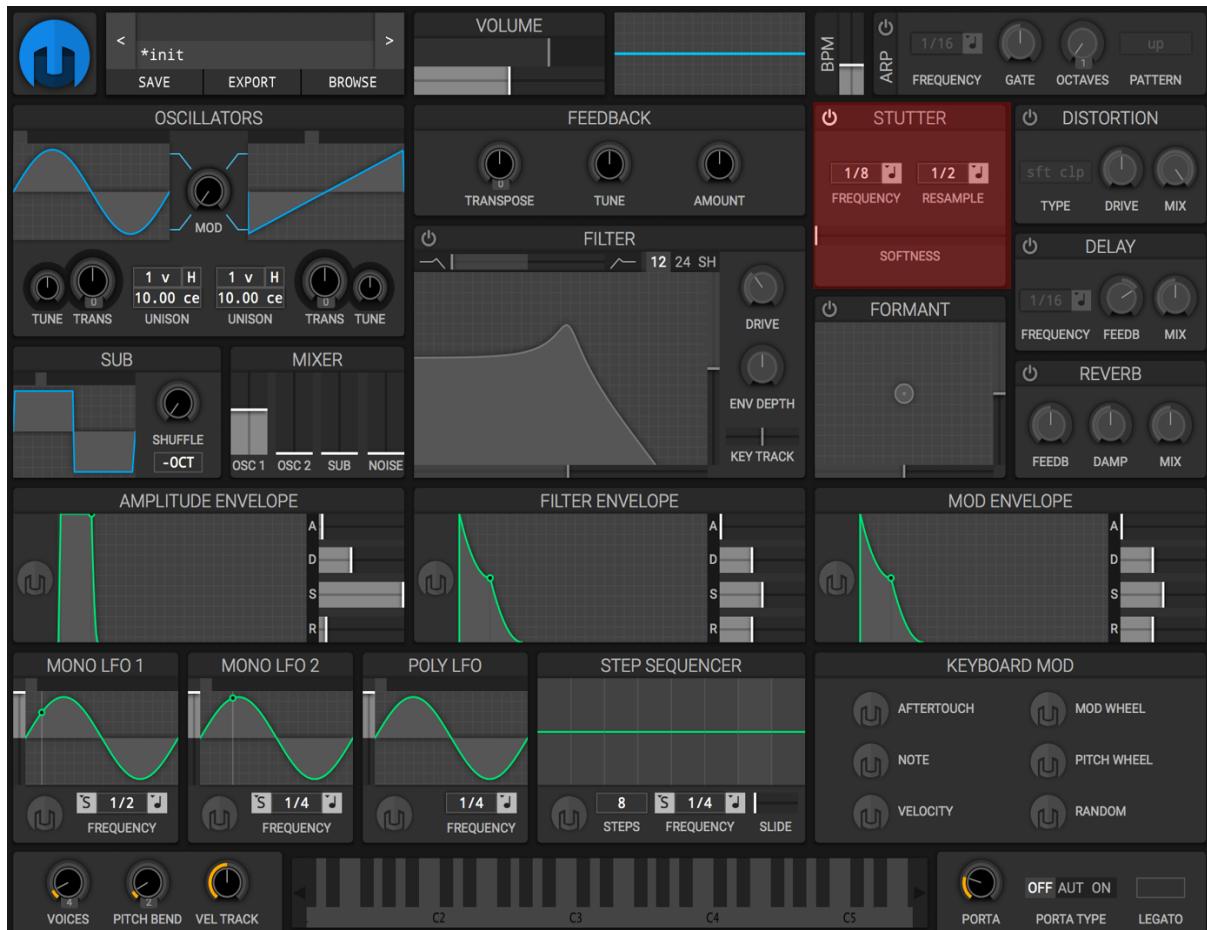


Obrázek 10.3.3: Spektrum AM signálu

Digitální amplitudová modulace nastane, budeme-li modulovat obdélníkovým signálem. Jeho dva stavy určují, zda nosný signál zní či nezní. Díky prudkým změnám, způsobeným obdélníkovým průběhem modulačního signálu, je výsledný zvuk bohatý na vyšší harmonické frekvence. Tento typ modulace se však v hudebním zvuku používá spíše jako efekt. Na obrázku je VST syntetizér Helm firmy Matt Tytel. Efekt je nazvaný Stutter (angl. koktání) a je možné ho synchronizovat

¹⁸ VACHALA, Vladimír. Technika amplitudové modulace s jedním postranním pásmem. Praha: SNTL, 1983.

s tempem skladby. Parametr Softness pak umožňuje „zaoblit“ hrany obdélníku a přiblížit se tak klasické amplitudové modulaci:



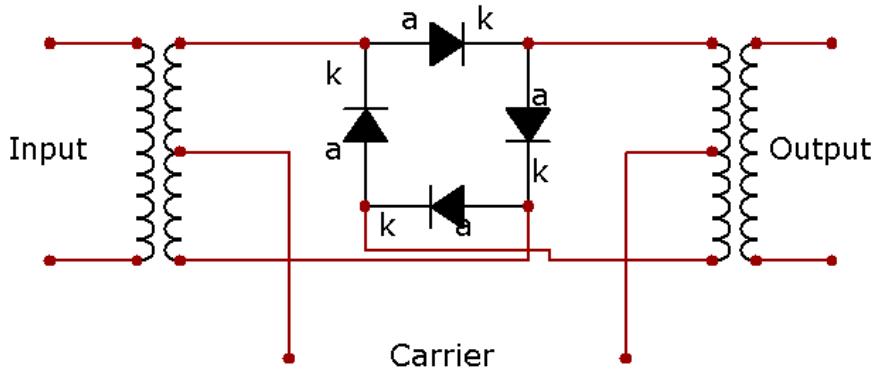
Obrázek 10.3.4: Syntetizér HELM

10.4 Spektrální modulace

Jakýmsi speciálním případem amplitudové modulace je také modulace mezní frekvence filtru. O takový způsob modulace bychom mohli doplnit například subtraktivní syntézu. Filtr přímo ovlivňuje amplitudu harmonických frekvencí. Při modulaci mezní frekvence filtru periodickým signálem dojde k amplitudové modulaci harmonických. V takovém případě můžeme brát harmonickou frekvenci jako nosnou vlnu. Tímto procesem opět vzniknou nové složky signálu, stejně jako u amplitudové modulace, a dojde k ovlivnění barvy původního zvuku.

10.5 Kruhová modulace

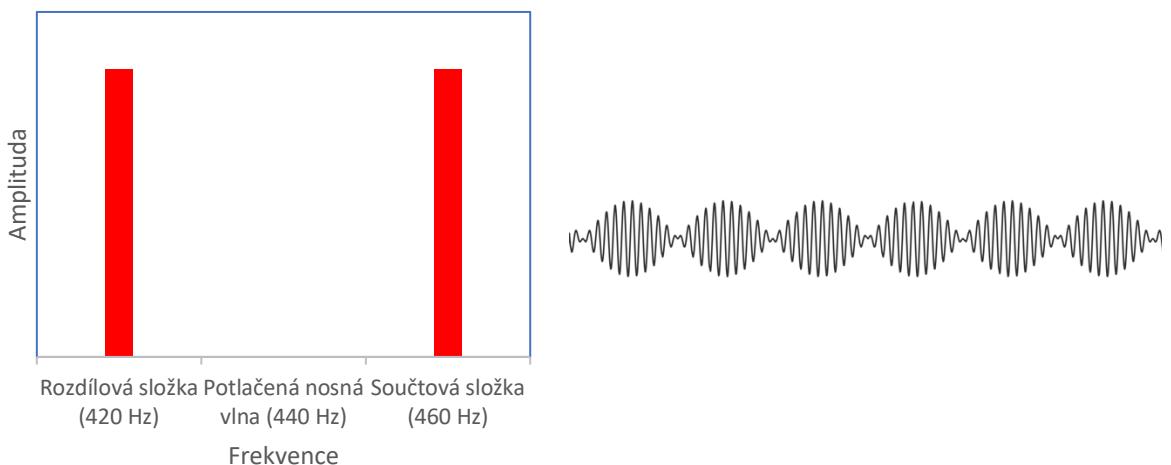
Kruhová modulace je svým principem velmi podobná amplitudové modulaci. Její název je odvozen od kruhového rozmístění diod ve schématu modulátoru:



Obrázek 10.5.1: Schéma kruhového modulátoru (převzato Wikipedia: Ring Modulation)¹⁹

Ke kruhové modulaci dojde při prostém násobení dvou signálů:

$A_{rm} = (A_n \sin(\omega_n t)) * (A_m \sin(\omega_m t))$. V takovém případě je nosná vlna zcela potlačena a produktem modulace jsou, stejně jako u amplitudové modulace, dvě postranní složky – součtová a rozdílová. Využijeme-li zadání příkladu z amplitudové modulace, bude spektrum a časový průběh vypadat takto:



Obrázek 10.5.2: Spektrum a časový průběh RM signálu

¹⁹ Ring Modulation. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ring_modulation

Potlačení nosné vlny se využívalo ve 30. letech 20. století v telekomunikaci. Modulace umožnila přenos více linek po jednom telefonním kabelu. Kruhová modulace našla využití také v jednoduchých šifrovacích zařízeních za druhé světové války. Pokud chtěl posluchač signál dešifrovat, postačilo mu znát frekvenci modulátoru.²⁰ U kruhové modulace je amplituda postranních složek přímo úměrná součinu amplitud nosného a modulačního signálu. Zvuk produkovaný tímto typem modulace má zcela typický „cvrčivý“ charakter. Ten vzniká hlavně při použití nízkých modulačních kmitočtů vznikem záznějů mezi součtovou a rozdílovou složkou.

10.6 Frekvenční modulace

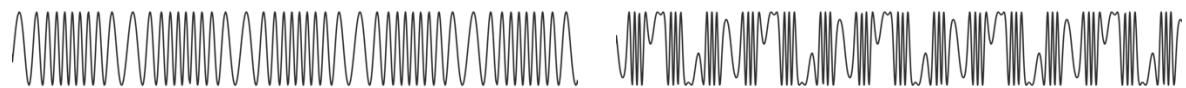
Použití frekvenční modulace v hudebních nástrojích na přelomu 70. a 80. let 20. století přineslo velký převrat v elektronické hudbě. Začaly vznikat digitální syntetizéry a v tehdejší době také zcela neslýchанé zvuky. Za průkopníka a vynálezce FM syntézy se považuje John Chowning, profesor Stanfordské univerzity v Kalifornii. Zajímavé je, že uvedení jeho prototypu syntézy, která v té době neměla obdobu, nepřineslo příliš velké ohlasy. Hammond, Wurlitzer, ale i další firmy odmítaly od Stanforské univerzity koupit patent. Po určité době si Chowningova objevu všimla firma Yamaha. Ta zřejmě v té době již prováděla pokusy s implementací digitálních technologií v hudebních nástrojích. Roku 1973 Yamaha koupila roční právo na Chowningovu technologii a uvedla prototyp monofonního FM syntetizéru. O dva roky později Yamaha koupila exkluzivní práva a začal vývoj nástrojů řady GS a DX.

Frekvenční modulace opět využívá modulační a nosný signál. Modulační signál pak ovlivňuje frekvenci nosného. Matematicky se frekvenční modulace vyjadřuje jako

$$A_{fm} = A_n \sin(\omega_n t + I A_m \sin(\omega_m t)),$$
 kde ω_m a ω_n jsou úhlové frekvence modulační a nosné vlny a I je modulační index.²¹ Srovnáme-li toto vyjádření a rovnici elementárního sinového signálu, je patrné, že modulační vlna ve skutečnosti ovlivňuje fázi nosné. Z toho plyne podobnost frekvenční a fázové modulace. Takto vypadají časové průběhy frekvenčně modulovaného signálu (poměry nosného a modulačního signálu jsou 10:1 a 10:3, modulační index je 5):

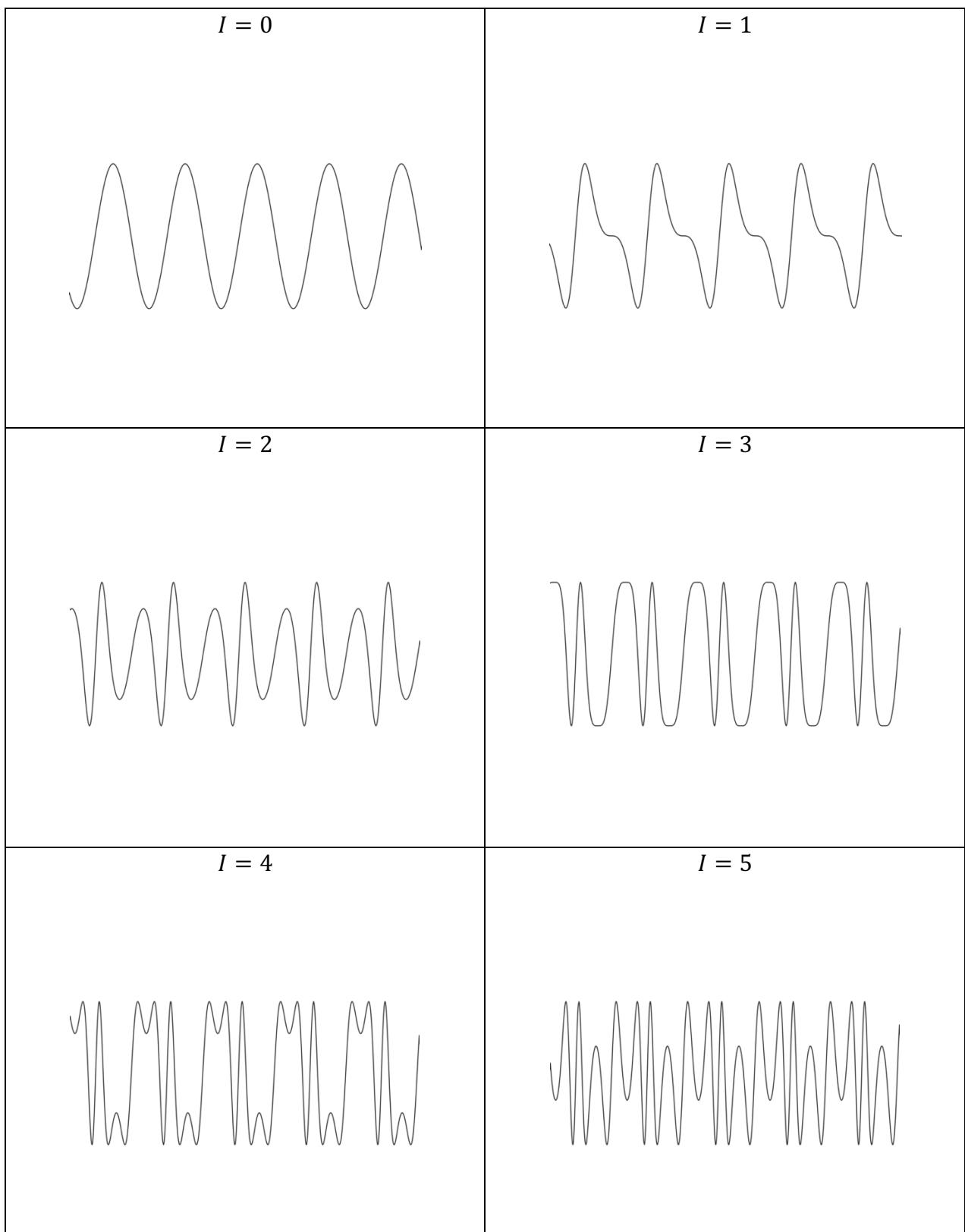
²⁰ Ring modulation. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ring_modulation

