

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**

**Pedagogická fakulta**

**Katedra fyziky**

Metody syntézy zvuků pomocí systému Clavia Nord Modular

**Bakalářská práce**

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý

Autor: Tomáš Kubát

Anotace:

Cílem práce je naprogramování sady modelů syntezátorů a zvukových programů ve virtuálním modulárním systému Clavia Nord Modular. Teoretická část obsahuje seznámení s problematikou syntezátorů a konceptem systému Clavia Nord Modular, část praktická pak realizaci modelů syntezátorů pomocí základních metod syntézy zvuku.

Anotation:

The objective of my work is programming the synthesizer models and sound programs with Clavia Nord Modular system. The theoretical part includes introducing to synthesizers and The Clavia Nord Modular concept. Practical part includes the realisation of synthesizer models based on the basic sound synthesis methods.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českém Krumlově, dne 20. prosince 2010

Tomáš Kubát

Rád bych poděkoval Ing. Michalu Šerému za jeho pomoc, odborné rady a vedení při zpracování této bakalářské práce.

## Obsah

### **Teoretická část:**

1. Úvod do syntezátorů strana 6
2. Základní pojmy a principy syntezátorů strana 10
3. Základy MIDI komunikace strana 12
4. Koncept Nord Modularu strana 14

### **Praktická část:**

5. Additivní syntezátor strana 19
6. FM syntezátor strana 31
7. Subtraktivní syntezátor strana 44
8. Model rotace zdroje zvuku strana 61
  
9. Zhodnocení a závěr strana 67
  
- Seznam použité literatury a zdrojů strana 69
  
- Příloha 1 - Použité komponenty strana 71
  
- Příloha 2 - CD ROM obsahující programy modelů syntezátorů

# 1 Úvod do syntezátorů

## Úvod

Denně slyšíme ze všech koutů, z rádií, televize i jiných médií spoustu moderní hudby. Rozpoznáváme zpěv, dále hudební nástroje jako například kytaru, saxofon, klavír, housle, bicí, baskytaru a další, ale mezi nimi často zaznívá i mnoho zvuků a nástrojů, které již popsat nedokážeme, umělých. A právě způsobu vzniku těchto umělých, zvaných též syntetických hudebních nástrojů je věnována má práce. Všeobecně celou tuto skupinu hudebních nástrojů nazýváme elektronickými hudebními nástroji, ale pro přístroj, vyrábějící umělé zvuky se v praxi více vžil pojem syntezátor. Pro realizaci své práce naprogramování sady syntetických zvuků jsem si vybral poněkud specifický a ne příliš běžný systém firmy Clavia, Nord Modular. Jedná se o virtualizovaný modulární syntezátorový systém, u kterého budujeme stavbu samotného syntezátoru z dílčích bloků, a proto nám umožní vybudování modelů založených na různých typech syntéz a dokonce se na něm pokusíme napodobit stavbu několika klasických syntezátorů.

## Co je to syntezátor

*Syntezátor nebo syntetizér, řidčeji syntetizátor, je elektronický hudební nástroj, který tvoří výsledný zvuk syntézou. Označení syntéza použil poprvé Thaddeus Cahill při popisu přístroje pro vytváření zvuků kombinací harmonických složek ve svém patentu na „Zařízení pro elektrické generování hudby“ který podal v roce 1895. [1]*

Původním účelem a funkcí syntezátorů bylo napodobovat chování zvuku skutečných hudebních nástrojů. Jedná se tedy o syntézu zvuku, odtud pojem syntezátor. Syntezátory jsou schopné produkovat rozmanité zvuky generováním a kombinováním (směšováním) signálů různých frekvencí. Syntezátory vytváří spojitě elektrické signály lidským uchem slyšitelných spekter, které jsou následně reprodukovány.

Představíme-li si syntezátor, jakožto emulátor hudebního nástroje, musí sestávat z několika částí. Části vstupní, která bude schopna analyzovat hudebníkovu hru a převádět jí do řeči elektrických řídicích signálů. Dále z části samostatného syntezátoru, který bude emulovat zvukový signál, napodobující hudební nástroj a z části třetí, která tento signál převede do akustické formy. Touto třetí částí bývá reproduktor, který ovšem většinou není součástí syntezátoru. Jeho výstupem pak zůstává analogový audiosignál. Co se vstupní části týče, musí být schopna analyzovat hudebníkovu hru a transformovat ji do podoby řídicích signálů pro tónový generátor syntezátoru. Nejčastěji se používá klaviatura. Syntezátory tedy můžeme označit jako elektronické klávesové

nástroje, byť této definici nemusí vždy odpovídat.

### **Rozdělení syntezátorů**

Podle způsobu syntézy zvuku bych současné elektronické hudební nástroje rozdělil do tří základních kategorií:

1) Syntezátory, jejichž základem jsou oscilátory, generující jednoduché audiosignály tvarů jako například sinusoida, obdélník, pila, trojúhelník, popřípadě šum, jejichž kombinacemi a následným procesováním simulujeme chování zvuku hudebního nástroje. Na tomto principu pracovala většina klasických analogových syntezátorů, avšak i řada novějších, digitálních nástrojů.

2) Syntezátory, jejichž základem jsou digitalizované audio vzorky skutečných hudebních nástrojů, či jiných zdrojů zvuku. Využívá se zde převodu signálu A/D převodníky. Syntezátory založené na tomto principu nazýváme samplery a romplery, podle toho, zda jsou digitalizované vzorky pevně uložené v ROM paměti syntezátoru, nebo se nahrávají do RWM paměti. Ty většinou umožňují i tzv. "samplerování", to jest nahrávání vlastních vzorků z externího audio vstupu do paměti.

3) Syntezátory, založené na matematickém modelování chování hudebního nástroje. Rozdíl od všech ostatních typů syntéz je zde v tom, že nás nezajímá chování zvuku nástroje, ale vlastnosti a chování nástroje samotného. Například při emulování zvuku struny se emuluje chování a chvění samotné struny a způsob, jakým rozechvívá vzduch. Vše je dosaženo matematickými modely, které se v reálném čase počítají v procesorech, optimalizovaných pro tento účel, nazývanými DSP - Digital Signal Processor. Tento způsob syntézy zvuku není doposud příliš rozšířen, poprvé ji představila firma Yamaha roku 1994 v syntezátoru VL1.

## **Stručný vývoj syntezátorů**

Rozsah této práce bohužel neumožňuje se dopodrobna zabývat historií a vývojem syntezátorů. Jejich původním účelem, jak jsem již řekl, bylo napodobování zvuku skutečných hudebních nástrojů. K tomuto účelu nebyly staré analogové syntezátory příliš vhodné. Optimální řešení přinesla až technologie samplování. Analogové nástroje však pomohly k objevu něčeho nového. Pomocí syntézy lze totiž vytvářet zvuky nových zvukových barev, nástrojů, které ve skutečnosti nikdy neexistovaly a nikdy existovat nebudou. Ty pak daly vzniknout celému odvětvím syntezátorové a tzv. "elektronické" hudby. V osmdesátých letech, po boomu digitálních technologií, se začaly staré analogové syntezátory postupně vytrácet. Byly příliš drahé, velké, neohrabané, práce s nimi nebyla příliš praktická, analogové obvody byly poruchovější, citlivější na vlivy vnějšího prostředí, chyběla možnost ukládat nastavení barvy zvuku do paměti atd. Jak už to ovšem bývá, během devadesátých let dvacátého století začal být opět hlad po typickém zvuku starých analogových nástrojů, který je natolik specifický, že jej novější digitální přístroje nebyly schopny napodobit. Vystal problém, kterak zkombinovat dobré vlastnosti novějších digitálních přístrojů a charakteristický zvuk starých, tzv. "dinosaurů" jak se původním analogům přezdívalo. Řešení nabídl rychlý vývoj mikroprocesorů a jejich neustále vzrůstající výkon. Umožnil totiž realizaci virtuálního matematického modelu analogového syntezátoru. Princip spočívá v tom, že mikroprocesor typu DSP emuluje v reálném čase chování analogových obvodů starých syntezátorů. Výstupem je digitální zápis zvukového signálu, podobný záznamu na zvukovém nosiči CD, který je následně D/A převodníkem zkonvertován na audiosignál, obdobně, jako při přehrávání CD disku v audiopřehrávači. Pro tento typ syntezátorů se vžilo označení "virtuální analogy" a staly se hitem druhé poloviny devadesátých let dvacátého století.

### **Architektura syntezátorů a vznik systému Nord Modular**

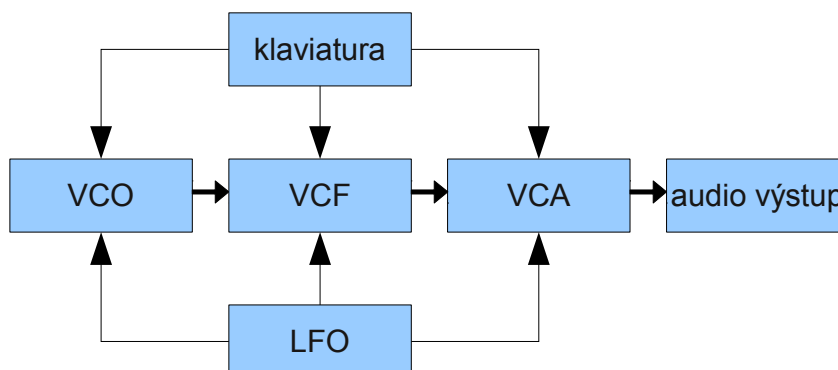
Zde si ovšem musíme říci ještě něco o rozdělení syntezátorů z hlediska jejich architektury. Většina elektronických hudebních nástrojů má pevnou architekturu. Jednotlivé moduly, ať už analogové, či digitální jsou sestaveny v pevném schématu zapojení a výslednou barvu zvuku, tj. to, co nazýváme programováním syntezátoru, lze provádět pouze změnou parametrů řídicích signálů dílčích obvodů. Nemůžeme však měnit zapojení, typ syntézy atd. Tyto syntezátory jsou zpravidla lépe programovatelné, snadnější na ovládání, jejich princip pochopitelnější, ovšem rozmanitost zvukových barev z nich vycházejících je touto svázanou architekturou značně omezena. Jinak řečeno, nejsou natolik kreativní. Oproti tomu již v době starých, analogových dinosaurů, začaly vznikat tzv. modulární systémy. Princip spočíval v tom, že jednotlivé moduly syntezátoru spolu nebyly pevně propojeny. Schéma jejich zapojení bylo



variabilní. Takovéto systémy sestávaly z matrice s řadou zdířek, které se propojovaly kabely. Vše bylo ještě větší, méně praktické a dražší. To byla cena za modularitu systému. V době velikého boomu virtuálních analogových systémů v druhé polovině devadesátých let přišla švédská firma Clavia, která stála u zrodu prvního virtuálního analogu, rovněž s myšlenkou udělat virtuální modulární systém. Na svět přišel roku 1997 pod označením Nord Modular. Jednalo se virtuální analog, v jehož DSP jsou předprogramovány jednotlivé moduly, ovšem jejich výsledné schéma a zapojení zůstává ponecháno na uživateli.