²¹ SIEGEL, Rudolf – TUSCHER, Vladimír. *Kmitočtová modulace*. I. vydání. Praha: Naše vojsko, 1956



Obrázek 10.6.1. Časové průběhy FM signálu

Na obrázku 10.6.2 je vidět změna sinového signálu v důsledku frekvenční modulace stejným signálem (poměr frekvencí je 1:1):



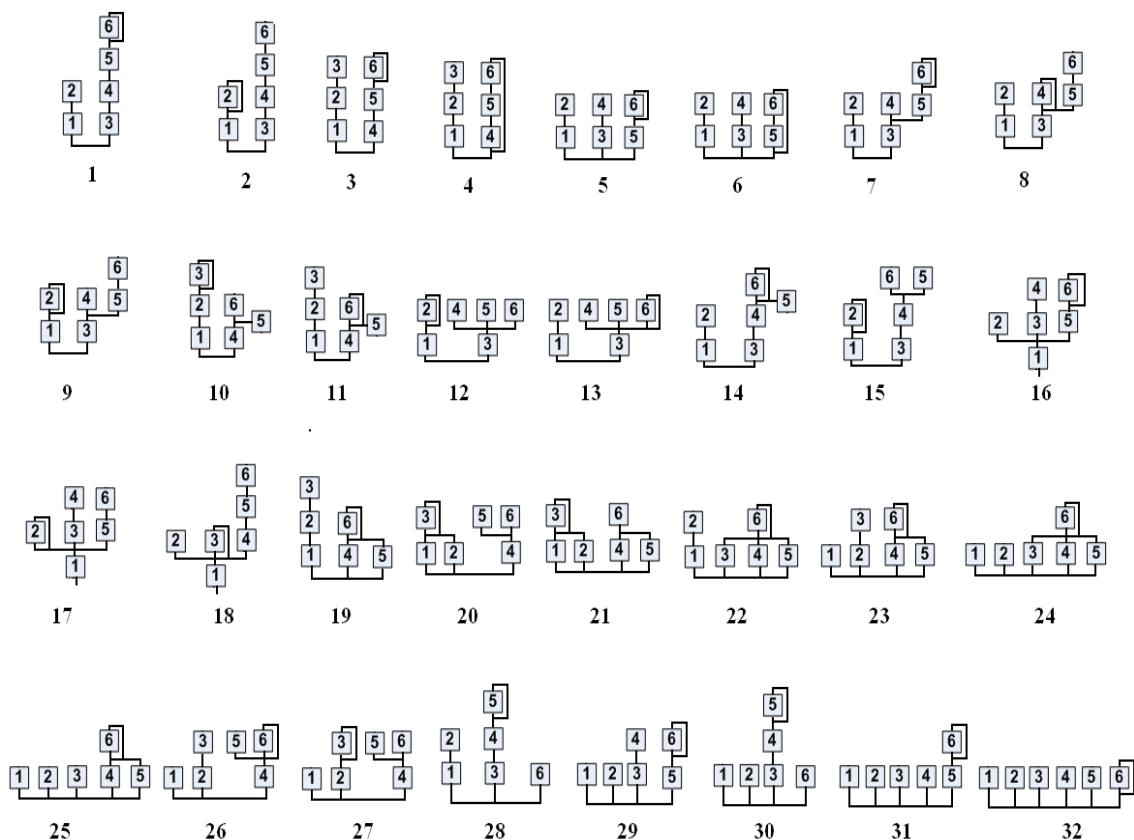
Obrázek 10.6.2: FM sinového signálu

Frekvenční modulaci si můžeme představit jako pravidelnou změnu výšky tónu.

V FM syntetizérech jsou modulační a nosné signály generovány zpravidla sinovými oscilátory. Spíše než se slovem oscilátor se však setkáme se slovem operátor.

Operátor je digitální reprezentací oscilátoru, zesilovače a generátoru obálky.

Takových operátorů bývá v nástroji více a u každého můžeme zvlášť nastavovat ladění, případně citlivé doladění na centy (setiny půltónu), úroveň výstupního signálu a časový průběh jeho obálky. Každý z operátorů se může chovat buď jako modulátor nebo nosič. Frekvence nosiče je pak ovlivňována modulátorem dle nastavených parametrů. Operátory se mohou vzájemně propojovat různými způsoby, kterým se říká algoritmy:



Obrázek 10.6.3: Algoritmy z DX7 (převzato Scsynth: Coding FM Synthesis Algorithms)²²

²² Coding FM Synthesis Algorithms. SuperCollider [online]. 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://scsynth.org/t/coding-fm-synthesis-algorithms/1381>

Na obrázku 10.6.3 je příklad algoritmů ze syntetizéru Yamaha DX7. Jednotlivé čtverečky představují jednotlivé operátory. Ze schémat můžeme poznat, že Yamaha DX7 má operátorů šest.

Podíváme-li se na první schéma, můžeme vidět, že se jedná o sériově-paralelní zapojení operátorů. Signál obou větví algoritmu se na výstupu sčítá. Zatímco v levé věti je pouze modulátor (operátor číslo dva) a nosič (operátor číslo jedna), v pravé věti můžeme vidět kaskádu modulátorů (operátory číslo čtyři, pět a šest) a jeden nosič (operátor číslo tři). Takové zapojení, ve kterém modulátor ovlivňuje frekvenci dalšího modulátoru, vede k mnohem větší komplexitě výsledného spektra. V prvním algoritmu můžeme vidět ještě jednu zajímavost, a tou je zapojení šestého operátoru. Jeho výstup je „odbočen“ a veden zpět na jeho vstup, čímž vzniká zpětnovazebné ovlivňování jeho vlastní frekvence. U takového operátoru můžeme nastavovat hloubku této zpětnovazebné modulace. Toho se využívá proto, že zpětnovazebná modulace umožňuje operátoru mnohem složitější průběh než sinus. Modulujeme-li sinový signál druhým sinovým signálem stejné frekvence, objeví se další frekvenční složky a změní se časový průběh signálu. Protože se jedná o zpětnovazebnou modulaci, nemodulujeme již sinovým signálem, ale průběhem, který vzniká touto modulací. Velká míra zpětnovazebné modulace může proto vést až k šumovému signálu.

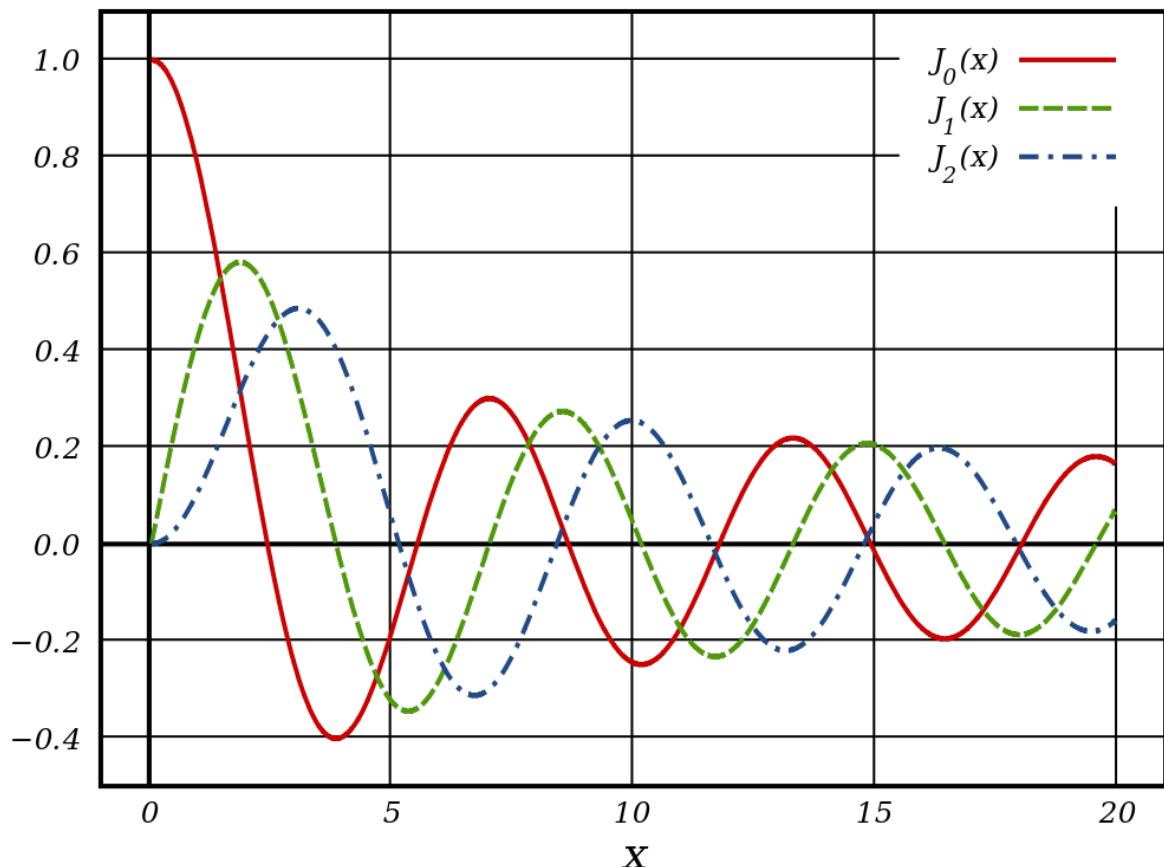
Jak je vidět například na schématu číslo šestnáct, jeden operátor může mít více než jeden modulátor, což opět výrazně ovlivňuje a komplikuje výslednou barvu zvuku. Za zmínku ještě stojí schéma s číslem třicet dva. Zde máme každý operátor zapojený jako nosič bez modulátoru a pouze operátor číslo šest může být frekvenčně modulován (pomocí zpětné vazby). Jedná se tedy v podstatě o aditivní syntézu, vhodnou například k napodobování zvuku varhan.

Barva zvuku produkovaného frekvenční modulací je velice komplexní téma. Malé změny v nastavení parametrů, jako je modulační index nebo poměr frekvencí nosiče a modulátoru, mohou vést k rapidním změnám ve spektru. Proto je predikce takového spektra velice složitou operací. I u frekvenční modulace dochází ke vzniku postranních složek. Je jich ale mnohem více než u amplitudové modulace.

Frekvenci jednotlivých složek signálu můžeme vypočítat pomocí vzorce $f_k = c \pm km$, kde c je frekvence nosné, m je frekvence modulačního signálu a k je pořadové číslo

frekvenční složky.²³ Z tohoto vzorce plyne, že postranní složky vznikají ve dvou pásmech, a to pod a nad nosnou frekvencí. Jejich počet závisí na modulačním indexu (hloubce modulace). Čím větší je modulační index, tím větší je počet postranních složek. Platí jednoduché pravidlo, že počet postranních složek bývá o dvě vyšší, než je hodnota modulačního indexu ($I + 2$).²³

Při výpočtu frekvencí se můžeme dostat také do záporných hodnot. Negativní frekvence v praxi znamená pouze změnu fáze příslušné frekvenční složky o 180 stupňů. Pokud bude na kladné pozici této frekvence ještě jiná složka, hodnoty jejich amplitud se odečtou. Amplitudy se určují pomocí Besselových funkcí prvního druhu. Na obrázku 10.6.4 je příklad funkcí prvních tří řádů:

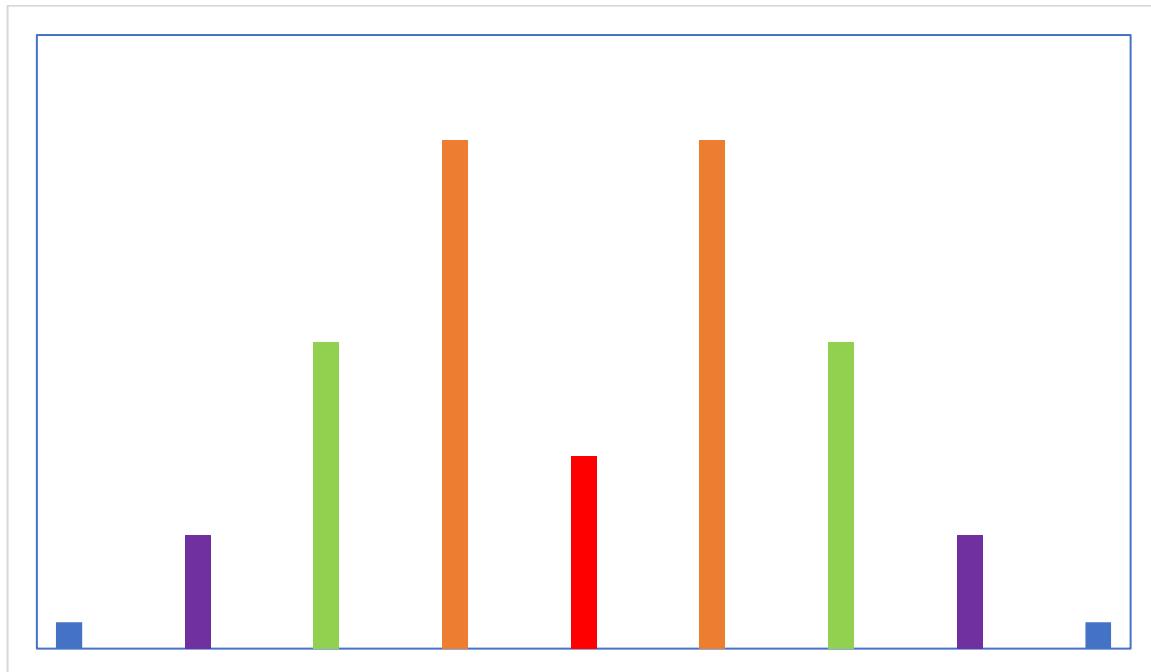


Obrázek 10.6.4: Besselovy funkce (převzato Wikipedia: Bessel function)²⁴

²³ CHOWNING, John – BRISTOW, David. *FM Theory and Applications: By Musicians for Musicians*. Tokyo: Yamaha Music Foundation, 1986. ISBN 4-636-17482-8 COO73.

²⁴ Bessel Function. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bessel_function

Pořadové číslo frekvenční složky k odpovídá řádu Besselovy funkce, kterou k určení amplitudy musíme použít. Amplituda pak odpovídá funkční hodnotě v bodě x , kde $x = I$ (modulační index). Tímto způsobem je ovlivněna i amplituda nosné vlny. Tu určuje Besselova funkce nultého řádu. Spektrum škálovaných amplitud může vypadat například jako na obrázku 10.6.5. Poměr nosné a modulační frekvence je v tomto případě 1:2 a modulační index je 2. Jednotlivé dvojice frekvenčních složek jsou barevně odlišeny, červená je nosná vlna:



Obrázek 10.6.5: Spektrum FM signálu

Časový průběh takto modulovaného signálu vypadá následovně:



Obrázek 10.6.6: Časový průběh FM signálu

10.7 Fázová modulace

Fázová modulace je pouze jiný způsob, kterým můžeme dosáhnout stejných výsledků, jaké má frekvenční modulace. Namísto frekvence nosného signálu však modulujeme jeho fázi. Princip fázové modulace se dá nejlépe vysvětlit pomocí bodů obíhajících po jednotkové kružnici. Nosná frekvence, například 1 kHz , určuje stálou rychlosť běhu bodu N po jednotkové kružnici. Amplituda modulační frekvence pak určuje, o kolik se bude pravidelně měnit fáze nosné. Tato hodnota se značí $\Delta\varphi$ a říkáme jí fázový zdvih. Fázový zdvih má stejnou funkci jako modulační index u frekvenční modulace. Pokud bude modulační frekvence například 20 Hz a fáze nosné se bude měnit o $\Delta\varphi = 100^\circ$ (bude tedy dvacetkrát za vteřinu přičítat a odečítat 100°), bude bod N zrychlovat a zpomalovat také dvacetkrát za vteřinu. Aby se tak stalo, musí se nutně měnit i jeho frekvence.²⁵

Rovnici fázové modulace můžeme vyjádřit vztahem

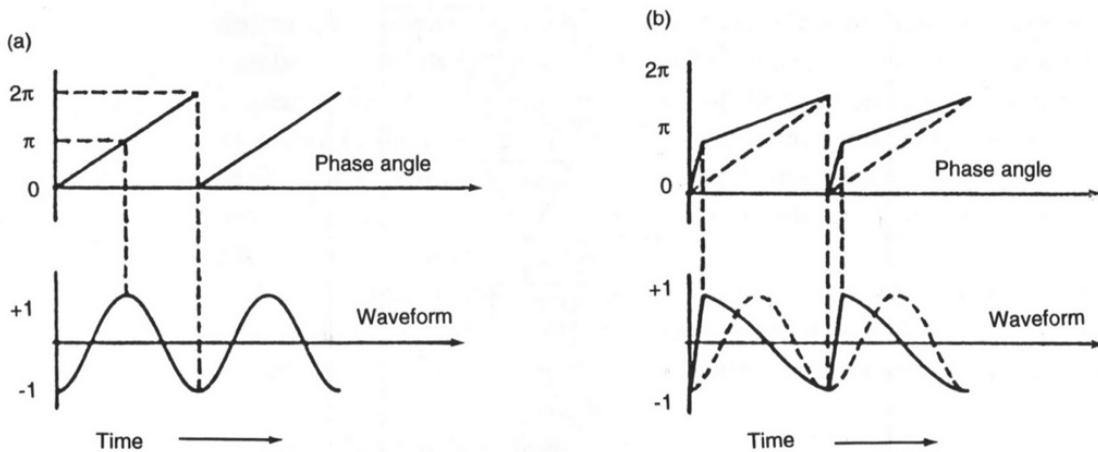
$A_{pm} = A_n \sin (\omega_n t + \varphi_n + \Delta\varphi \sin(\omega_m t))$.²⁵ Je z něj patrné, že k fázi nosné se bude pravidelně přičítat a odčítat hodnota fázového zdviha $\Delta\varphi$ na základě modulační frekvence. Frekvenční složky, které produkuje fázové modulace, se vyskytují ve stejných postranních pásmech, jako při frekvenční modulaci. Jejich amplitudy jsou určeny Besselovými funkcemi stejně jako amplituda nosné vlny.

10.8 Fázové zkreslení

Zcela první nástroj, který pracoval čistě na principu frekvenční modulace, byl syntezátor GS1 firmy Yamaha. Uvedení nástroje mělo zjistit jakou odezvu na nový typ syntézy bude mít hudební trh. Odezva byla vcelku pozitivní, ale skutečný „boom“ nastal až s uvedením nástrojů řady DX. Naprostým bestsellerem se poměrně nečekaně stal syntetizér DX7, který byl původně koncipován jako nástroj střední třídy. Vzhledem k tomu, že Yamaha vlastnila exkluzivní práva k užívání FM syntézy, snažily se ostatní firmy objevit jiný princip, který by měl podobné zvukové výsledky. To se povedlo firmě Casio v čele s inženýrem Markem Fukudou v první polovině 80. let 20. století. Svůj objev nazvala Phase distortion a použila ho v syntetizérech řady CZ.

²⁵SIEGEL, Rudolf –TUSCHER, Vladimír. *Kmitočtová modulace*. I. vydání. Praha: Naše vojsko, 1956

Fázové zkreslení využívá čtení vln uložených ve vlnové tabulce syntetizéru. Do jisté míry může svým principem připomínat tvarování vlny.²⁶ Pomocí přenosové funkce se mění rychlosť čtení vlnového průběhu. Přenosová funkce tedy vyjadřuje závislost fáze na čase. Na obrázku 10.8.1 je vidět, jakým způsobem se dle přenosové funkce mění fáze. Pokud je přenosová funkce lineární (a), nedojde ke zkreslení sinového signálu. Pokud není lineární (b), dojde ke zkreslení:



Obrázek 10.8.1: Fázové zkreslení (převzato Pro Audio Files: The Fundamentals of Phase Distortion Synthesis²⁷)

Ke generování přenosové funkce se využívají modulační oscilátory. Ty jsou tvrdě synchronizovány (Hard-sync) s modulovanými vlnami, takže se každý cyklus moduluje stejně.

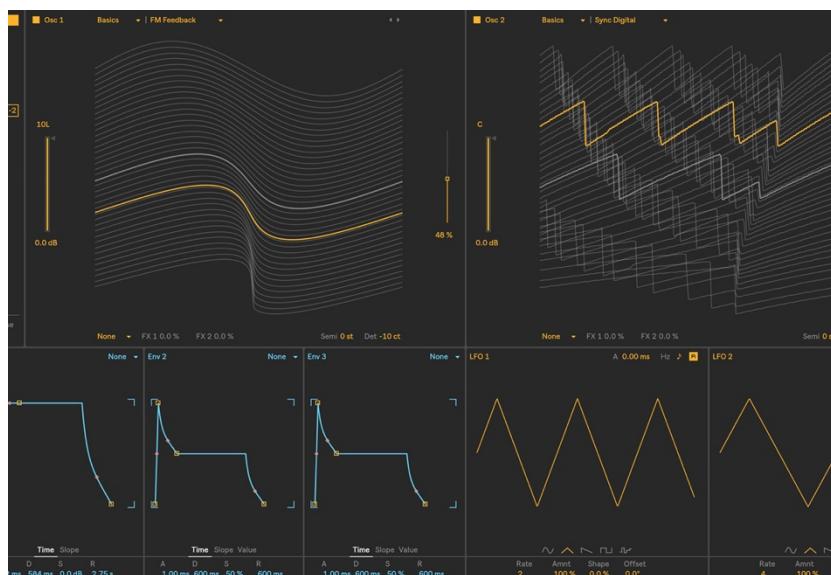
Zvuk PD syntetizérů není totožný s FM syntetizéry. Nové frekvenční složky, produkované fázovým zkreslením, budou vždy v harmonických vztazích.²⁶

²⁶ RUSS, Martin. *Sound Synthesis and Sampling*. Third edition. USA: Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52105-3.

²⁷ MANTIONE, Philip. The Fundamentals of Phase Distortion Synthesis. *Pro Audio Files* [online]. 2019 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://theproaudiofiles.com/phase-distortion-synthesis/>

10.9 Modulace tvaru vlny

Za modulační syntézu bychom mohli považovat také modulaci tvaru vlny produkované oscilátorem. Takovou modulaci podporuje množství digitálních syntetizérů a na jejím principu je založená tzv. wavetable syntéza. Wavetable syntetizéry mají v paměti uloženou celou řadu vlnových průběhů, avšak od každého tvaru pouze jednu periodu. Tyto průběhy následně v různém pořadí přehrávají a prolínají v závislosti na tvaru a frekvenci modulační vlny. Díky rozdílnému spektru každého z průběhů je tak výsledný zvuk velmi variabilní. Na obrázku 10.9.1 je wavetable syntetizér z DAW Ableton 10. Má dva oscilátory (respektive dvě tabulky vlnových průběhů), jejichž vlnový průběh může být modulován pomocí LFO. Žlutě zvýrazněný průběh je ten, který se aktuálně přehrává:



Obrázek 10.9.1: Ableton 10 Wavetable syntetizér

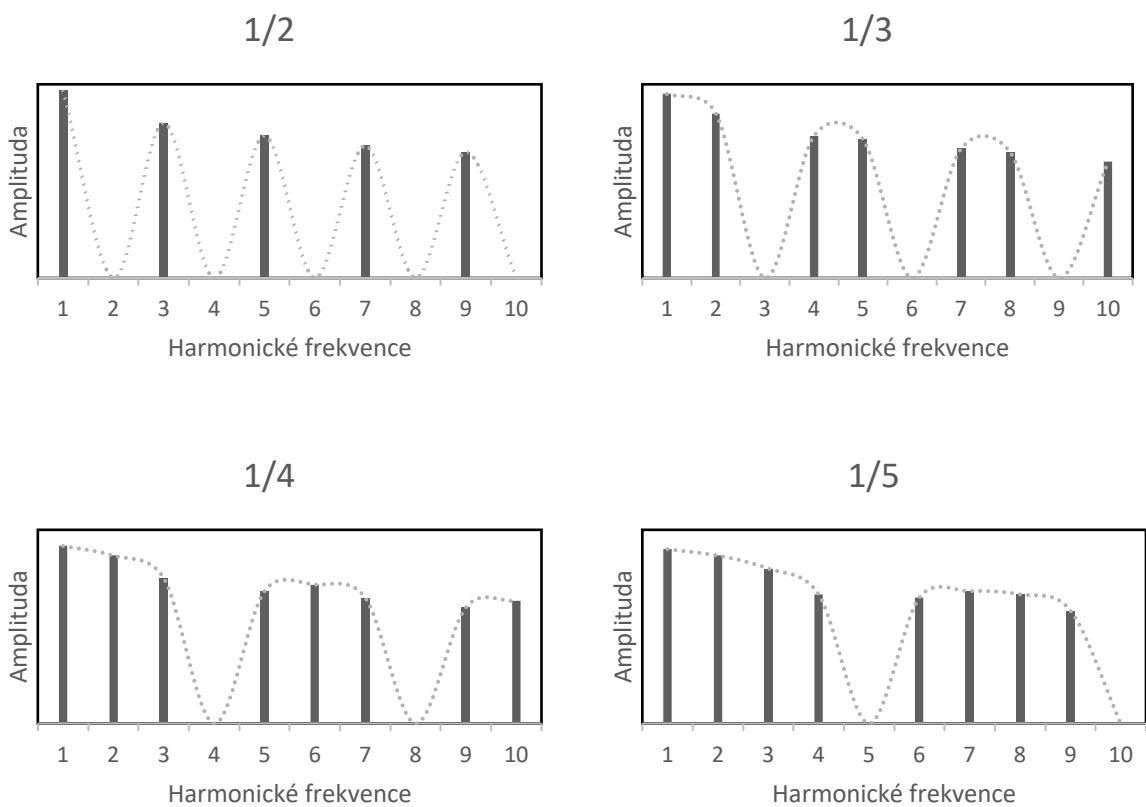
Na začátku 90. let 20. století se začal pojednat o wavetable používaném pro MIDI syntetizéry ve zvukových kartách osobních či stolních počítačů. Jejich princip se však od wavetable syntézy liší. MIDI syntetizéry využívají zpravidla kombinace samplování a FM syntézy (tzv. S&S – Sample and Synthesis). V jejich ROM jsou uloženy vzorky skutečných nástrojů a při přehrávání MIDI souborů se spouští na základě vstupní informace.²⁸

²⁸ TROSZOK, Daniel. Zvuková syntéza. Muzikus: magazín pro muzikanty. 2008, 2008(6), 46-58. ISSN 1210-1443.