## 2 Základní pojmy a principy syntezátorů

Způsob, jakým v syntezátoru vzniká tón, bude nejlepší vysvětlit na jednoduchém blokovém schématu analogového subtraktivního syntezátoru.



Obrázek 2.1: Zjednodušené blokové schéma subtraktivního syntezátoru

VCO, neboli Voltage Controlled Oscillator je základem celého syntezátoru. Je to oscilátor, nebo blok oscilátorů, generující tón některého základních tvarů signálu o frekvenci dané řídicím napětím, přicházejícím z klaviatury syntezátoru. VCF, Voltage Controlled Filter je frekvenční filtr, zpravidla typu dolní propust se zvýraznitelnou rezonanční frekvencí, kterým signál z oscilátoru můžeme upravovat. Dalším velmi důležitým prvkem je VCA, Voltage Controlled Ampfilter, neboli dynamický zesilovač s generátorem hlasitostní obálky. Z klaviatury je do něj vyslán řídicí signál v okamžiku stisku klávesy. Ten dává zesilovači povel, aby otevřel průchod signálu z VCO a VCF na audio výstup syntezátoru. Při uvolnění klávesy je vyslán řídicí signál uzavření průchodu signálu. Dynamika zesilování a ztlumování je řízena tzv. hlasitostní obálkou, která je popsána v příloze 1. LFO, Low Frequency Oscillator, nízkofrekvenční oscilátor je používán pro docilování různých efektů. Použijeme-li například LFO signál k řízení jemného rozlaďování oscilátoru VCO, dosáhneme tím efektu vibráta.

Vibráto je definováno jako periodická změna frekvence tónu obvykle v rozmezí 4 – 7 Hz. Řídíme-li podobným způsobem jemnou změnu amplitudy signálu přivedením výstupu LFO do VCA, dosáhneme hudebního efektu tremola.

Tremolo tedy definujeme jako periodickou změnu amplitudy signálu nástroje ve frekvenčním rozmezí obdobným, jako u vibráta.

Každý hudební nástroj je schopen vydávat tón. Nějaký pouze jeden tón v jednom okamžiku, jako například trubka, atd. Takové nástroje nazýváme monofonní. Jiné nástroje, jako například klavír, jsou schopny vydávat více tónů zároveň. Ty nazýváme nástroji polyfonními. Klavír je schopen, čistě teoreticky, při zmáčknutí všech osmdesáti osmi kláves zároveň, zahrát všech osmdesát osm tónů v jednom okamžiku. Zde se dostáváme k odvěkému problému všech syntezátorů. Vždy bylo velmi náročné vyrobit syntezátor, který by dokázal zahrát dostatečné množství tónů najednou. Řada starých analogových dinosaurů byla pouze monofonních. S rozvojem digitálních nástrojů došlo k expanzi i v této oblasti, ale s příchodem virtuálního modelování zvuku začal polyfonii opět omezovat limitovaný výkon DSP procesorů. Schopnost syntezátoru přehrávat více tónů zároveň tedy nazýváme polyfonií a její jednotku jeden hlas. Řekneme-li o syntezátoru, že je osmihlasý, znamená to, že je schopen generovat osm zároveň stisknutých tónů na klavíru. Při stisku tónu devátého pak bude záležet na nastavení priority DVA, Dynamic Voice Assign, neboli dynamického přiřazování hlasů. Například při nastavení priority posledního stisknutého tónu po stlačení deváté klávesy bude hlas odebrán tónu, který byl z osmi předchozích stisknut jako první a přidělen deváté klávese. Hlasové omezení syntezátoru pak bude sluchově nejméně patrné.

Skupinu hodnot parametrů, nastavujících chování syntezátoru a určujících barvu zvuku, který bude generovat, nazýváme nejčastěji zvukovým programem. U novějších syntezátorů bylo možno ukládat zvukové programy do paměti, starší, čistě analogové syntezátory tuto možnost neměly a barva zvuku byla nastavována analogovými ovládacími prvky přímo na panelu syntezátoru.

Timbre v terminologii syntezátorů označuje zabarvení zvuku, které je zde definováno zvukovým programem tak, aby výsledná barva zvuku dosáhla námi požadované formy. Laicky řečeno, jeden program můžeme označit za klavír, jiný za housle a jiný za trubku, podle toho, jaké výsledné formy má dosahovat a jaký nástroj napodobovat.

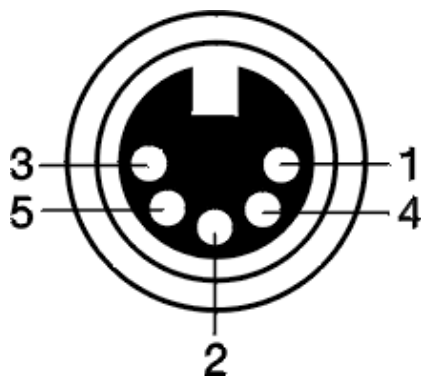
Syntezátory můžeme z hlediska schopnosti přehrávat více zvukových programů, tedy barev, paralelně rozdělit na monotimbrální a multitimbrální. Multitimbrální tedy označujeme schopnost syntezátoru přehrávat více různých programů syntezátoru zároveň, laicky řečeno, že bude hrát trubka zároveň s klavírem i houslemi. Samozřejmě, takovou vlastnost nemůže mít syntezátor monofonní.

### 3 Základy MIDI komunikace

Rozvoj elektronických hudebních nástrojů přinesl potřebu komunikace mezi nimi, možnost ovládat tónový generátor syntezátoru externí klaviaturou, sekvencerem a podobně. Během sedmdesátých let dvacátého století používaly syntezátory řídicí analogové systémy s použitím signálů CV Trig/Gate. Control voltage bylo kontrolní napětí, jehož hodnota udávala výšku tónu stisknutého na klaviatuře a bylo řídicím prvkem oscilátorů syntezátoru. Signály Trig/Gate dávaly generátoru hlasitostní obálky informaci o stisknutí, době držení a uvolnění klávesy. Bohužel řídicí systémy různých firem mezi sebou nebyly kompatibilní. [2]

Začátkem osmdesátých let začali zástupci tehdy nejvýznamnějších výrobců elektronických hudebních nástrojů, firem Sequential Circuits Inc., Oberheim a Roland pracovat na návrhu univerzálního rozhraní. Finální verze specifikace univerzálního komunikačního rozhraní elektronických hudebních nástrojů spatřila světlo světa 5. srpna 1983 a nesla název MIDI - Musical Instruments Digital Interface. [2]

Jak již z názvu vyplývá, jedná se již o digitální rozhraní. MIDI je ve své podstatě sériový jednosměrný komunikační protokol, postavený na bázi sériového rozhraní RS-232. Jako interface byl zvolen konektor typu DIN5, v Čechách známý pod lidovým označením pětikolík. MIDI signál je veden piny 4 a 5, stínění by mělo být zapojeno vždy pouze na jedné straně kabelu a vedeno do pinu 2. [2]



Obrázek 3.1: konektor typu DIN 5 [3]

Co se specifikace protokolu samotného týče, zmíním se zde pouze o nejdůležitějších typech po MIDI přenášených událostí:

**Note On**, neboli zapni notu dává syntezátoru povel, aby jeho tónový generátor zahrál tón. Skládá se z informací o výšce tónu, hodnota 0-127 odpovídající vždy dané notě klaviatury, a z informace o síle, se kterou byla klávesa stisknuta. Tuto informaci nazýváme Velocita a může

nabývat rovněž hodnot 0-127. Po přijetí události Note On syntezátor generuje daný tón až do přijetí události **Note Off**, nesoucí informaci výšce o tónu uvolněné klávesy, která generování tónu vypíná, respektive dává povel generátoru hlasitostní obálky, aby přešel do fáze Release, neboli uvolnění. Dalším důležitým parametrem je **Program Change**. Tento povel přepne nastavení programu syntezátoru, nastaveném v jeho paměti, aby mohl začít hrát jinou zvukovou barvu. Lidově takové události říkáme změna zvuku. Nabývá hodnot 0-127, není tedy možné přepínat mezi více, než 128 zvukovými programy syntezátoru. Disponuje-li přístroj více než 128 paměťovými pozicemi, musíme si při přepínání zvuků pomoci událostí **Control Change**. Kontrolery, jak jsou přezdívány, jsou události sloužící většinou ke změně parametrů zvukového programu. První parametr kontroleru udává jeho typ 0-127 a druhý hodnotu 0-127. Kupříkladu právě pro změnu bank programů zvuků v syntezátorech se používají kontrolery 0 - Bank Select MSB a 32 - Bank Select LSB. Těmi nastavíme příslušnou banku 128 programů a v ní pak událostí Program Change zvolíme příslušný program. Jiné kontrolery zas můžou udávat určité parametry zvuku, třeba kontroler 7 hlasitost programu. Samozřejmě, že každý syntezátor, respektive jeho program musí umět přijímat signály MIDI kontrolerů. To záleží na specifikaci daného syntezátoru, nebo na nastavení jeho programu. Kupříkladu u Nord Modularu je nutno v každém syntezátorovém bloku řízení MIDI kontrolery nastavit a nemusí se vždy dodržet jejich původní určení. Lze tedy například již zmiňovaný kontroler 7, původně určený pro hlasitost programu použít kupříkladu pro řízení frekvence pásmového filtru. [2]