10.10 Modulace šířky pulzu

Pulzní modulace (PWM) svým způsobem připomíná modulaci tvaru vlny a dala by se také do této kategorie zařadit. Obdélníkový signál definuje také jeho střída. Střída vyjadřuje poměr časů, ve kterých má obdélníkový signál hodnotu 1 a 0. Dá se vyjádřit také procentem či poměrem, který vyjadřuje dobu trvání hodnoty 1 vůči jedné periodě. Takto budu střídu nadále vyjadřovat.

Produkuje-li oscilátor vlnu s obdélníkovým průběhem (střída signálu je 50%), bude spektrum výsledného zvuku obsahovat pouze liché harmonické (stejně jako spektrum ostatních takto souměrných signálů). Pokud ovšem pozměníme střídu takového signálu, dojde ke změně spektra – potlačí se ty harmonické frekvence, které odpovídají hodnotě střídy signálu. Na obrázku 10.10.1 můžeme pozorovat změnu spektra při střídách 1/2 (50%), 1/3 (33%), 1/4 (25%) a 1/5 (20%):



Obrázek 10.10.1: Spektrum obdélníkového signálu různých stříd

Střídu můžeme modulovat harmonickým signálem a získáme tak periodické změny spektra zvuku. Modulace šířky pulsu svým proměnným spektrem dodává zvuku

jakousi živost. Zvolíme-li vysokou modulační frekvenci, můžeme slyšet zcela nové složky signálu, podobně jako u amplitudové modulace.

10.11 Modulace cyklu oscilátoru

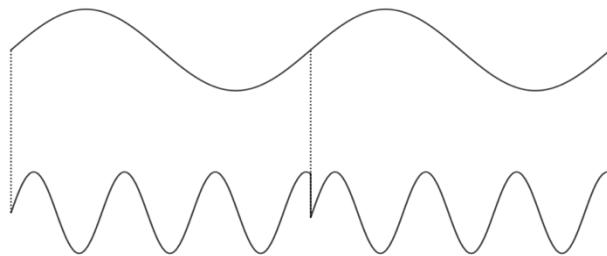
Jsou-li dva oscilátory nesynchronní (nemají stejnou fázi), vytvářejí v unisonu záZNĚje. V některých syntetizérech, které mají dva a více oscilátorů, existuje možnost jejich synchronizace (Oscillator sync). Synchronizovat lze VCO i DCO. Příkladem takových syntetizérů mohou být ARP Odyssey Mk.III (1998), Moog Prodigy (1979), Moog Source (1981) či Sequencial Circuits Pro-One (1981).

Podle způsobu synchronizace oscilátorů bychom tuto metodu syntézy mohli rozdělit na:

10.11.1 Hard Sync

Zde synchronizace probíhá tak, že jeden z oscilátorů má funkci master a druhý slave. Jakmile master oscilátor dokončí jednu periodu, resetuje periodu slave oscilátoru²⁹. Pokud mají oba oscilátory shodnou frekvenci, synchronizace tak přesně sjednotí jejich fázi.

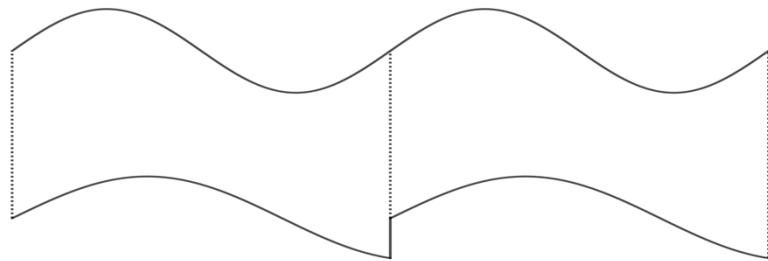
Pokud má však řízený oscilátor jinou frekvenci než řídící, má také rozdílnou dobu periody. Pokud je frekvence slave oscilátoru vyšší než frekvence master oscilátoru, dojde k nedokončení jednoho cyklu slave oscilátoru. Viz obrázek 10.11.1.1:



Obrázek 10.11.1.1: Hard Sync

²⁹ CORMAN, Emmet. Simple Synthesis: Part 7, Oscillator Sync. *Keith McMillen Instruments* [online]. 2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: www.keithmcmillen.com/blog/simple-synthesis-part-7-oscillator-sync/

Pokud je frekvence slave oscilátoru naopak menší než frekvence master oscilátoru, nedokončí slave oscilátor ani svůj první cyklus:



Obrázek 10.11.1.2: *Hard Sync*

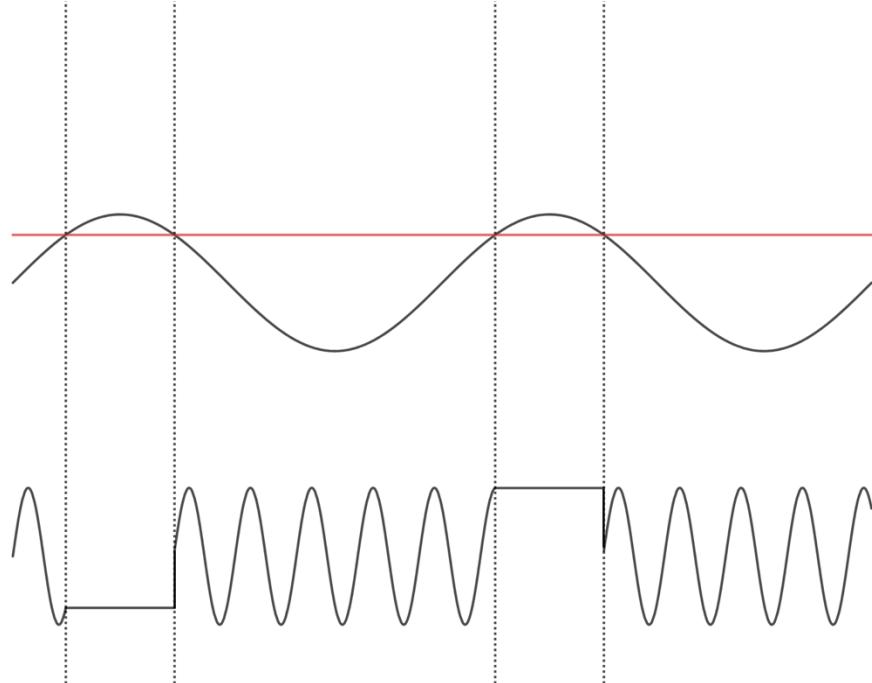
Pokud je průběh slave oscilátoru sinus, bude produktem metody Hard Sync nárůst vyšších frekvenčních složek. Toho se využívá například v subtraktivních syntetizérech.³⁰ Díky této synchronizaci lze generovat frekvenčně bohaté signály i z jednoduchých průběhů.

10.11.2 Soft Sync

U synchronizace Soft Sync nezáleží pouze na periodě master oscilátoru, ale také na vlastnostech slave oscilátoru či jiných parametrech. Existuje celá řada metod, které se k dosažení Soft Sync používají.

³⁰ CORMAN, Emmet. Simple Synthesis: Part 7, Oscillator Sync. *Keith McMillen Instruments* [online]. 2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: www.keithmcmillen.com/blog/simple-synthesis-part-7-oscillator-sync/

Například, pokud master oscilátor překročí určitý práh (threshold), dojde k zaznamenání (sample&hold) poslední hodnoty slave oscilátoru. K resetu cyklu slave oscilátoru dojde při opětovném překročení prahu master oscilátorem. Toto se nazývá *Reset Inhibit Sync*.³¹

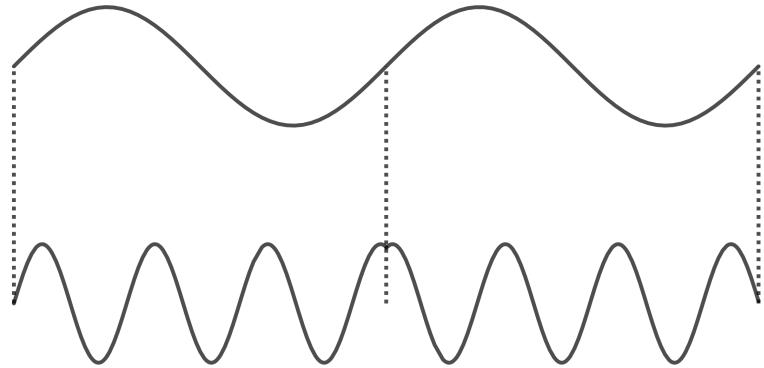


Obrázek 10.11.2.1: *Reset Inhibit Sync*

Další metoda, zvaná *Overlap*, funguje podobně jako Hard Sync. Místo tvrdého začátku nového cyklu však dochází k prolnutí nedokončeného s novým.

³¹ Oscillator sync. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Oscillator_sync

Zajímavý způsob Soft Syncu je tzv. *Reversing Sync*. Ten také vychází z principu Hard Syncu, ale při resetu vlny slave oscilátoru dojde k invertování jejího tvaru kolem svislé osy:



Obrázek 10.11.2.2: *Reversing Sync*

Obdobných metod synchronizace je celá řada a konkrétní princip se liší podle typu nástroje či výrobce. U sinových průběhů slave oscilátorů dochází díky synchronizaci k obohacení signálu o další frekvenční složky.

11 Užívání modulace

Modulace má široké využití, a to nejen v hudebním umění, ale také například ve sdělovací technice.

11.1 Ve sdělovací technice

Proces modulace a demodulace se využívá například při rozhlasovém či televizním vysílání. Vynález rádia se často připisuje Gugliemu Marconimu, avšak bezdrátový přenos jako první uskutečnil Nikola Tesla. Předcházelo mu popsání principu šíření elektromagnetických vln vynálezcem Jamesem Clerkem Maxwellem.

Slyšitelné spektrum zvukového signálu (20 Hz–16 kHz) se nachází v relativně nízkých kmitočtech. Proto je potřeba zvukovým signálem modulovat nosné vlny s mnohem vyším kmitočtem a teprve ty vysílat. Díky různým frekvencím nosných vln je možné spektra zvukových signálu vhodně uspořádávat a vysílat více kanálů najednou. Vyšší nosné frekvence také usnadňují konstrukci antén.

Metoda amplitudové modulace nosné vlny se používá od první poloviny 20. století. Demodulace amplitudově modulovaného signálu je technicky nenáročná. K přijímání signálu postačí například pasivní krystalka. Pásma nosných vln se rozdělují (dle ITU) na dlouhé vlny (30–300 kHz), střední vlny (300 kHz–3 MHz) a krátké vlny (3 MHz–30 MHz).³² Zvukový signál přenášený amplitudovou modulací byl však až do 60. let monofonní a frekvenčně omezený přibližně na 30–4500 Hz.³³ Stereofonního přenosu se dá dosáhnout například pomocí ISB (Independent Side Band). Jeden kanál se přenáší součtovou a druhý rozdílovou složkou.

Od druhé poloviny 20. století začalo používat tzv. VKV (velmi krátké vlny) pásmo (30–300 MHz). Toto pásmo je vhodné pro frekvenčně modulované vysílání, které má širší spektrum. Výhodou FM vysílání je mnohem vyšší kvalita přijímaného signálu.

Na konci 80. let 20. století vznikl standard digitálního rozhlasového vysílání DAB. V dnešní době se již užívá jeho modernější verze DAB+. Tyto verze se liší použitými

³² Rozhlas. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozhlas>

³³ BENEŠ, Filip. Úvod do problematiky zpracování signálu ve vysílacím řetězci: se zaměřením na dynamické úpravy hudební stereo nahrávky. Praha, 2017. Bakalářská práce. AMU. Vedoucí práce doc. Tomáš Zikmund.

kodeky. Audio se vysílá také televizním standardem DVB. Ten užívá širokopásmové frekvenční modulace.³³ Zjednodušeně můžeme říct, že dochází k přenosu digitální informace pomocí kódování na několik nosných vln v tzv. multiplexu.

11.2 Modulace jako zvukový efekt

Modulace je svým charakterem proces nelineární, protože vždy vede ke vzniku nových frekvenčních složek. Tyto modulační produkty však nemusí být ve všech případech zcela zřetelné. Ze subjektivního hlediska lze modulace rozdělit na kvazilineární a nelineární.³⁴ Nelineární modulace vytváří nové frekvenční složky v takové míře, že dochází k přetvoření vstupního signálu. Nelineární modulace tedy aktivně generuje nový signál. Naopak produkty kvazilineární modulace jsou na hranici postřehnutelnosti a tato modulace tedy signál pouze pasivně zpracovává. V hudebním zvuku můžeme chápat nelineární modulaci jako syntézu a kvazilineární modulaci jako efekt.

Pojem „zvukový efekt“ může mít celou řadu významů. Z pohledu zvukové režie jej však nejčastěji vnímáme jako změnu původního zvuku v důsledku jeho elektroakustického zpracování.³⁵ Elektroakustickým zpracováním je i modulace.

Počátky užívání modulace v hudbě bychom mohli hledat již v baroku. „Lidský hlas vždy představoval a stále představuje kvalitativní vzor pro tón hudebních nástrojů.“³⁶ Jeho přirozené chvění tak můžeme považovat za vznik techniky *vibrato*. Vibrato je kvazilineární frekvenční modulací a neprodukuje tedy postřehnutelné frekvenční složky. Jeho název byl dlouhou dobu nesjednocen. Skladatelé ho často zaměňovali za tremolo či ho označovali vlastním názvem. Leopold Mozart dokonce ve svém pojednání o houslových technikách označil jako tremolo a vibrato stejnou techniku, tedy pohyb prstem na hmatníku vpřed a vzad během produkce tónu.³⁷ Speciální termín se také používal při hře na klavichord. Slovem *bebung* se označoval stisk

³⁴ SYROVÝ, Václav. *Hudební signál a jeho syntéza* [online]. s. 169 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.ziva-hudba.info/files/2014/04/140403201437_pdf_0.pdf

³⁵ SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby*. V Praze: Akademie muzických umění, 2009. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN isbn978-80-7331-161-2.

³⁶ SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.

³⁷ MOZART, Leopold. *A Treatise on the Fundamental Principles of Violin Playing*. 2. Přeložila Editha Knocker. Oxford: Oxford Press, 1951. ISBN 0-19-318513-X.

a následné zvýšení tlaku na klávesu nástroje. Hráč tak mohl přitlačením kladívka na strunu zvětšit její napětí a tím zvýšit frekvenci produkovaného tónu. Podobných výsledků se dá dosáhnout při hře na flétnu či na jiné dechové nástroje. Vibrato se používá z celé řady důvodů. Tím hlavním je přidání určitého lesku a živosti produkovanému tónu. Tyto termíny bychom mohli z akustického hlediska vysvětlit proměnným spektrem,³⁸ a také periodickými změnami vyzařovací charakteristiky nástroje,³⁹ které způsobuje vibrato. Dalším důvodem může být také lepší identifikace sólového nástroje ve větší skupině hráčů. Používání vibrata je ovšem podmíněno určitými hudebně-estetickými trendy. Ve druhé polovině 20. století se z něj stalo kontroverzní téma, když dirigent Roger Norrington poukázal na jeho přílišné užívání při orchestrální hře.⁴⁰ V řadách odborníků na historicky poučenou interpretaci existují jeho odpůrci, ale i přívrženci.

V notovém zápisu se vibrato označuje linkou, která znázorňuje periodické změny ve výšce tónu:



Obrázek 11.2.1: Notový zápis vibrata

Další efekt, který vznikl v baroku má název *tremolo*. Jeho objevení je připisováno italskému skladateli Claudiu Monteverdimu. Ačkoliv v oblasti elektronického zvuku chápeme tremolo jako kvazilineární amplitudovou modulaci, v artificiální hudbě se jedná spíše o periodické opakování krátkých notových hodnot, které Monteverdi označoval *stile concitato*. Tato artikulace jednak navozuje jakousi rozrušenou či dramatickou atmosféru, ale také umožňuje impulzně buzeným nástrojům produkovat „dlouhé“ tóny. V takovém případě se můžeme setkat také s pojmenováním

³⁸ SCHLESKE, Martin. *The Psychoacoustic Secret of Vibrato*. Martin Schleske [online]. Landsberg am Lech [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.schleske.de/en/research/handbook-violinacoustics/vibrato-of-the-musician.html>

³⁹ CURTIN, Joseph. Gabriel Weinreich and Directional Tone Color. *The Strad* [online]. 2000 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20141229211555/http://josephcurtinstudios.com/article/the-violin-finally-speaks/>

⁴⁰ Vibrato Wars. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrato#Vibrato_wars

bisbigliando. Až v 18. století se začalo používat tremolo formou kvazilineární amplitudové modulace v pravém slova smyslu. Houslisté ho tvořili periodickými změnami v tlaku na smyčec a do varhan byly instalovány tzv. tremulanty. Tremulant je zařízení, které ovlivňuje množství vzduchu vedeného do píšťal. Jeho působením však dochází nejen k tremolu, ale částečně i k vibratu. Tremolo přináší tónu jakousi neklidnost či třás. V notovém zápisu se označuje nejčastěji třemi vodorovnými linkami nad či pod notou:



Obrázek 11.2.2: Notový zápis tremola

První elektrofony neobsahovaly žádné modulační generátory a zmíněných efektů se dosahovalo stejně jako na tradičních nástrojích, tedy technikou hry hudebníka. Zcela typické je použití vibrata při hře na *Theremin* (1920) či *Martenotovy vlny* (1928). Tremola se dalo dosáhnout na nástrojích, které umožňovaly hudebníkovi práci s dynamikou, například tlakový hmatník *Trutonia* (1930).

Generátory modulace se v první polovině 30. let 20. století začaly objevovat přímo v elektromechanických nástrojích. Například v *Hammondových varhanách* (1934) existuje systém vibrata a chorusu s pevně nastavenou modulační frekvencí.

Za jakési první externí generátory modulace bychom mohli považovat systémy rotujících reproduktorů, které vznikaly ve 30. letech 20. století. Asi nejznámějším je Leslie box. Jedná se o systém reproduktorů sestrojený Donaldem Leslieem a původně určený k použití s Hammondovými varhanami. Leslie nebyl se zvukem tohoto nástroje spokojen, a tak se snažil najít způsob jakým ho vylepšit. Všiml si, že zvuk skutečných kostelních varhan díky jejich velikosti vykazuje jistý pohyb, který reproduktor Hammondových varhan nedokáže napodobit. Leslie proto vynalezl zařízení, které obsahovalo mimo jiné lampový zesilovač a výhybku (crossover) pro vysoké a basové frekvence. Nad výškový reproduktor umístil dva otáčivé zvukovody a pod basový reproduktor otáčivou odraznou plochu. Díky tomuto systému dochází k simulaci otáčení zdroje zvuku. To způsobuje amplitudovou (respektive spektrální) modulaci. Amplituda (obzvláště vysokých frekvencí) klesne, pokud zdroj vyzařuje

směrem od posluchače a naopak. Zároveň vzniká frekvenční modulace, protože zdroj se vůči posluchači pohybuje, a tím vytváří Dopplerův jev. Uživatel může měnit rychlosť otáčení zařízení, čímž mění i modulační frekvenci. Díky tomuto systému již bylo možno dosáhnout v elektrofonech relativně vyšších modulačních frekvencí. Při pomalé rychlosti otáčení se horný pohybují rychlostí asi 50 otáček za minutu (přibližně 0,8 Hz) a odrazivá plocha pod basovým reproduktorem rychlostí 40 otáček za minutu (přibližně 0,67 Hz). Avšak při velké rychlosti mají horný již 400 otáček za minutu (přibližně 6,7 Hz) a odrazivá plocha asi 340 otáček (přibližně 5,7 Hz).⁴¹ Ani u Leslie boxu však nemůžeme mluvit o aktivní generaci nového signálu.

Přímo v elektronických nástrojích se začaly objevovat modulační generátory až ve druhé polovině 30. let 20. století. Jednalo se však pouze o neperiodické signály modulující průběh amplitudy – rychlosť náběhu a dozívání. Příkladem může být nástroj *Warbo Formant Organ* (1937).⁴²

Než se v elektronických nástrojích začaly využívat jako generátory modulace oscilátory, využívalo se jiných, zpravidla mechanických principů. Například v nástroji *Novachord* (1938) sloužily ke generaci vibrata kovové jazýčky. Ty se elektromagneticky rozkmitávaly a periodickým přerušováním kontaktu měnily frekvenci oscilátorů.⁴²

Na přelomu 30. a 40. let 20. století byla objevena složitější forma spektrální modulace – *vocoder*. Vocoder je efekt, který dokáže analyzovat spektrální složení lidského hlasu a pomocí něho filtrovat signál bohatý na harmonické frekvence. Výsledný zvuk tak působí roboticky, ale hlas je stále čitelný. Ačkoliv jeho původním účelem bylo kódování a komprese řečového signálu pro přenos po telefonních linkách,⁴² dodnes se vocoder používá v elektronické hudbě.

Jeden z prvních elektronických nástrojů, který využívá oscilátoru jakožto generátoru periodické modulace, jsou varhany *Baldwin* z roku 1946. Ty používaly oscilátor s frekvencí 7 Hz k modulaci frekvence dvanácti tónových generátorů.⁴² Pozdější

⁴¹ Leslie speaker. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Leslie_speaker

⁴² GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.

nástroje, například *Clavioline* či *Melochord* z roku 1947, již umožňovaly frekvenci i hloubku vibrata do určité míry nastavovat.

Modulace sloužící k aktivní generaci nového signálu se v nástrojích začala objevovat až na přelomu 50. a 60. let 20. století spolu s vynálezem napětím řízených obvodů. Například v *Subharchordu* se již ke zpracování hudebního signálu využíval také kruhový modulátor.⁴² V této době byla na vzestupu experimentální elektronická a elektroakustická hudba a vznikaly nástroje, jejichž cílem bylo vytváření komplexních zvukových barev, nikoliv „pouhá“ nápodoba tradičních nástrojů. A právě tyto nástroje začaly hojně využívat frekvence ze slyšitelného spektra jako modulační. To umožňovaly například modulární systémy *Buchla Electronic Music System* (1963) či *Moog Modular Synthesizer* (1964). Signály se v těchto systémech dělí na zvukové, řídící a časovací. Umožňují tak nejen modulaci celé řady parametrů, ale také synchronizaci více nástrojů či sekvencérů.

Efekty typu vibrato a tremolo se postupem času izolovaly z elektrofonů do samostatných pedálů („krabiček“) a bylo možné je použít i s dalšími elektromechanickými či elektronickými nástroji. Díky stále jednodušším možnostem záznamu a zpracování zvuku také vznikly modulační efekty, které pro svůj chod záznamu zvuku vyžadují – *chorus* a *flanger*. Princip obou efektů je podobný. Při vstupu signálu do efektu dojde k vytvoření jedné či více kopí originálního zvuku. Tyto kopie jsou následně zpožďovány. Chorus pracuje s většími časy zpoždění než flanger. V chorusu je čas zpoždění běžně do dvaceti milisekund, zatímco ve flangeru asi do pěti milisekund. Díky kombinaci zpožděné kopie signálu s originálem vznikají záZNĚje a hřebenový filtr a díky modulaci zpoždění dochází k periodickým změnám v účinku těchto jevů.⁴³ Výsledný zvuk tak působí mohutněji. I tyto efekty mají původ v tradičních hudebních nástrojích. Podobný zvukový výsledek má například užití více strun produkovujících stejný tón ve dvanáctistrunné kytaře či jiných nástrojích.

⁴³ BROWN, Griffin. Understanding Chorus, Flangers, and Phasers in Audio Production. /Zotope [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.izotope.com/en/learn/understanding-chorus-flangers-and-phasers-in-audio-production.html>

12 Hranice mezi syntézou a efektem

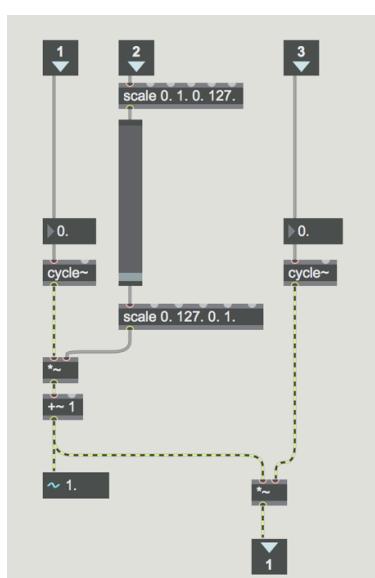
Přestože modulace vždy povede ke vzniku nových složek, jejich úroveň nemusí být vždy zcela zřetelná. Cílem subjektivního pozorování je stanovit, zda existuje zcela zřejmá hranice mezi přechodem pasivního zpracování a generace nového signálu a zda se tato hranice zásadně liší pro jednotlivé metody modulace.

K porovnání jednotlivých metod modulační syntézy zvuku jsem se rozhodl použít pokusné modulátory, které jsem naprogramoval v prostředí MAX/MSP. Jedná se o prostředí, které kombinuje klasické textové programování s grafickým. Slouží převážně k práci se zvukem, videem či obrazem.

12.1 Modulátory

Amplitudový modulátor je založen na matematickém vyjádření amplitudové modulace

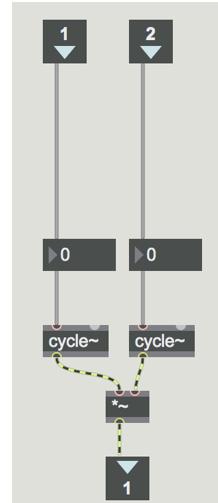
$A_{am} = A_n(1 + m \sin \omega_m t) \sin(\omega_n + \varphi)$. Prvním vstupem je do modulátoru přiváděna modulační frekvence ve formě čísla, která řídí oscilátor se sinovým průběhem (objekt *cycle~*). Druhým vstupem je do modulátoru přiváděn modulační index ve formě čísla, jehož hodnota může být mezi 0 a 1. Modulačním indexem se v objektu „ $\star~$ “ násobí signál z modulačního oscilátoru. Následně je k signálu přičtena hodnota 1, stejně jako v rovnici amplitudové modulace. Třetím vstupem je přivedena nosná frekvence, která řídí sinový oscilátor *cycle~*. Tento signál je následně násoben modulačním, čímž vzniká amplitudová modulace. Díky tomu, že se k modulačnímu signálu přičítá hodnota 1, nezanikne nosná vlna i při nulovém modulačním indexu.