Událost **Pitch Bend** je ovládána kolečkem pro ohýbání tónu, kterým bývají vybaveny MIDI klaviatury a předává oscilátorům syntezátoru údaje o relativním rozladění hraných tónů, které se Pitch Bendem řídí. Z dalších událostí možná ještě stojí za zmínku **After Touch**, která vysílá informace o síle, se kterou je stisknutá klávesa držena. Samozřejmě, že takovou informaci vysílají pouze klaviatury, které jsou vybaveny funkcí snímání síly stisku. [2]

MIDI události lze přenášet na šestnácti nezávislých kanálech, pro řízení šestnácti různých programů syntezátoru. [2]

MIDI protokol umožňuje ještě přenášení množství dalších řídicích signálů a dat, pro bližší seznámení s nimi doporučuji studium knihy Daniela Forró MIDI - Komunikace v hudbě, z níž jsem při psaní této kapitoly vycházel. [2]

## 4 Koncept Nord Modularu

Nord Modular je virtuální analogový syntezátor s modulární strukturou. Na trh byl uveden v roce 1997 švédskou firmou Clavia a ve své době se jednalo o naprosto ojedinělý koncept, oslavovaný termíny, jako "snový syntezátor". Jde o hardwarové zařízení, jehož struktura syntezátoru není pevně daná, naprogramovány jsou pouze dílčí bloky, jako například oscilátory, filtry, generátory hlasitostních obálek, ze kterých si uživatel může poskládat a zapojit vlastní model syntezátoru. Vše je ovšem virtualizováno a editace řešena na bázi softwarového editoru. Pod kapotou přístroje se skrývají čtyři DSP procesory Motorola 56303. Dílčí bloky jsou naprogramovány v operačním systému Modularu, samotná editace schémat syntezátorů je možná pouze přes softwarový editor, který je nutno spustit na externím počítači. Komunikace mezi editorem a Modularem probíhá pomocí MIDI rozhraní. Naprogramované syntezátorové modely lze uložit v paměti přístroje, syntezátor je pak schopen fungovat samostatně, bez připojení editoru a rovněž bez něj umožňuje přepínat mezi jednotlivými, v paměti uloženými modely syntezátorů. Naopak editor slouží pouze k ovládní syntezátoru a sám osobě není schopen generovat zvuk. Modular je virtualizovaným syntezátorem, jehož bloky jsou pouze programy, procesování a generování zvuku uvnitř přístroje probíhá pouze na bázi numerických operací a teprv na výstupu se digitální, matematicky vypočítaný signál převádí D/A převodníky na signál analogový. Vnitřní procesování a výpočty probíhají v rozlišení 24 bit a 96 kHz, koncové D/A převodníky jsou 18-bitové, opět na taktovacím kmitočtu 96 kHz. [4]

Nord Modular se vyráběl ve verzi klávesové a verzi bez klaviatury, rackové. Rackovou verzi je nutno připojit na externí řídicí MIDI klaviaturu, nebo sekvencer. Ořezanou, levnější verzi pak byl Nord Micro Modular, obsahující pouze jediný DSP procesor a minimum ovládacích prvků. Nutno si uvědomit, že kolem roku 2000, kdy jsem pořizoval svůj Nord Modular Rack se jeho cena pohybovala kolem padesáti tisíc korun, Micro Modular pak stál dvacet tisíc korun. [4]



*Obrázek 4.1: Pohled na čelní panel rackové verze Nord Modularu*

Na obrázku 4.1 vidíme rackovou verzi Modularu. Na první pohled nás zaujme matrice osmnácti otočných regulátorů. Jejich funkce není pevně definována, každý z nich lze asociovat s vybranou funkcí některého z předprogramovaných syntezátorových bloků. I v tomto ohledu si syntezátor, hoden svého názvu, zachovává koncept modularity.

Důležitým parametrem každého syntezátoru je polyfonie, to jest schopnost vygenerovat, tedy zahrát více tónů současně. Polyfonie Nord Modularu je závislá na složitosti stavby syntezátorového modelu. Každý z předprogramovaných syntezátorových bloků vytěžuje určité procento výkonu DSP jednotky. Celý syntezátorový blok můžeme stavět až do zatížení 100%. V tom okamžiku je vytížená celá jedna DSP. Jak již bylo uvedeno, Modular disponuje čtyřmi DSP procesory, takže v takovém případě je schopen zahrát paralelně čtyři tóny. Polyfonie pak činí 4 hlasy. V případě, že syntezátorový model nezabírá více, než 50% výkonu DSP jednotky, je každá DSP schopna vygenerovat dva tóny současně, celková polyfonie nástroje tedy stoupá na 8 hlasů. A dostaneme-li se při stavbě modelu až pod 25% DSP, polyfonie znovu stoupne dvojnásobně, tedy na 16 hlasů. Pro ty, kterým tato ne příliš vysoká polyfonie nedostačovala nabízela firma Clavia rozšiřující desku, obsahující další čtyři DSP procesory Motorola 56303, čímž se základní polyfonie nástroje rozšířila ze čtyř na osm hlasů. Musíme si ovšem uvědomit, že toto vše platí v případě, že Modular přehrává pouze jeden program současně. Nord Modular ovšem není nástrojem monotimbrálním, je schopen přehrávat paralelně až čtyři zvukové programy. Jejich signál je pak směřován do audio výstupů. V případě nastavení Modularu do módu přehrávání čtyř programů paralelně pak ovšem pro každý syntezátorový program pouze jeden jediný hlas. V případě přehrávání například dvou zvukových barev paralelně je možno mezi ně výkon rozdělit, např. v poměru 1hlas / 3 hlasy. Je však vždy nutno každému programu přiřadit minimálně jednu celou

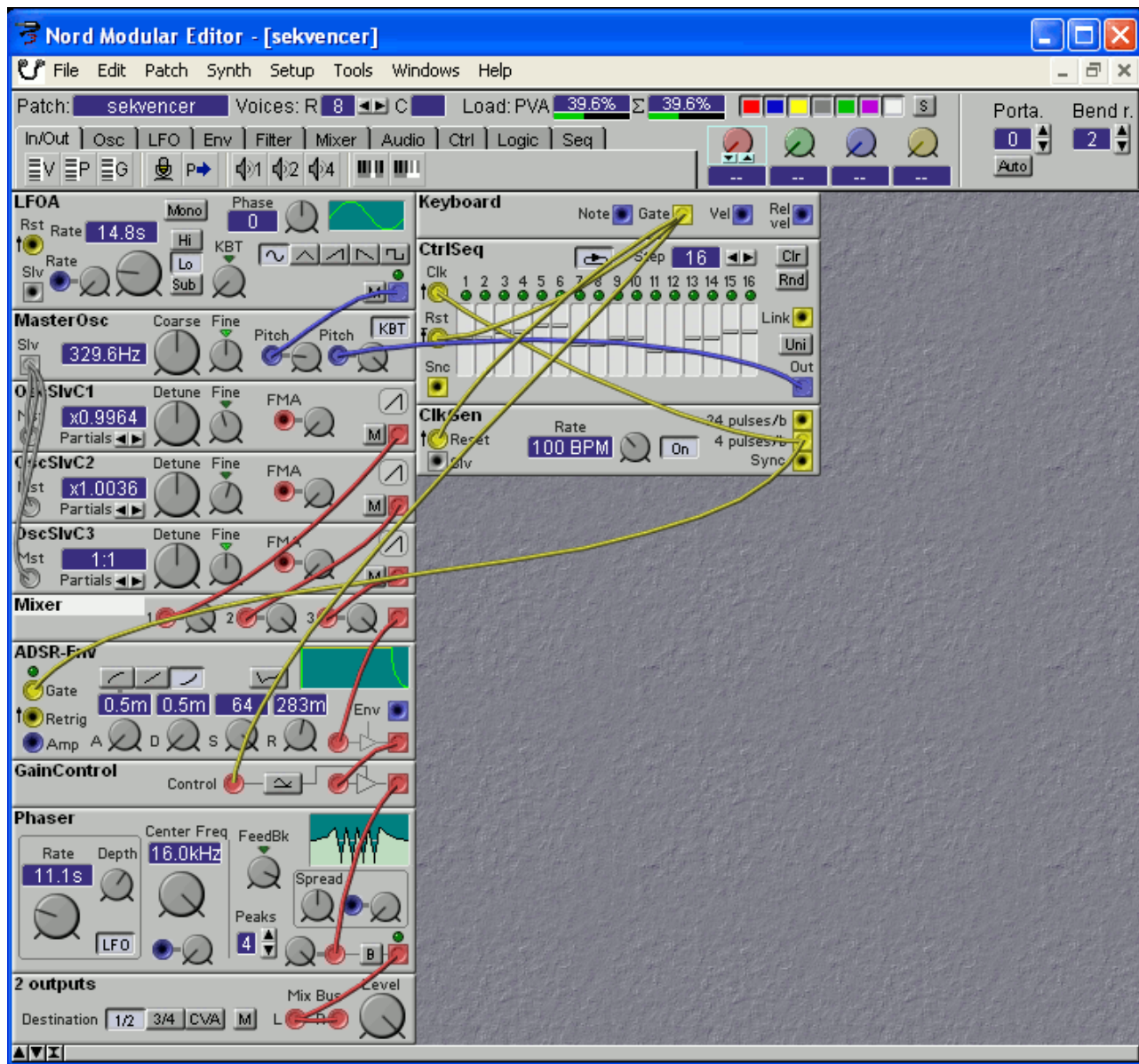
DSP jednotku. Dalo by se říci, že početní výkon Modularu je bohužel poměrně malý. Co se paměťových pozicí pro jednotlivé programy týče, je k dispozici 1000 paměťových míst, skutečná paměťová kapacita je však menší a závisí na složitosti programu. Programů, zabírajících 100% CPU lze uložit pouze 256, programů zabírajících 50% CPU 500 a pouze programů, zabírajících 25% CPU a méně plných 1000. Tyto údaje platí pouze pro operační systém Modularu v.3.x. V operačních systémech v. 2.x a nižších bylo k dispozici pouze 256 pevných paměťových pozic. Ze softwarového editoru lze pak programy ukládat do souborů na pevný disk, či jiná média. [4], [5]



Obrázek 4.2: pohled na zadní panel rackové verze Nord Modularu

Komunikace mezi Modularem a jeho okolím probíhá dvěma MIDI okruhy. MIDI konektory označené PC IN a PC OUT slouží výhradně pro komunikaci syntezátoru s externím softwarovým editorem, konektor MIDI IN pak pro přijímání řídicích MIDI dat z externí klávesnice, nebo sekvenceru. MIDI OUT je pak schopen naopak vysílat řídicí MIDI data z Modularu do externího sekvenceru, či jiného zařízení. K dispozici jsou čtyři audio výstupy, ty, díky modularitě syntezátoru, umožňují mimo jiné i programování zvuků na kvadrofonní bázi. Dále Modular disponuje i stereo audio vstupem, přístroj je totiž schopen procesovat i externí audio signál, používat jej jako modulační, či řídicí zdroj a provádět mnoho experimentů. Dalším výstupem je konektor pro zapojení sluchátek. Ještě zbývá zmínit se o vstupech řídicích Sustain a Control pedálů, které mohou být vhodným doplňkem při hře na klaviaturu. [5]





Obrázek 4.3: Nord Modular editor

Softwarový editor Nord Modular Editor je bezplatně užitelným softwarem, ostatně fakt, že bez Modularu je naprosto nepoužitelný jej činí zcela nezneužitelným. Screenshot na obrázku n.3 ukazuje prostředí editoru s modelem syntezátoru. V horním panelu je možno vidět aktuální dostupnou polyfonii pro daný program a vytížení DSP jednotky aktivním programem, pod těmito údaji se nacházejí záložky s ikonami všech dostupných syntezátorových bloků / modulů, který operační systém Modularu nabízí. Spojení mezi moduly jsou realizovány barevnými drátky, červené představují analogové audio signály, modré analogové řídicí signály, žluté logické řídicí signály a šedé synchronizaci oscilátorů. Nord Modular editor existuje ve verzi pro PC a verzi pro MAC. Alternativou je pak multiplatformní, open source, na Javě postavený editor Nomad. [5]

Na rozdíl od hardwarových analogových modulárních systémů tento systém umožňuje uložení jednotlivých konfigurací do paměti a rychlé přepínání, což u klasických analogových modularů možné nebylo. Clavia byla první, kdo s takovýmto konceptem hardware / software přišla a dosud je jen velmi málo systémů, které by takový koncept využívaly. V současnosti již existuje mnoho čistě softwarových modulárních systémů, koncept hardware / software firmy Clavia však představuje na svou dobu naprosto ojedinělou kombinaci, spojenou s profesionalitou a spolehlivostí celého systému. O oblíbenosti Nord Modularu svědčí i fakt, že se vyráběl v základní verzi od roku 1997 do roku 2003, ve vylepšené verzi Nord Modular G2 pak od roku 2003 až do roku 2009, to jest dohromady, na současný rychle kupředu spějící svět elektroniky neuvěřitelných 12 let. [4]

## 5 Additivní syntežátor

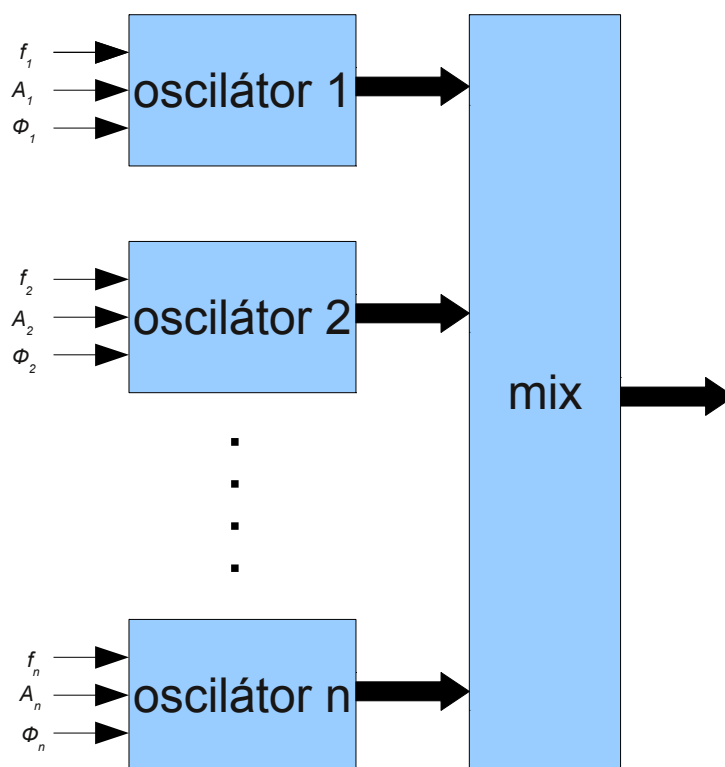
Additivní syntéza vychází z Fourierovy analýzy a pracuje na principu skládání tvaru průběhu výsledného signálu z řady dílčích, jednoduchých průběhů.

### *Fourierova analýza*

*Fourierova analýza (podle fyzika matematika J.B.J.Fouriera 1768-1830) je matematický proces, kterým lze komplexní kmitání rozložit do velkého množství jednotlivých sinusových kmitů a určit tak jednotlivé složky komplexního tónu a nebo kteréhokoliv zvuku. Tento postup umožňuje popsat komplexní kmitání pomocí spektra (řady frekvenčních složek) a dále ho analyzovat, využít a zpracovávat v podobě jednotlivých složek signálu. [6]*

*Fourierova analýza není jen teoretický matematický postup, stejným způsobem totiž pracuje i sluchový systém. Komplexní zvuková vlna vstupuje do ucha a na basilární membráně vnitřního ucha dochází k tomu, že je tato vlna rozkládána do svých jednotlivých frekvenčních komponent. Zatímco matematický postup Fourierovy analýzy umožňuje rozložit komplexní kmitání do teoreticky neomezeného množství složek, frekvenčně-analytické možnosti ucha jsou limitovány tím, že člověk může z celého spektra izolovaně analyzovat pouze jeho nižší frekvenční složky. [6]*

Jednodušeji řečeno, libovolné periodické kmitání, v našem případě zvuk, lze pomocí Fourierovy analýzy rozložit na řadu jednotlivých sinusoid s různou frekvencí, amplitudou a vzájemným fázovým posunem. Teoreticky je tedy možné touto cestou docílit naprosto věrné napodobení jakéhokoliv existujícího zvuku. V praxi bychom k tomu ovšem potřebovali opravdu značné množství dílčích oscilátorů a rekonstrukce složitějších frekvenčních složek by byla opravdu velmi náročná, a tak praktické výsledky nebývají vždy naprosto věrnými napodobeninami zamýšlených zvukových barev.



Obrázek 5.1: Principiální schéma additivního syntezátoru

Co vše tedy k praktické tvorbě additivního syntezátoru a naprogramování výsledného zvuku na něm budeme potřebovat?

- 1) Abychom věděli, co ve skutečnosti chceme na syntezátoru vytvářet, musíme provést harmonickou analýzu takové barvy zvuku, kterou additivní syntézou zamýšlíme napodobovat.
- 2) Zkonstruovat model syntezátoru s co největším možným počtem sinusových oscilátorů.
- 3) S pomocí analýzou získaných dat naprogramovat náš syntezátor.

Proces zpětné rekonstrukce zvuku skládáním z frekvenčních složek s využitím Fourierovy analýzy se nazývá resyntézou, additivní syntezátor, využívající tohoto postupu, který by v sobě integroval všechny tři předešlé kroky bychom nazývali resyntezátorem.

Již na první pohled je zřejmé, že tento postup by byl značně komplikovaný a jeho realizace by mohla v praxi přinést řadu potíží, nehledě na to, že systémem Nord Modular není realizovatelná. Naším úkolem tedy bude si celý postup co nejvíce zjednodušit.