Obrázek 12.1.1: Amplitudový modulátor

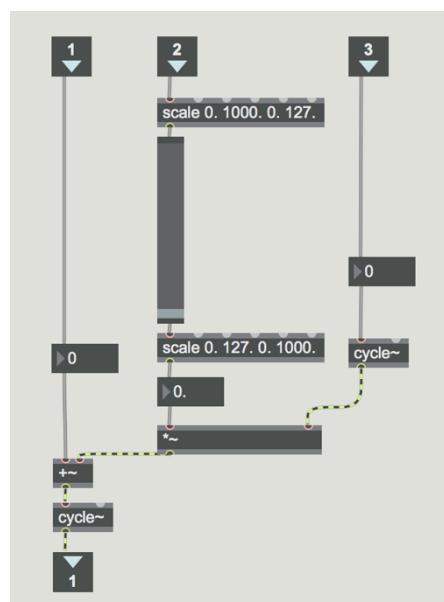
Kruhový modulátor oproti tomu využívá prostý součin nosného a modulačního signálu, stejně, jako je tomu v rovnici kruhové modulace

$$A_{rm} = (A_n \sin(\omega_n t)) * (A_m \sin(\omega_m t)).$$



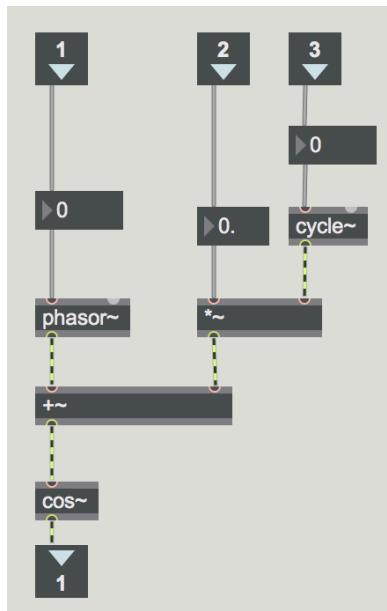
Obrázek 12.1.2: Kruhový modulátor

Frekvenční modulátor má na prvním vstupu nosnou frekvenci. Druhý vstup je určen pro modulační index, který může mít v podstatě jakoukoliv kladnou hodnotu. V tomto případě je hodnota omezena na 0–1000. Třetí vstup přivádí modulační frekvenci, která řídí oscilátor *cycle~*. Jeho signál je opět násoben hodnotou modulačního indexu. Výsledná hodnota je přičtena k hodnotě nosné frekvence. Výsledek řídí oscilátor *cycle~*. Takto vzniká frekvenční modulace, kterou můžeme vyjádřit rovnicí $A_{fm} = A_n \sin(\omega_n t + I A_m \sin(\omega_m t))$.



Obrázek 12.1.3: Frekvenční modulátor

Fázový modulátor můžeme v prostředí MAX/MSP sestavit různými způsoby. První způsob vychází z rovnice fázové modulace $A_{pm} = A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n + \Delta\varphi \sin(\omega_m t))$. Objekt *cycle~* můžeme nahradit kombinací objektu *phasor~* a *cos~*. *Phasor~* je generátor pilového signálu, jehož hodnoty leží v rozmezí 0 a 1. Zatímco objekt *cycle~* vyhledává již spočítané vlny ve vlnové tabulce, *cos~* je objekt, který je počítá v reálném čase. Z každého příchozího vzorku spočítá hodnotu funkce cosinus a jeho výstup se pohybuje mezi -1 a 1. Zavedeme-li tedy na jeho vstup *phasor~*, získáme vlnu s cosinovým průběhem, jejíž frekvence se rovná frekvenci objektu *phasor~*. První vstup modulátoru určuje frekvenci pilového generátoru. Na třetí vstup je přivedena frekvence, která řídí sinový oscilátor *cycle~*. Výstupní hodnota oscilátoru je násobena hodnotou na druhém vstupu modulátoru. Tou je hodnota fázového zdvihu. Výsledek se následně přičítá k fázi nosného signálu, stejně jako v rovnici fázové modulace.⁴⁴

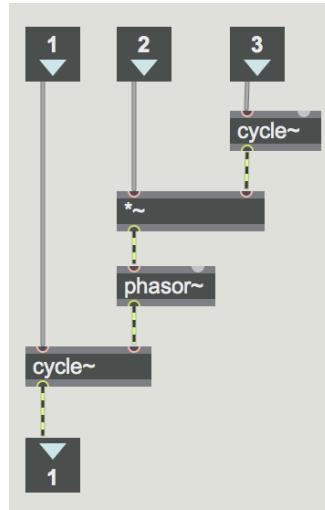


Obrázek 12.1.4: Fázový modulátor

Pokud nastavíme na takto sestaveném modulátoru stejné parametry jako na předchozím FM modulátoru, získáme rozdílný zvukový výsledek. Má-li modulační index a fázový zdvih stejnou číselnou hodnotu, výsledek nemůže být stejný.

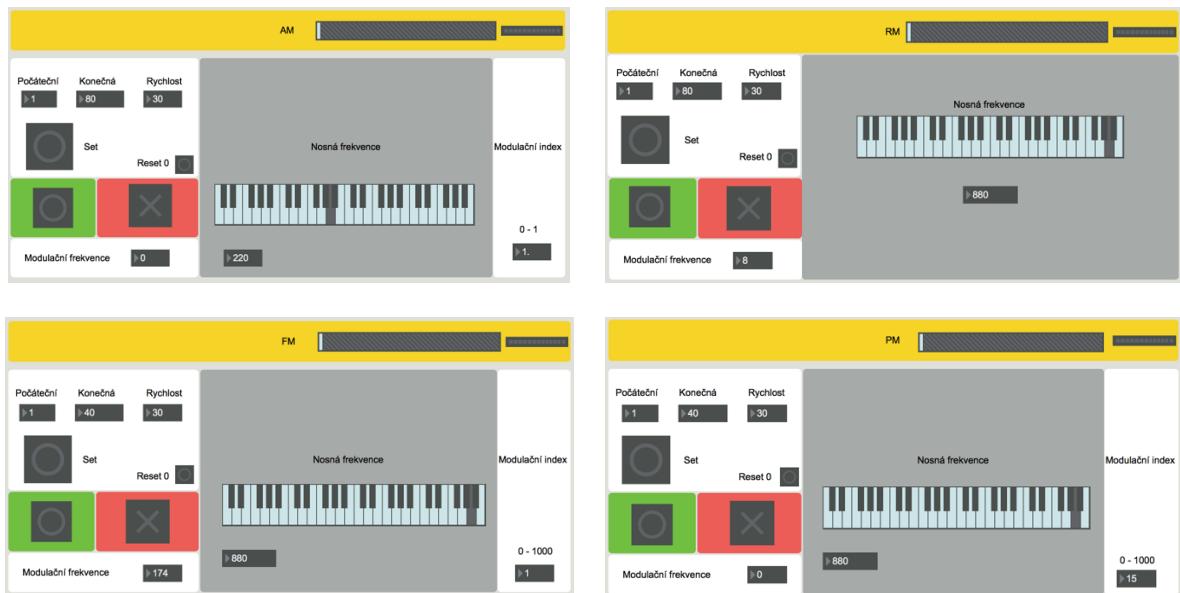
⁴⁴ PUCKETTE, Miller. *The Theory and Technique of Electronic Music* [online]. World Scientific Publishing Co. Pte., 2007 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://msp.ucsd.edu/techniques/latest/book-html/node3.html>

Pro jednodušší porovnání FM a PM syntézy jsem sestrojil odlišný fázový modulátor. Do prvního vstupu je přivedena nosná frekvence, do druhého fázový zdvih a do třetího modulační frekvence. Modulační frekvence ovládá oscilátor, který na základě modulačního zdvihu ovlivňuje frekvenci pilového generátoru. Ten přímo ovlivňuje fázi nosného oscilátoru.



Obrázek 12.1.4: Fázový modulátor

Z výše zmíněných modulátorů jsem v programu MAX/MSP vytvořil testovací prostředí:



Obrázek 12.1.5: Experiment v MAX/MSP

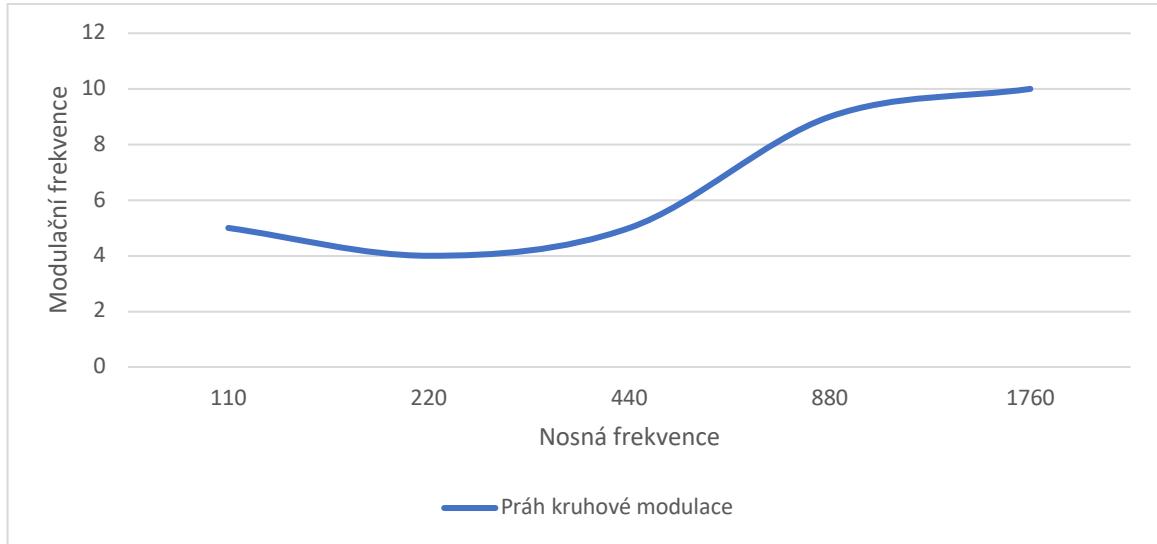
12.2 Závislost modulační frekvence na nosné frekvenci

Experiment probíhal tak, že jsem u příslušné modulace nastavil zvolenou nosnou frekvenci. Následně jsem zvolil modulační index. Dále jsem spustil sweep modulační frekvence. Ten trval 20 sekund a jeho rozsah jsem nastavoval dle potřeby. Ve chvíli, kdy jsem zaznamenal značnou změnu signálu, jsem sweep zastavil a odečetl modulační frekvenci. Aby můj experiment zůstal v „hudební“ rovině, testoval jsem nosné frekvence 440 Hz (komorní a), 220 Hz, 110 Hz a 880 Hz. Modulační i nosný signál měl sinový průběh. Tabulka naměřených hodnot je v příloze 1 (str. 70).

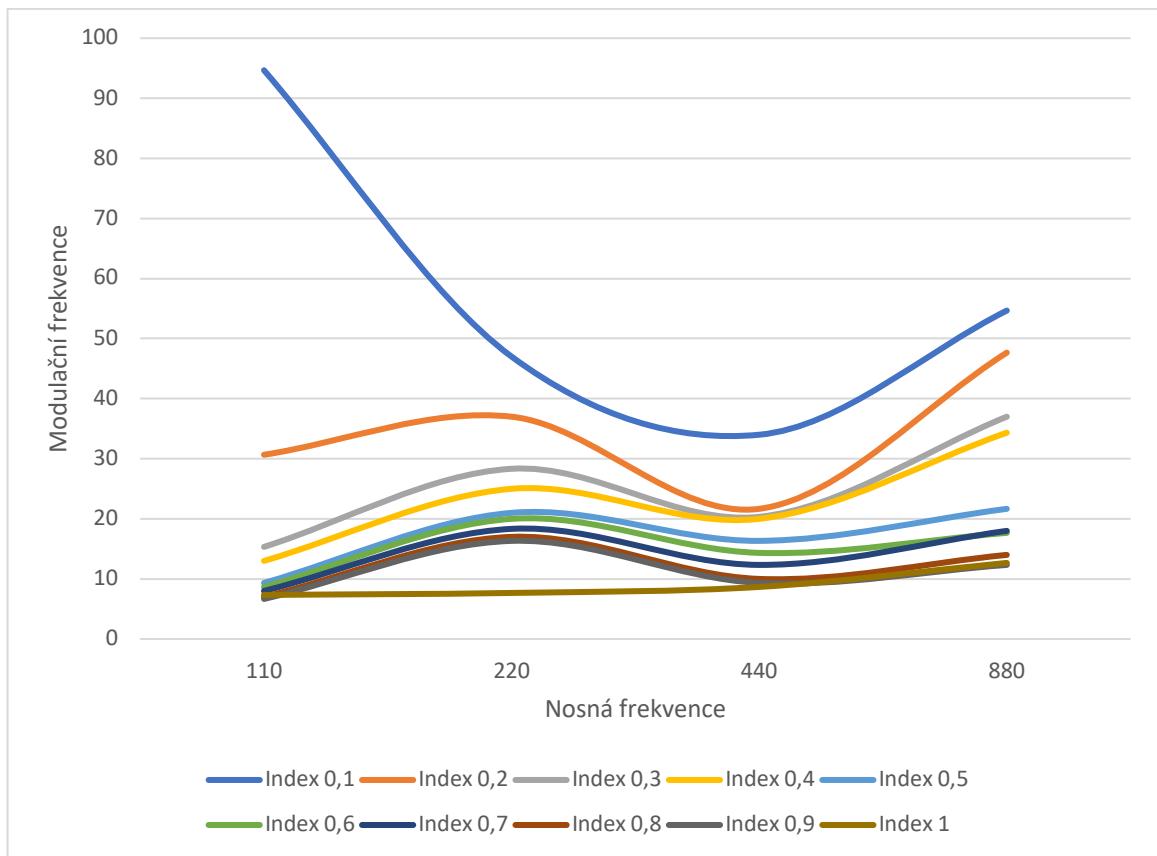
12.2.1 Amplitudová a kruhová modulace

Kruhová modulace byla, díky potlačení nosné vlny, patrná velmi rychle. Nejnižší modulační frekvence, u které jsem zaznamenal nové frekvenční složky, byla 4 Hz (pro nosnou 220 Hz). Pro ostatní nosné frekvence se práh pohyboval kolem 5 Hz. U nosné frekvence 880 Hz práh stoupal na 9 Hz. Proto jsem ověřil také další vyšší nosné. U nosné 1760 Hz se nové složky objevily při modulační frekvenci 10 Hz. Můžeme vyvozovat, že nové frekvenční složky se zřejmě objevují u nižších nosných dříve (při nižší modulační frekvenci), než u vysokých nosných. To je zřejmě dán exponenciálním růstem frekvencí. Pokud je nosná frekvence nízká, vytvoří i malá vzdálenost součtové a rozdílové složky značný interval souzvuku. U vyšších frekvencí je k tomu zapotřebí větší vzdálenost frekvenčních složek, tedy vyšší modulační frekvence.