Syntezeátor, který konstruujeme bude v první řadě hudebním nástrojem, generujícím harmonické tóny. Chceme-li rekonstruovat harmonický tón, měli bychom si povědět něco o jeho frekvenčním složení. Harmonický tón obsahuje především průběh o frekvenci odpovídající výšce generovaného tónu. Například komornímu A odpovídá frekvence 440 Hz. Krom tohoto základního tónu však obsahuje zároveň vyšší, se základním tónem libozvučně souznějící frekvence, které nazýváme alikvoty. Mezi základní alikvoty řadíme tzv. vyšší harmonické. Jedná se o tóny, jejichž frekvence jsou násobky základní frekvence tónu a jejichž amplituda je zpravidla menší, než amplituda frekvence základní. Vyšší harmonické jsou de facto tím, co udává takzvanou "barvu tónu" neboli témbra, laicky řečeno to, podle čeho poznáme, zdali tón o stejné výšce hraje trubka, flétna, či jiný nástroj. Právě barvou zvuku od sebe rozlišujeme jednotlivé nástroje. Proto při konstrukci additivního syntezeátoru použijeme řadu sinusových oscilátorů, z nichž první bude naladěný na frekvenci základní a další budou fungovat pouze jako děliče tohoto základního kmitočtu a budou produkovat jeho násobky, tedy jednotlivé vyšší harmonické. [7]

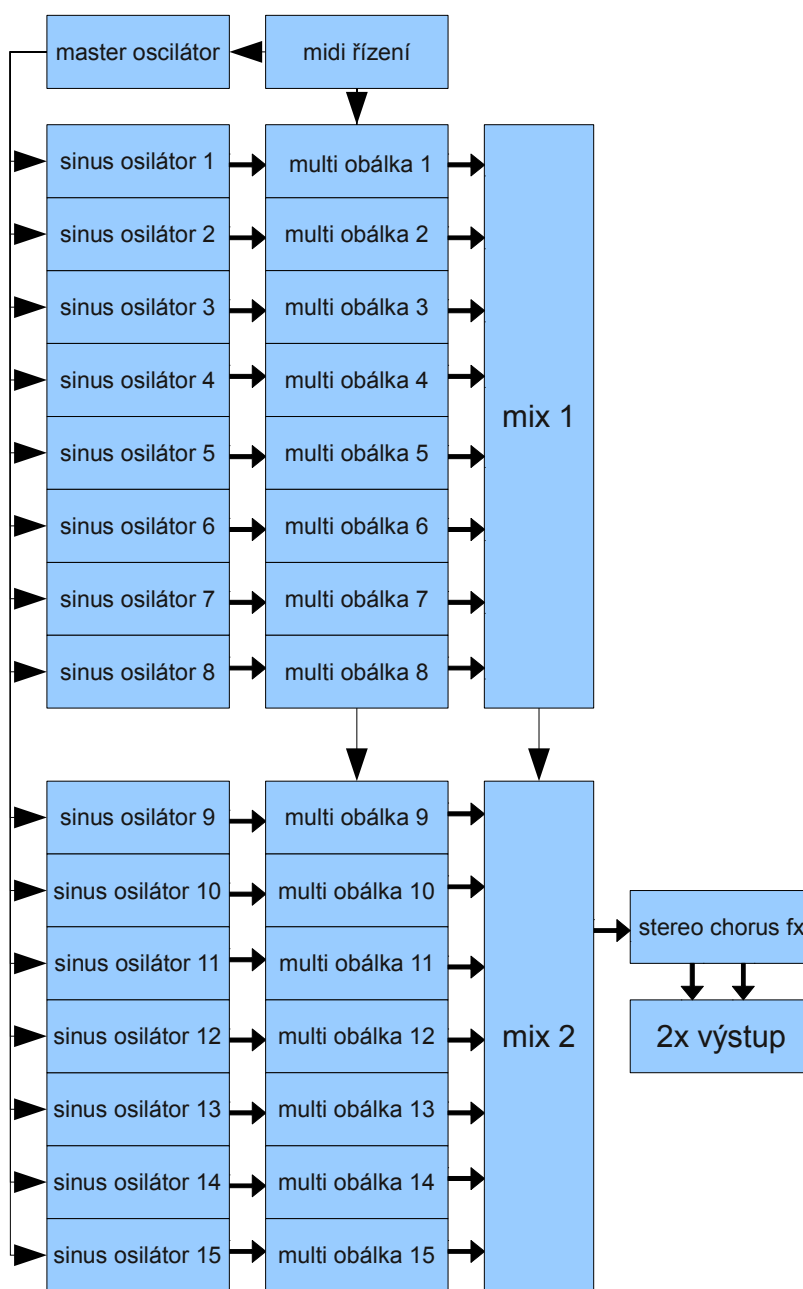
$$f(x) = (A \cdot \sin x) + (B \cdot \sin 2x) + (C \cdot \sin 3x) + (D \cdot \sin 4x) + \dots + (Z \cdot \sin nx)$$

*Vzorec 5.1: Výsledný průběh tónu generovaného additivním syntezeátorem s obsahem vyšších harmonických složek až do n-1. A je amplituda základního tónu o frekvenci x, B, C, D..Z jsou amplitudy jeho vyšších harmonických složek. Jednotlivé složky mezi sebou nejsou fázově posunuty. [7]*

Tímto způsobem jsme se dostali ke značně zjednodušenému schématu syntezeátoru. Budeme disponovat řadou naladěných oscilátorů a barvu zvuku ovlivňovat pouze nastavováním hlasitosti (amplitud) jednotlivých harmonických složek. Při zjednodušeném programování se takto můžeme vyhnout i požadavku prvotní harmonické analýzy místo ní nám vystačí se pouze obeznámit se základním spektrálním obsahem harmonických složek námi požadovaného nástroje (barvy zvuku) a podle toho nastavit jejich hlasitosti. Takto se náš syntezeátor konečně stává v praxi racionálně programovatelným. Výsledný zvuk, respektive jeho barva sice pak nebude zcela věrná, ale vzhledem k omezenému počtu oscilátorů bychom se k přesnému napodobení stejně nedostali.

Dalším dosud nezmíněným aspektem je změna obsahu harmonických složek v čase. Sebedokonalejší imitace vytvářené podle výše popisovaných schémat by v praxi i při nejlepší vůli zněly poněkud šroubovitě a staticky. Příčinou je, že složení harmonických složek v čase se může měnit. Na začátku, uprostřed i na konci zaznění tónu může jeho zvuk obsahovat odlišné množství různých harmonických. Proto by v ideálním případě bylo nutno provádět harmonickou analýzu pro každý okamžik trvání imitovaného tónu zvlášť a tomu přizpůsobit i resyntezeátor. Chceme-li proces

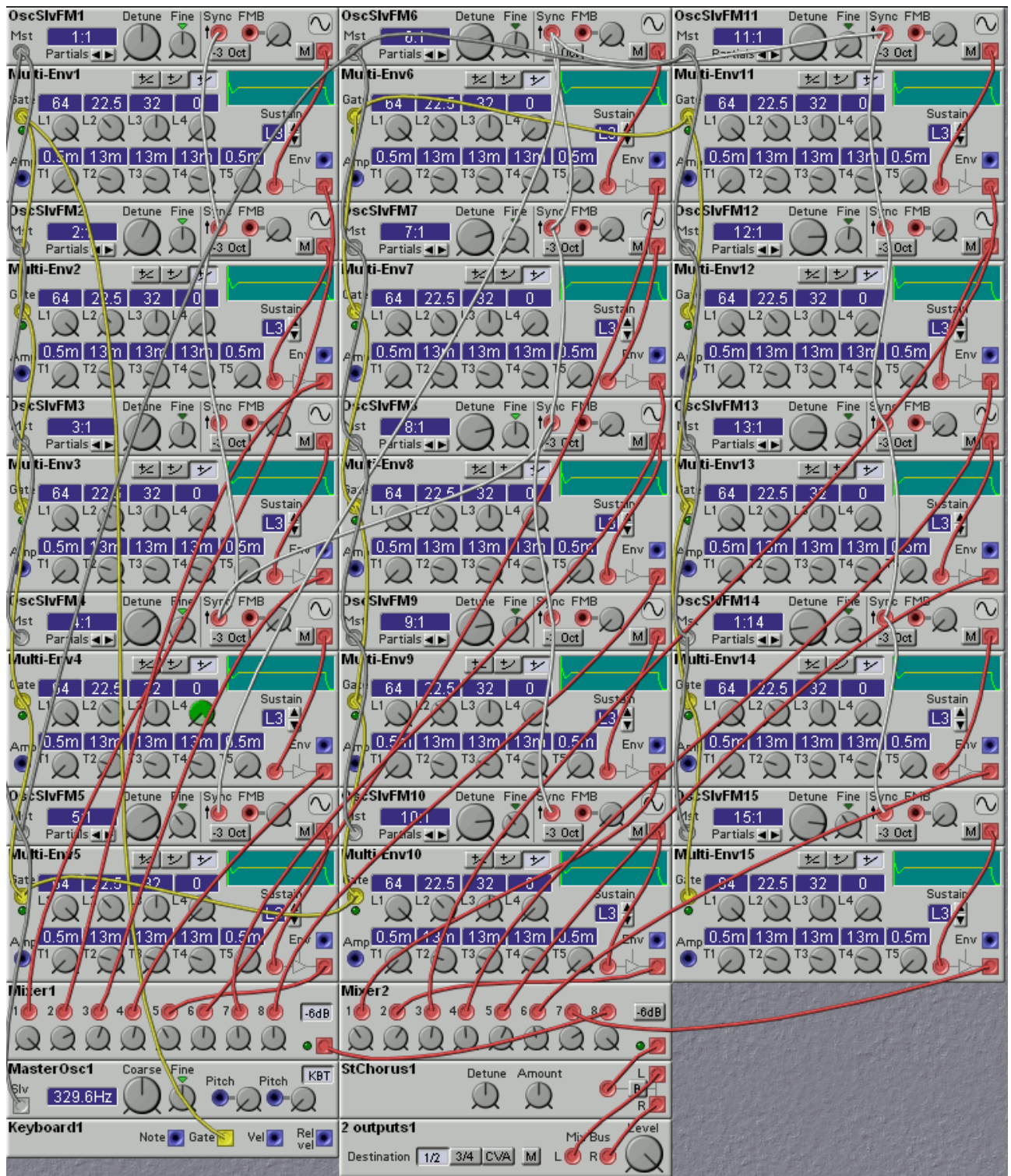
změny poměrů jednotlivých vyšších harmonických v čase realizovat se systémem Nord Modular, můžeme k tomu použít hlasitostních obálek, např. dle následujícího schématu:



obrázek 5.2: Blokové schéma additivního syntezátoru se separátními obálkami pro každý oscilátor

U tohoto syntezátoru je pro každý ze sinusových oscilátorů použita zvláštní hlasitostní obálka. Jedná se o blokové schéma skutečné realizace additivního syntezátoru s prvními čtrnácti harmonickými. Před výstupem je použit DSP procesor s algoritmem chorus pro efekt znásobení. Mixer harmonických se nachází za generátory obálek, takže hlasitosti se v obálkách nastavují absolutně, jejich vzájemný poměr pak udává nastavení hlasitosti na vstupu mixpultu. Signál o stisku libovolného tónu na klaviatuře spouští zároveň všech 15 hlasitostních obálek.

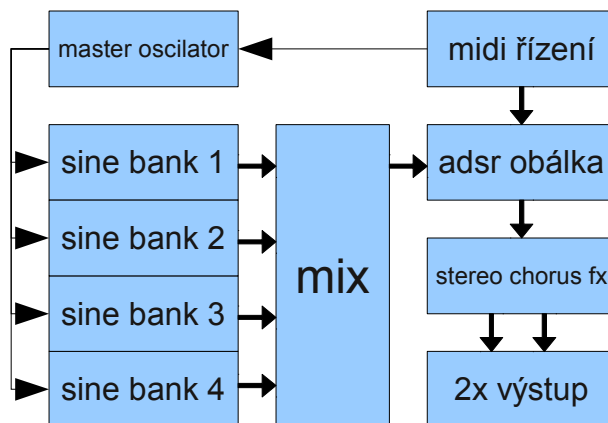




Obrázek 5.3: Praktická realizace additivního syntezátoru se separátními obálkami v systému Nord Modular

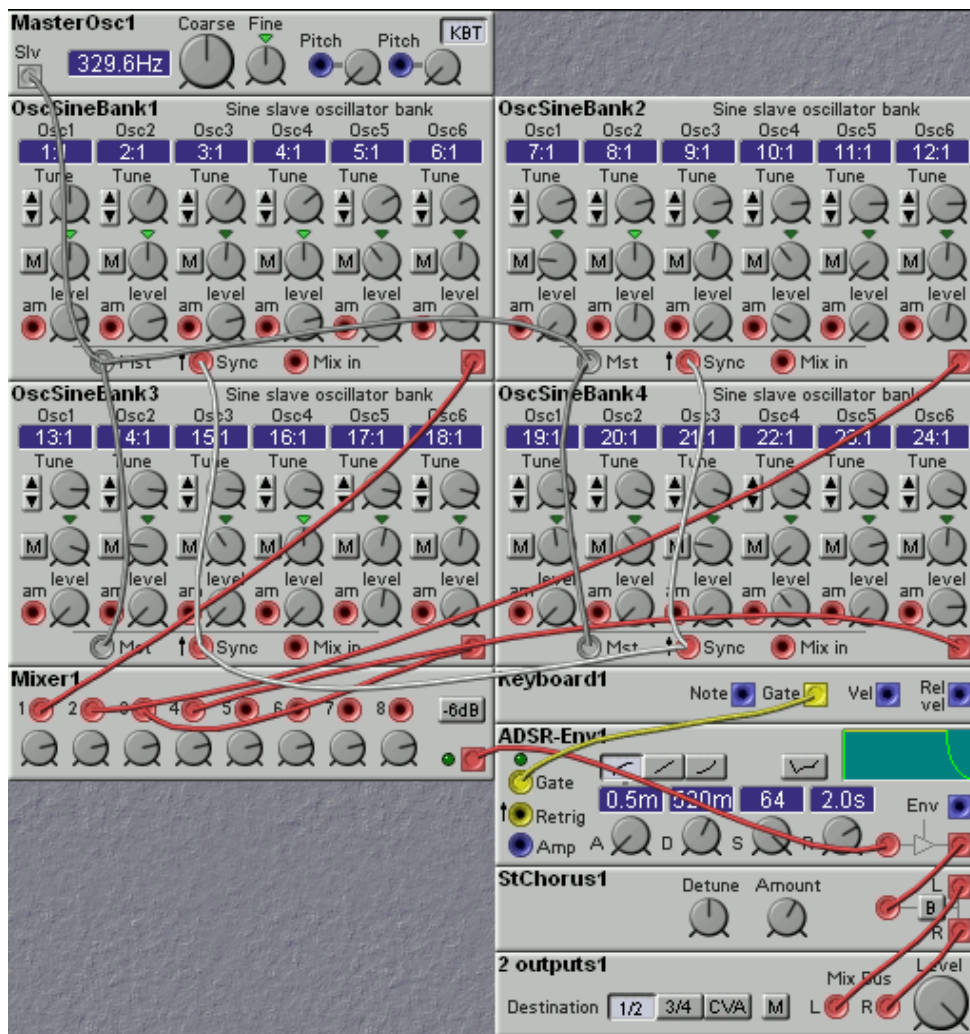
Již na první pohled je zřejmé, že programování takovéto struktury nebude příliš jednoduché a že jsme si zavedením separátních hlasitostních obálek po zjednodušení syntézy opět přitížili. Programování patnácti separátních pětisegmentových hlasitostních obálek není lehkým úkolem a i triviální úkol, jakým je naprogramování dozvuku po uvolnění stisku klávesy představuje

změnu 2x 15-ti parametrů. Pro velký počet zároveň editovaných parametrů si nelze pomoci ani použitím tzv. skupin parametrů. Zavedením separátních obálek nám zároveň zvedne zátěž procesoru systému Nord Modular a znemožní tak použití většího množství oscilátorů pro programování dalších harmonických složek. Všechny oscilátory jsou vzájemně synchronizovány, nedochází mezi nimi tedy k žádným fázovým posunům.



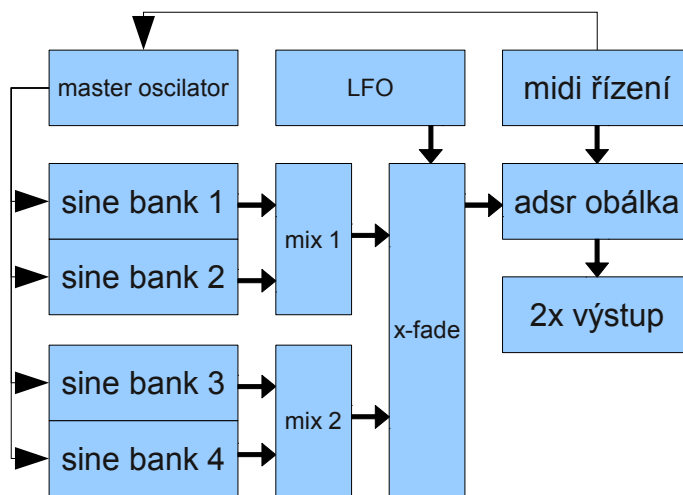
Obrázek 5.4: Blokové schéma jednoduchého additivního syntezátoru, skládaného ze sinusových bank



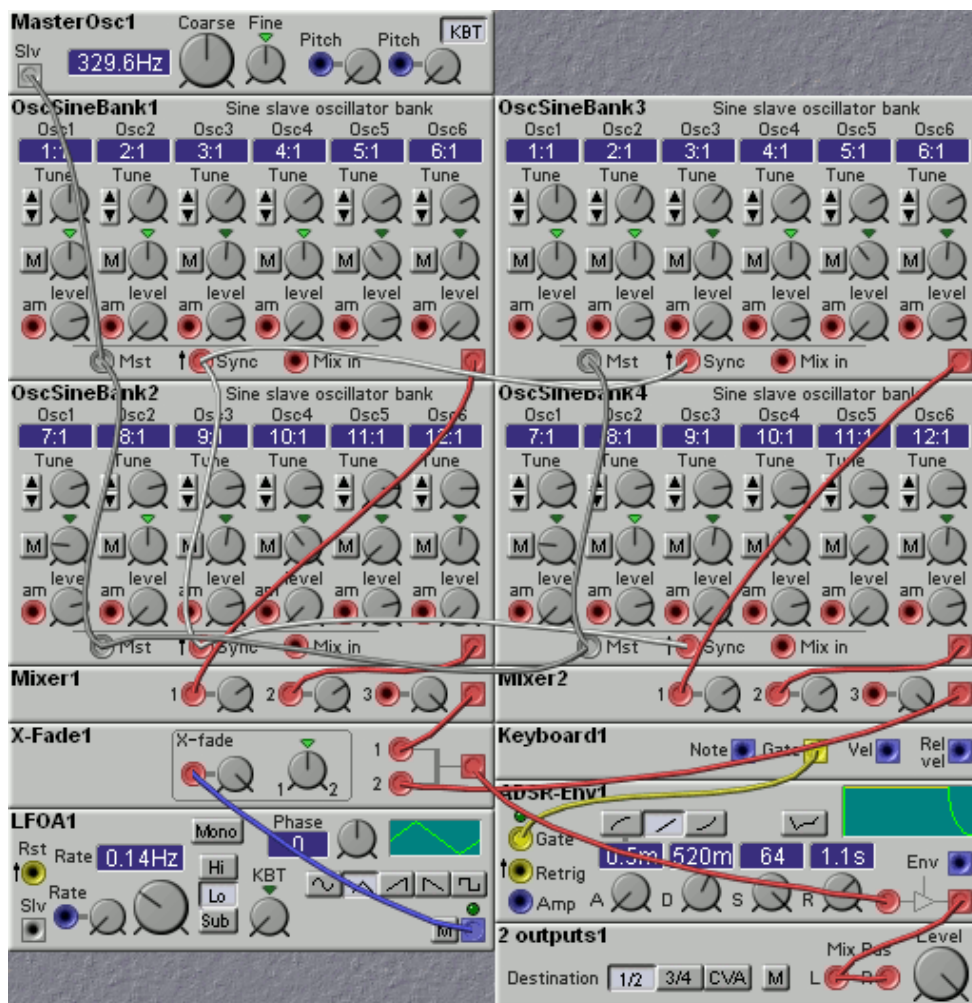


Obrázek 5.5: Realizace jednoduchého additivního syntezátoru

Nejjednodušší možný model additivního syntezátoru má výhodu velmi jednoduchého programování, velkého množství použitých oscilátorů a jediné hlasitostní obálky, nevýhodou je právě onen dříve zmiňovaný statický zvuk. Při použití dlouhých tónů a externího sekvenceru, či midi kontroleru si lze i přes to, i když ne příliš pohodlně, pomoci naprogramováním řízení hlasitostí jednotlivých oscilátorů midi kontroly a následné řízení těchto hlasitostí externími midi signály v reálném čase. Realizace additivního syntezátoru nám díky použití čtyř sinusových bank po šesti oscilátorech umožňuje použít až 23 harmonických složek k základní frekvenci. Modul používá jednu společnou hlasitostní obálku pro všechny segmenty. Na konci je opět zapojen efekt chorusu a fáze všech oscilátorů jsou i zde synchronizovány. Výhodou tohoto modelu je bohatý obsah vyšších harmonických složek, nevýhodou statická výsledná zvuková barva.