Z naměřených dat jsem sestavil graf. Na svislé ose je modulační frekvence a na vodorovné ose je nosná frekvence.



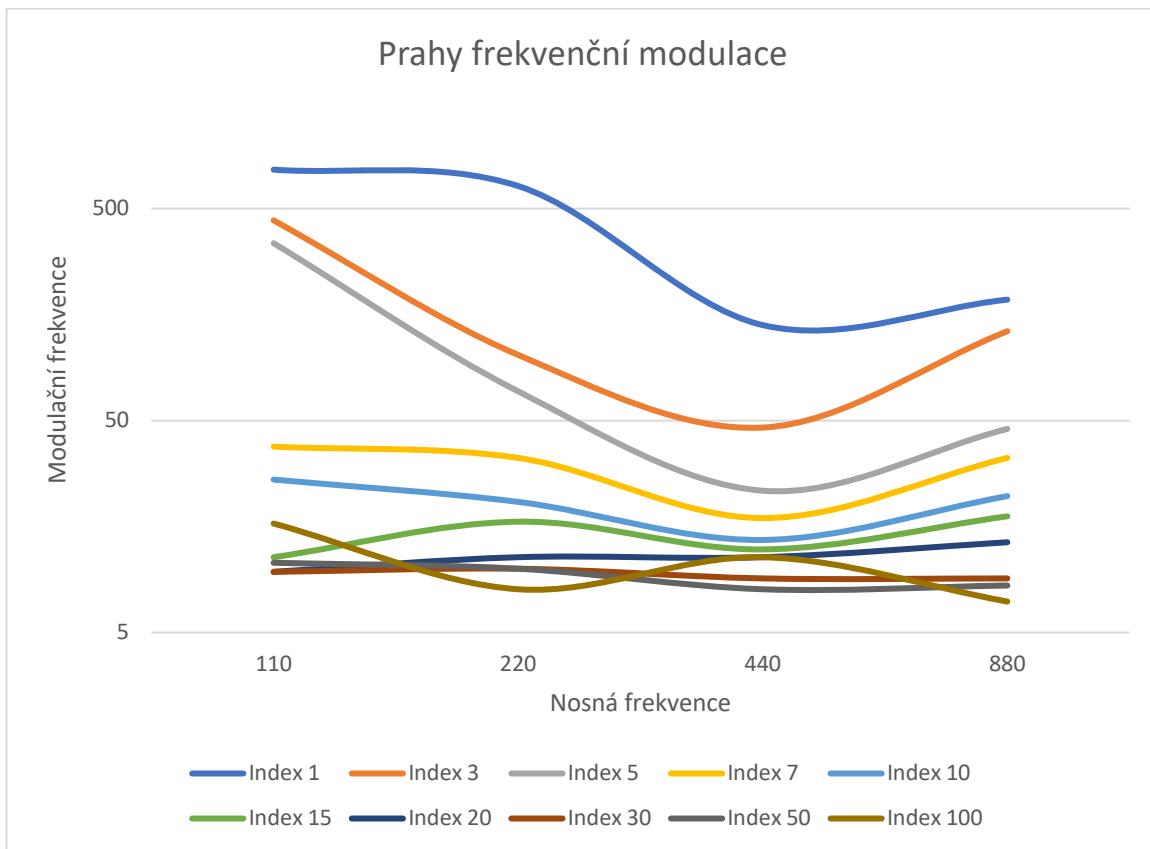
U amplitudové modulace jsem již využíval různých modulačních indexů. Začal jsem s desetinovou hloubkou modulace, tedy s modulačním indexem 0,1. U tohoto indexu vyžadovala identifikace nových složek na nižších nosných vyšší modulační frekvence. S indexem 0,2 a vyššími již byla identifikace nových složek pro nízké nosné mnohem jednodušší. Prahy s rostoucím modulačním indexem klesaly, k identifikaci nových složek tedy stačila nižší modulační frekvence.



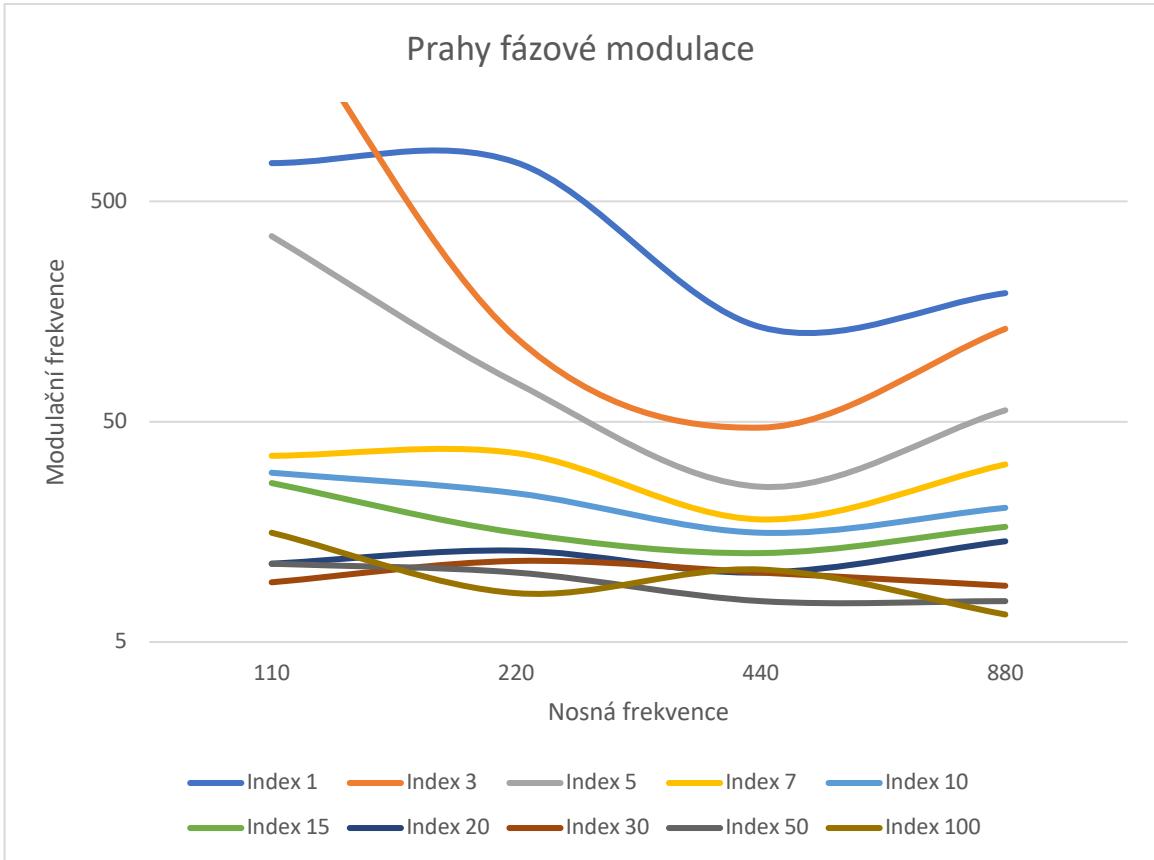
12.2.2 Frekvenční a fázová modulace

Ačkoliv je produktem frekvenční i fázové modulace stejné spektrum (což vychází ze stejných rovnic), rozhodl jsem se provést experiment pro každou modulaci zvlášť a naměřené hodnoty následně porovnat.

Experiment jsem začal s nízkou hloubkou modulace. Zde bylo poměrně obtížné identifikovat nové složky. Mnohem dříve (s nižší modulační frekvencí) šly identifikovat produkty modulace na vyšších nosných. Při modulačním indexu 7 se prah slyšitelnosti nových složek víceméně vyrovnal a další prahy s rostoucím indexem klesaly. Změna nastala až u modulačního indexu 100, pro který se opět ztížila identifikace nových složek na nízkých nosných, a naopak zjednodušila na vysokých.



Experiment s fázovou modulací probíhal zcela stejně a také naměřená data byla velmi podobná:



12.3 Závislost modulační frekvence na modulačním indexu

Experiment jsem zopakoval také pro mírně odlišné zadání. Pro referenční nosnou vlnu 1 kHz jsem měřil závislost modulační frekvence na modulačním indexu.

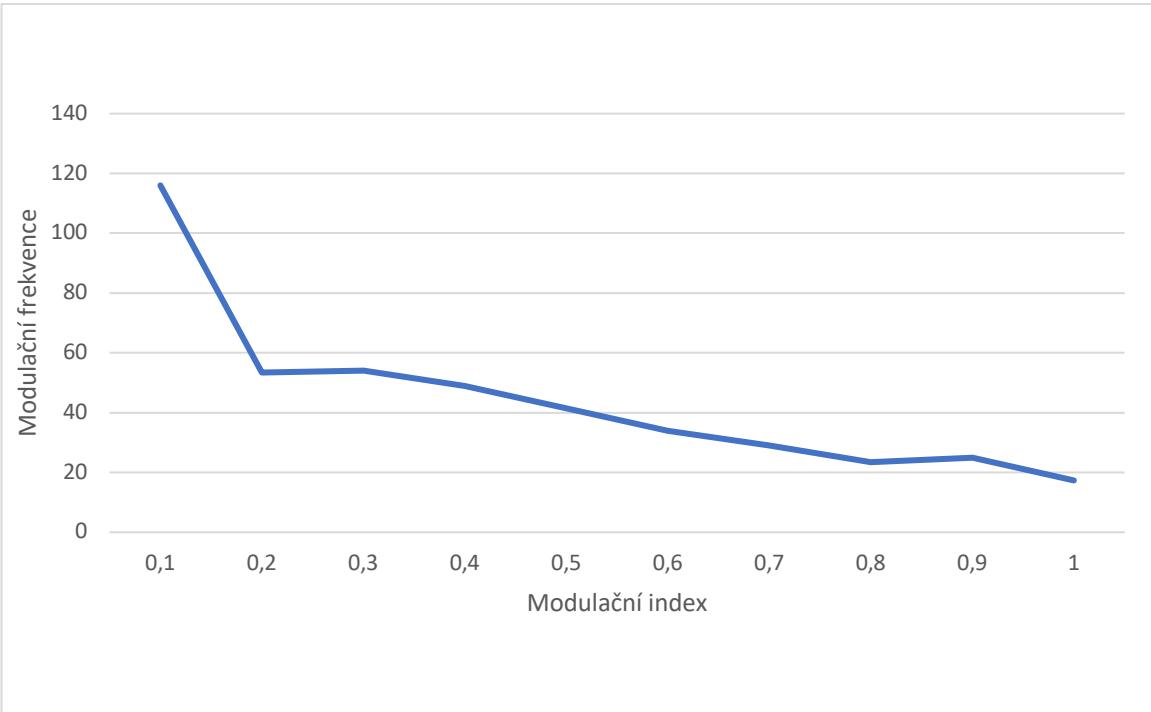
Experiment probíhal tak, že jsem u příslušné modulace nastavil modulační index.

Následně jsem pomocí sweepu modulační frekvence identifikoval práh vzniku nových frekvenčních složek. Mezní frekvence sweepu jsem opět nastavoval dle potřeby.

Tento proces jsem opakoval pro dostatečné množství modulačních indexů. Tabulka naměřených hodnot je v příloze 2 (str. 71).