Obrázek 5.6: Blokové schéma additivního syntezátoru s morfinem

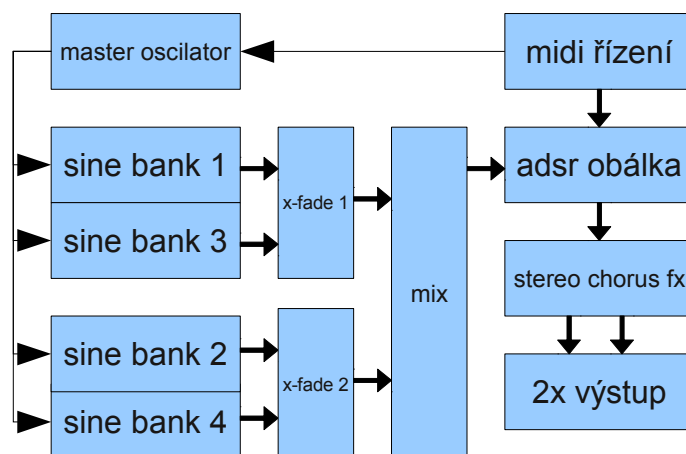


Obrázek 5.7: Realizace additivního syntezátoru s morfinem

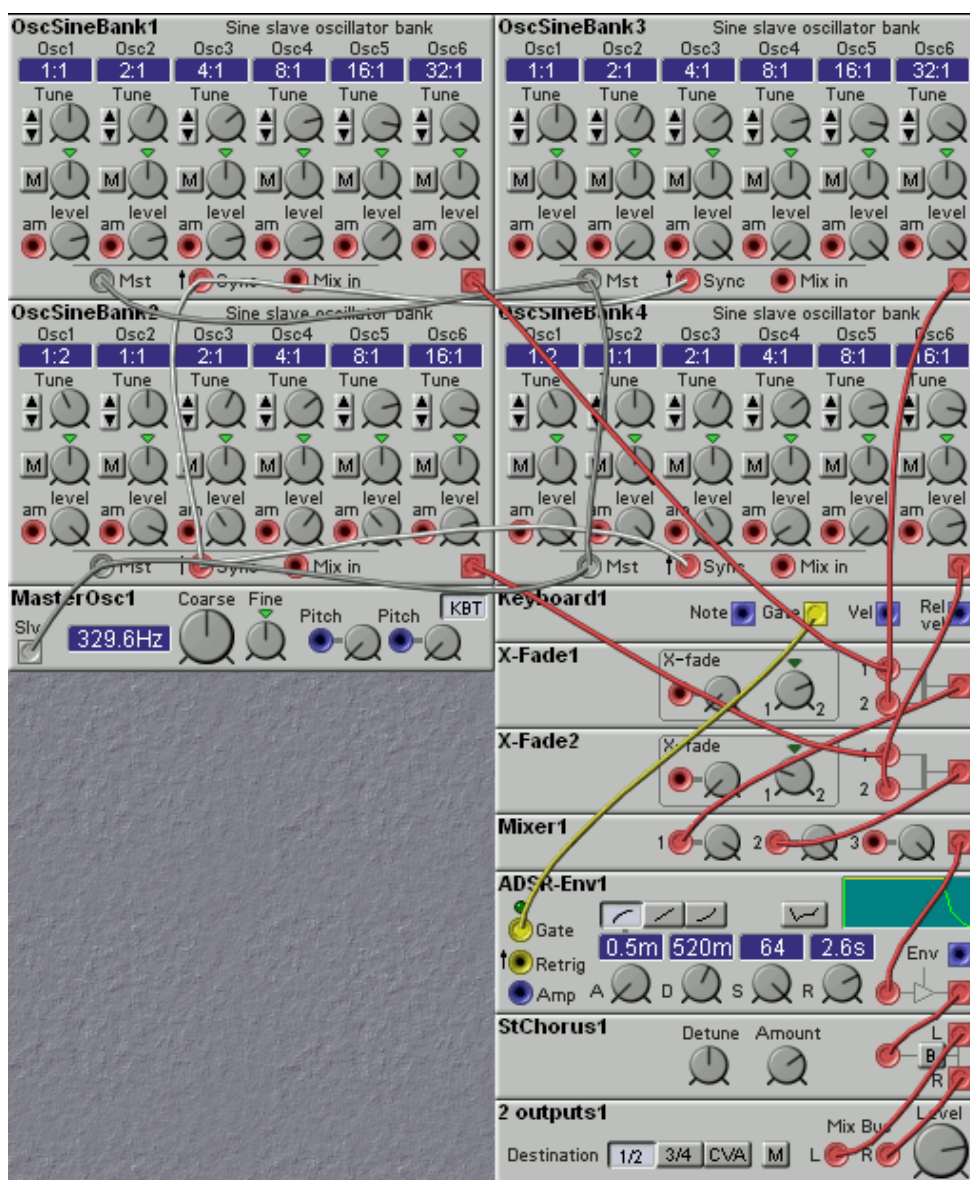
Předchozí dvě schémata trpí bohužel svými vadami. První sice umožňuje proměnu harmonických složek po dobu trvání tónu, avšak jeho praktické programování je velmi nepohodlné a časově náročné, schéma druhé je sice na programování naprosto nenáročné, avšak výsledný zvuk zůstává vždy statický. Nevýhody obou odstraňuje schéma třetí, ve kterém je celý blok sinusových oscilátorů zdvojen a signál obou těchto bloků mixován křížovým směšovačem. Nastaví-li se tedy hlasitostní poměry vyšších harmonických u každého bloku jinak a křížovým směšovačem se otočí z jedné krajní polohy do druhé, spektra obou nastavení se zvolna prolnou. V tomto zapojení je křížový směšovač řízen nízkofrekvenčním oscilátorem o frekvenci 0,14 Hz, jehož průběh je nastaven na trojúhelník. Zvolna se tak mezi sebou prolínají obě nastavení frekvenčních spekter. Morfování dvou různých nastavení frekvenčních spekter by se dalo realizovat rovněž použitím řízení skupin parametrů, kdy hlasitost každé harmonické by měla nastavený rozsah mezi krajními polohami obou frekvenčních barev a jeden skupinový parametr by hromadně řídil přechod mezi nastavenými krajními polohami všech měnicích se hlasitostí harmonických složek. Výhodou skupinového řízení hlasitostí by byla úspora výkonu procesoru, poněvadž by sinusové banky nemusely být zdvojeny, díky čemuž by bylo možno použít větší množství vyšších harmonických, nevýhodou by se stalo opět krkolomné programování, kdy každá úprava hlasitostí by musela být vázána na změnu krajních rozsahů skupinového řízení. Oproti tomu additivní syntezátor s morfingem sice omezuje počet použitých oscilátorů, ale uchovává si jednoduchost programování, kdy lze snadno nastavit poměrné hlasitosti všech jedenácti harmonických složek obou setů oscilátorů a poté mezi nimi zvolna přecházet. U tohoto modelu není na výstupu zapojen efekt chorusu, morfování vyšších harmonických je tak mnohem zřetelnější. Resumé pro tento model zní: Možnost mofringu při zachování jednoduchého ovládní, menší počet oscilátorů. Lze však rovněž nastavit u každého setu oscilátoru jiné harmonické. Zajímavých efektů lze docílit například nastavením jednoho setu oscilátorů na sudé vyšší harmonické a druhého setu na liché harmonické.

Dosud jsme se zabývali additivní syntézou pouze jako přimícháváním harmonických složek k základní frekvenci. Tím však nejsou možnosti additivní syntézy vyčerpány. Pro programování zvláštních zvukových efektů je možno nastavit oscilátory na frekvence neharmonické s frekvencí základní. Takovýmto "rozházením" obou sinusových setů a jejich následným vzájemným prolínáním pomocí x-fade směšovače můžeme docílit opravdu velmi zajímavých, měnicích se zvukových ploch. Prostor k dalšímu experimentování je zde široký.

## Emulace varhanních barev pomocí additivní syntézy



Obrázek 5.8: Blokové schéma emulace varhan s křížovým x-faderem



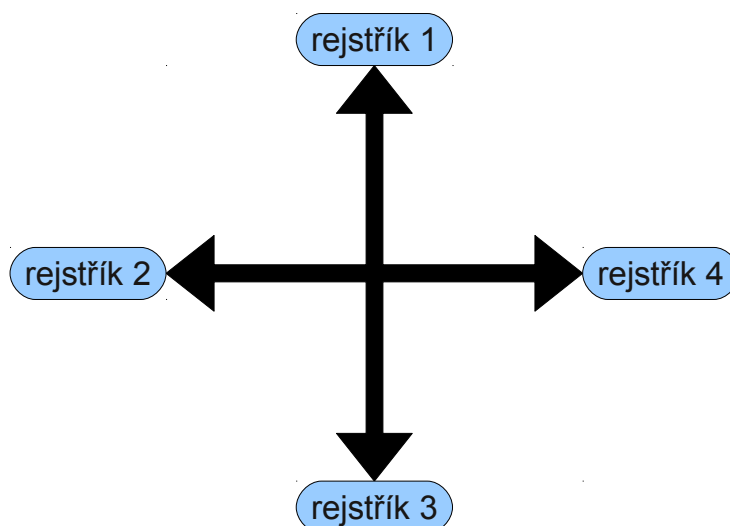
obrázek 5.9: Realizace emulace varhan s křížovým x-faderem

Předchozí část byla věnována additivní syntéze spíše po stránce teoretické, nyní si však ukážeme její praktickou aplikaci pro realizaci konkrétního záměru, v tomto případě emulaci varhan. Za tímto účelem použijeme pouze vyšší harmonické ladění v oktávách, to jest vždy o frekvenci dvojnásobné, nežli je předešlá.

$$f(x) = (A \cdot \sin 2^0 x) + (B \cdot \sin 2^1 x) + (C \cdot \sin 2^2 x) + (D \cdot \sin 2^3 x) + (Z \cdot \sin 2^n x)$$

*Vzorec 5.2: Výsledný průběh tónu emulátoru varhan*

V předchozím modelu bylo použito x-faderu k morfingu mezi dvěma různými hlasitostními nastaveními. Zde je použito dvou x-faderů, pro směšování ze čtyř bloků sinusových oscilátorů, z nichž každý představuje jednu zvukovou barvu. Výstup obou dvou x-faderů je pak smíchán dohromady. Výsledek tedy představuje křížový morfing mezi čtyřmi zvukovými barvami (rejstříky) dle následujícího schématu.