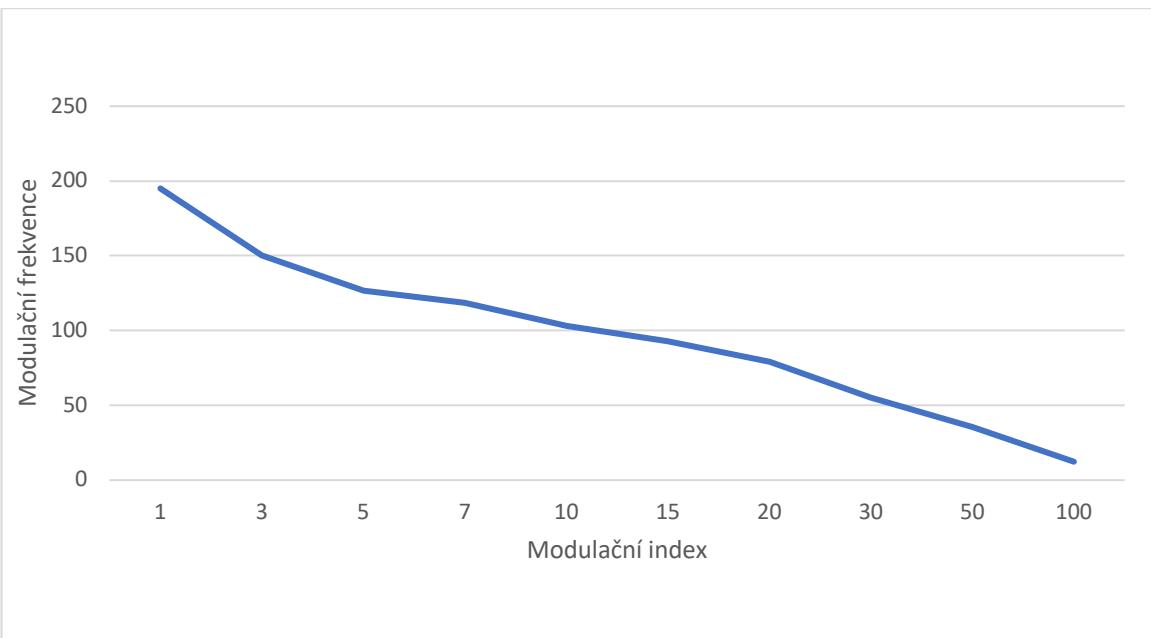
12.3.1 Amplitudová modulace

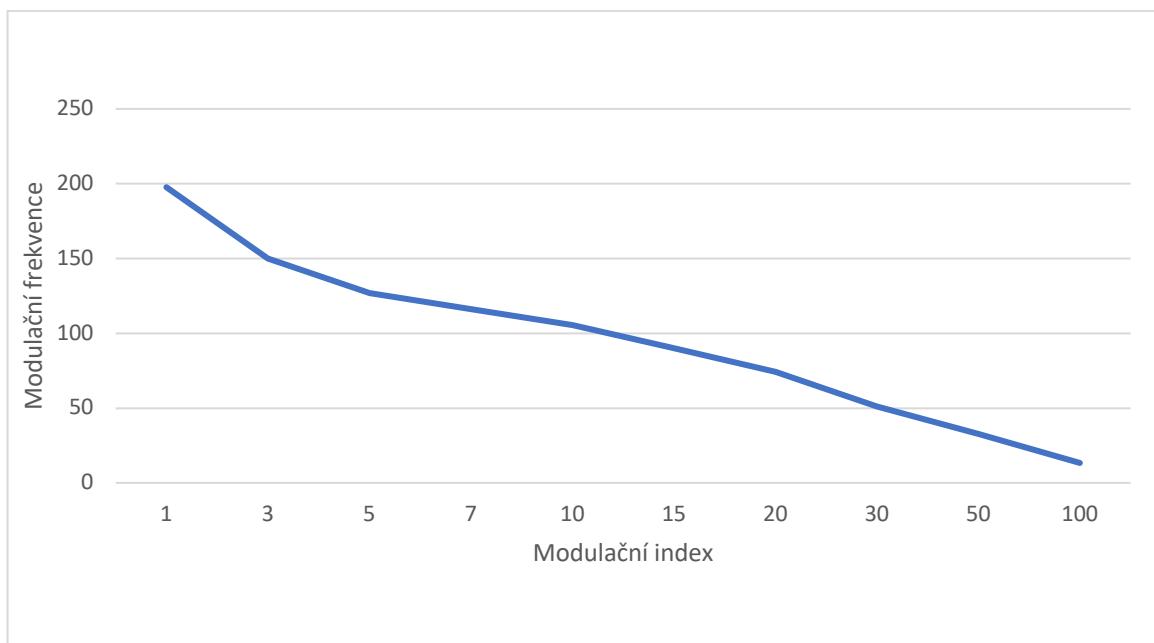
S rostoucím modulačním indexem se objevují nové frekvenční složky dříve, tedy s nižší modulační frekvencí. Takto vypadá graf závislosti modulační frekvence na modulačním indexu pro referenční tón o frekvenci 1 kHz. S rostoucím indexem klesá modulační frekvence nutná pro identifikaci nových složek.



12.3.2 Frekvenční a fázová modulace

Také u frekvenční a fázové modulace se nové frekvenční složky s rostoucím modulačním indexem objevují dříve. Grafy naměřených hodnot se víceméně shodují:





13 Závěr

V předchozích kapitolách byly popsány jednotlivé metody syntézy zvuku a principy modulace zvukového signálu. Bylo popsáno, jakým způsobem se mění výsledná barva zvuku s různými metodami modulace. Také jak různých modulací docílit.

Dvanáctá kapitola hledala hranici mezi generováním nového zvuku a zpracováním signálu pomocí modulace, tedy syntézou a efektem. Pomocí experimentu jsem zjistil, že tato hranice je velmi tenká. Nejen že se liší s každou metodou modulace, ale také ji ovlivňuje celá řada parametrů, jako nosná a modulační frekvence či modulační index. Myslím, že právě proto je modulace v hudebním zvuku tak mocná a v některých případech také nepředvídatelná. Modulace může zvuku dodat živost, lesk či určitý pohyb. Může ale také původní signál deformovat zcela k nepoznání.

Seznam použité literatury

- 1) BENEŠ, Filip. Úvod do problematiky zpracování signálu ve vysílacím řetězci: se zaměřením na dynamické úpravy hudební stereo nahrávky. Praha, 2017. Bakalářská práce. AMU. Vedoucí práce doc. Tomáš Zikmund.
- 2) Bessel Function. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bessel_function
- 3) BROWN, Griffin. Understanding Chorus, Flangers, and Phasers in Audio Production. *IZotope* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.izotope.com/en/learn/understanding-chorus-flangers-and-phasers-in-audio-production.html>
- 4) Coding FM Synthesis Algorithms. *SuperCollider* [online]. 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://scsynth.org/t/coding-fm-synthesis-algorithms/1381>
- 5) CORMAN, Emmet. Simple Synthesis: Part 7, Oscillator Sync. *Keith McMillen Instruments* [online]. 2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: www.keithmcmillen.com/blog/simple-synthesis-part-7-oscillator-sync/
- 6) CURTIN, Joseph. Gabriel Weinreich and Directional Tone Color. *The Strad* [online]. 2000 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20141229211555/http://josephcurtinstudios.com/article/the-violin-finally-speaks/>
- 7) GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.
- 8) GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.
- 9) CHOWNING, John – BRISTOW, David. *FM Theory and Applications: By Musicians for Musicians*. Tokyo: Yamaha Music Foundation, 1986. ISBN 4-636-17482-8 COO73.
- 10) Leslie speaker. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Leslie_speaker
- 11) MANTIONE, Philip. The Fundamentals of Phase Distortion Synthesis. *Pro Audio Files* [online]. 2019 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://theproaudiofiles.com/phase-distortion-synthesis/>
- 12) MOZART, Leopold. *A Treatise on the Fundamental Principles of Violin Playing*. 2. Přeložila Editha Koncker. Oxford: Oxford Press, 1951. ISBN 0-19-318513-X.
- 13) Oscillator sync. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Oscillator_sync
- 14) PETRÁČKOVÁ, Věra – KRAUS, Jiří. *Akademický slovník cizích slov: [A-Ž]*. Praha: Academia, 1997. ISBN 80-200-0607-9.
- 15) Příčné vlnění. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%AD%C4%8Dn%C3%A9_vln%C4%9Bn%C3%AD
- 16) PUCKETTE, Miller. *The Theory and Technique of Electronic Music* [online]. World Scientific Publishing Co. Pte., 2007 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://msp.ucsd.edu/techniques/latest/book-html/node3.html>
- 17) REID, Gordon. Synthesizing Bells. *Sound on Sound* [online]. 2002 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/techniques/synthesizing-bells>
- 18) Ring Modulation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ring_modulation
- 19) Rozhlas. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozhlas>
- 20) RUSS, Martin. *Sound Synthesis and Sampling*. Third edition. USA: Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52105-3.
- 21) SCHLESKE, Martin. *The Psychoacoustic Secret of Vibrato*. Martin Schleske [online]. Landsberg am Lech [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.schleske.de/en/research/handbook-violinacoustics/vibrato-of-the-musician.html>
- 22) SIEGEL, Rudolf – TUSCHER, Vladimír. *Kmitočtová modulace*. I. vydání. Praha: Naše vojsko, 1956
- 23) SUCHÁNEK, Tomáš. Analýza spektra klarinetů od různých výrobců. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

- 24) SYROVÝ, Václav – GUŠTAR, Milan. *Malý slovník základních pojmu z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 2. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2012. ISBN 978-80-7331-237-4.
- 25) SYROVÝ, Václav. Analýza a syntéza hudebního signálu. *Hudební nástroje: časopis pro výzkum, vývoj, výrobu a užití hudebních nástrojů*. Hradec Králové: Československé hudební nástroje, 1964-1991, 1986(4), 127-130.
- 26) SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie muzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.
- 27) SYROVÝ, Václav. *Hudební signál a jeho syntéza* [online]. s. 169 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.ziva-hudba.info/files/2014/04/140403201437_pdf_0.pdf
- 28) SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby*. V Praze: Akademie muzických umění, 2009. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN isbn978-80-7331-161-2.
- 29) TROSZOK, Daniel. Zvuková syntéza. Muzikus: magazín pro muzikanty. 2008, 2008(6), 46-58. ISSN 1210-1443.
- 30) VACHALA, Vladimír. Technika amplitudové modulace s jedním postranním pásmem. Praha: SNTL, 1983.
- 31) Vibrato Wars. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrato#Vibrato_wars

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot 1

Tabulka naměřených hodnot, které ukazují závislost modulační frekvence na nosné.

AM				
Nosná frekvence: 110Hz				Nosná frekvence: 220Hz
Modulační frekvence (Hz)			Modulační index	Modulační frekvence (Hz)
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Měření 1
90	95	99	94,666666667	0,1
34	31	27	30,666666667	0,2
15	13	18	15,333333333	0,3
11	9	19	13	0,4
10	9	9	9,333333333	0,5
8	9	9	8,666666667	0,6
7	8	9	8	0,7
7	8	6	7	0,8
7	6	7	6,666666667	0,9
8	8	6	7,333333333	1
Nosná frekvence: 440Hz			Nosná frekvence: 880Hz	
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
30	35	37	34	0,1
19	24	22	21,666666667	0,2
22	20	19	20,333333333	0,3
19	20	21	20	0,4
15	18	16	16,333333333	0,5
16	14	13	14,333333333	0,6
11	13	13	12,333333333	0,7
10	9	11	10	0,8
9	10	9	9,333333333	0,9
8	9	9	8,666666667	1
FM				
Nosná frekvence: 110Hz				Nosná frekvence: 220Hz
Modulační frekvence (Hz)			Modulační index	Modulační frekvence (Hz)
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Měření 1
750	761	779	763,3333333	1
450	425	445	440	3
350	347	333	343,3333333	5
35	38	40	37,666666667	7
28	24	27	26,333333333	10
13	10	11	11,333333333	15
10	9	10	9,666666667	20
8	12	9	9,666666667	30
13	10	9	10,666666667	50
15	16	18	16,333333333	100
Nosná frekvence: 440Hz			Nosná frekvence: 880Hz	
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
150	130	143	141	1
45	51	43	46,333333333	3
27	25	18	23,333333333	5
16	17	19	17,333333333	7
14	14	13	13,666666667	10
12	12	13	12,333333333	15
11	12	11	11,333333333	20
9	10	8	9	30
8	8	8	8	50
11	12	11	11,333333333	100
PM				
Nosná frekvence: 110Hz				Nosná frekvence: 220Hz
Modulační frekvence (Hz)			Modulační index	Modulační frekvence (Hz)
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Měření 1
740	750	747	745,6666667	1
450	443	439	444	3
355	348	340	347,6666667	5
33	36	36	35	7
30	29	29	29,333333333	10
28	25	26	26,333333333	15
10	11	13	11,333333333	20
9	9	10	9,333333333	30
10	11	13	11,333333333	50
14	17	16	15,666666667	100
Nosná frekvence: 440Hz			Nosná frekvence: 880Hz	
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
130	135	138	134,3333333	1
50	47	44	47	3
25	26	25	25,333333333	5
18	19	17	18	7
15	16	16	15,666666667	10
14	13	11	12,666666667	15
11	10	10	10,333333333	20
11	12	8	10,333333333	30
8	7	8	7,666666667	50
10	10	12	10,666666667	100

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot 2

Tabulka naměřených hodnot, které ukazují závislost modulační frekvence na modulačním indexu:

AM				
Modulační frekvence (Hz)				Nosná frekvence: 1kHz
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
120	115	113	116	0,1
50	52	58	53,33333333	0,2
49	55	58	54	0,3
46	52	49	49	0,4
39	42	43	41,33333333	0,5
31	35	36	34	0,6
29	32	26	29	0,7
20	25	25	23,33333333	0,8
25	26	24	25	0,9
17	18	17	17,33333333	1
FM				
Modulační frekvence (Hz)				Nosná frekvence: 1kHz
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
196	198	191	195	1
154	150	147	150,33333333	3
130	129	121	126,6666667	5
120	115	120	118,33333333	7
104	103	103	103,33333333	10
90	92	96	92,66666667	15
81	79	78	79,33333333	20
51	55	59	55	30
34	36	37	35,66666667	50
14	12	11	12,33333333	100
PM				
Modulační frekvence (Hz)				Nosná frekvence: 1kHz
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Modulační index
200	197	196	197,6666667	1
149	152	149	150	3
127	126	128	127	5
116	116	116	116	7
109	105	103	105,6666667	10
92	88	90	90	15
78	74	71	74,33333333	20
51	53	49	51	30
34	31	33	32,66666667	50
15	12	13	13,33333333	100