*Obrázek 5.10: Schéma křížového morfingu čtyř zvukových rejstříků pomocí x-faderů*

V každém okamžiku se nám tak zvuk mísí ze dvou, až čtyř rejstříků. Pro každý rejstřík máme k dispozici pouze šest oscilátorů. Vzhledem k tomu, že jsou oscilátory laděny po oktávách, nám i přesto stačí k pokrytí velmi širokého frekvenčního spektra. K tomu přispívá i posun ladění, rejstříky 1 a 3 jsou laděny na frekvence 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, rejstříky 2 a 4 pak na 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 8:1 a 16:1. U rejstříků 2 a 4 je použita tzv. suboktáva, to jest ladění na frekvenci poloviční frekvence základní. Díky ní dostává výsledný zvuk velmi sytou a pevnou basovou barvu.

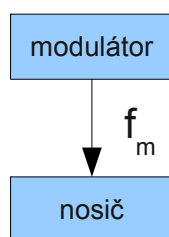
V tomto modelu je sice použito ze všech modelů nejméně oscilátorů na blok a ovládání i programování je naprosto triviální záležitostí, i přesto je jeho zvuk ze všech modelů nejbrilantnější

a je skutečnou napodobeninou reálného zvuku varan. K tomu navíc získáváme možnost křížového mofringu, který je řízen dvěma potenciometry z předního panelu Nord Modularu. Je možno je propojit i na řízení MIDI kontrolery. K plnosti a sytosti zvukové barvy emulátoru přispívá fakt, že v každém okamžiku se na výstupu mísí minimálně dva rejstříky zároveň a svůj efekt má i na výstupu zapojený chorus.

## 6 FM syntezátor

Frekvenční modulace je metoda přenosu pásma frekvence nižší na nosné vlně o frekvenci řádově vyšší, respektive takové je její neznámější využití, dodnes masově používané například v oblasti analogového šíření rozhlasového signálu v pásmu velmi krátkých vln. Přenášená pásma o šířce řádově kHz jsou namodulována na nosné vlně o frekvenci cca 100 MHz. Tato frekvence však není v čase zcela konstantní a mění se o odchylky v řádu kHz. Právě tato odchylka udává přenášený signál o frekvencích ve slyšitelném pásmu, který je posléze zpátky demodulován z nosné vlny a transformován na klasický audio signál. Tato technika rádiového vysílání pomocí FM je známa již od roku 1933. [8]

Objev frekvenční syntézy pomocí FM však učinil Američan John Chowning až v roce 1967. Princip spočívá v tom, že jak nosná, tak i modulační frekvence se nachází ve slyšitelném pásmu. Modulací se tak na nosné frekvenci vytvářejí postranní harmonická spektra. Jedná se o velmi jednoduchý a efektivní způsob, jak měnit harmonické složení zvuku. Chowning na něj přišel náhodně, při experimentování s efektem vibrato, který spočívá v tom, že tón je velmi jemně rozlaďován nízkou frekvencí, řádově jednotek Hz. Dociluje se tím efektu chvění tónu. Chowning však zjistil, že pokud tato modulační frekvence překročí pásmo slyšitelnosti, to jest 20 Hz, začnou se ve výsledném tónu objevovat postranní harmonická spektra. Cesta od objevu k masovému rozšíření této metody byla velmi dlouhá. Výsledkem dlouhého vývoje FM syntezátoru, na kterém v sedmdesátých letech 20. století Chowning spolupracoval s japonskou firmou Yamaha byl až legendární syntezátor Yamaha DX7, uvedený na trh roku 1983. Teprve tehdy technologie dospěly tak daleko, aby bylo možno realizovat digitální syntezátor založený na principu frekvenční modulace. [7]



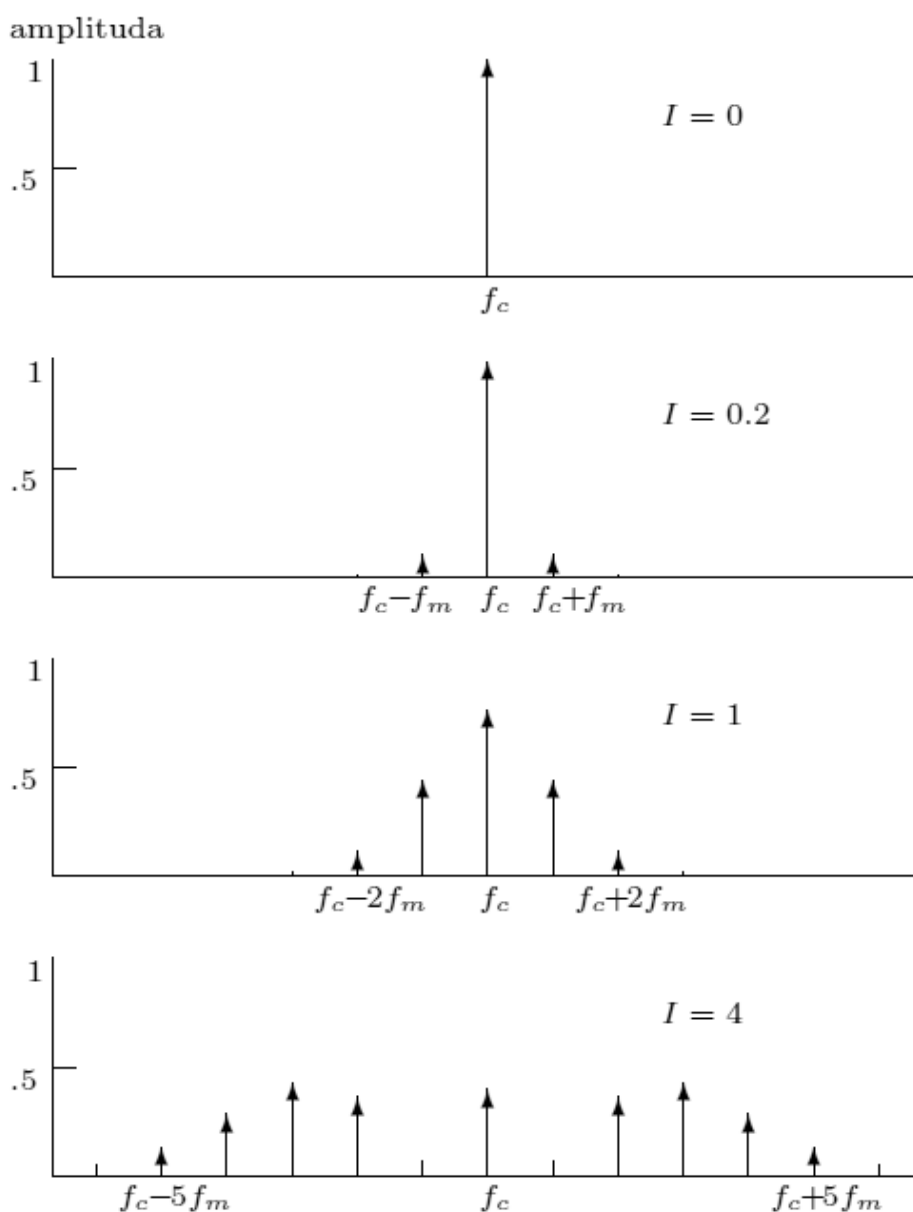
Obrázek 6.1: Princip frekvenční modulace

Signálem z modulačního oscilátoru, generujícího frekvenci  $f_m$  je modulovaná frekvence nosného oscilátoru, nazývaného anglicky carrier, míra modulace je dána výstupní amplitudou modulujícího oscilátoru  $A_m$ . Pro tvar výsledného signálu platí vztah:

$$f(x) = \sin(f_c + A_m \cdot \sin f_m)$$

Vzorec 6.1: Frekvenční modulace [7]

kde  $f_c$  je frekvence nosiče,  $f_m$  frekvence modulátoru a  $A_m$  je amplituda, s níž je nosič modulován.

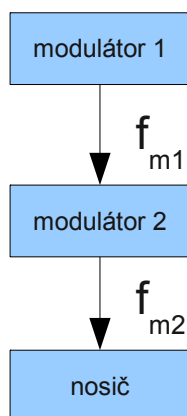


Obrázek 6.2: Harmonické složky, vznikající frekvenční modulací nosiče [7]



Kde  $f_c$  je frekvence nosiče,  $f_m$  frekvence modulátoru a  $I$  amplituda, s níž je nosič modulován. Jednotlivé diagramy vyznačují rostoucí postranní frekvenční složky, vznikající při různých intenzitách modulace.

Kromě jednoduché FM modulace se používá rovněž modulace vícenásobné, kdy výstupní signál nosiče, jehož signál je již namodulován frekvencí modulátoru, slouží jako modulační vstup, to znamená druhý modulátor pro další oscilátor.



obr. 6.3: Schéma dvojnásobné FM modulace

Pro výsledný signál této konfigurace platí vztah:

$$f(x) = \sin(f_c + A_{m1} \cdot \sin(f_{m2} + A_{m2} \cdot \sin f_{m2}))$$

Vzorec 6.2: Dvojnásobná FM modulace [7]

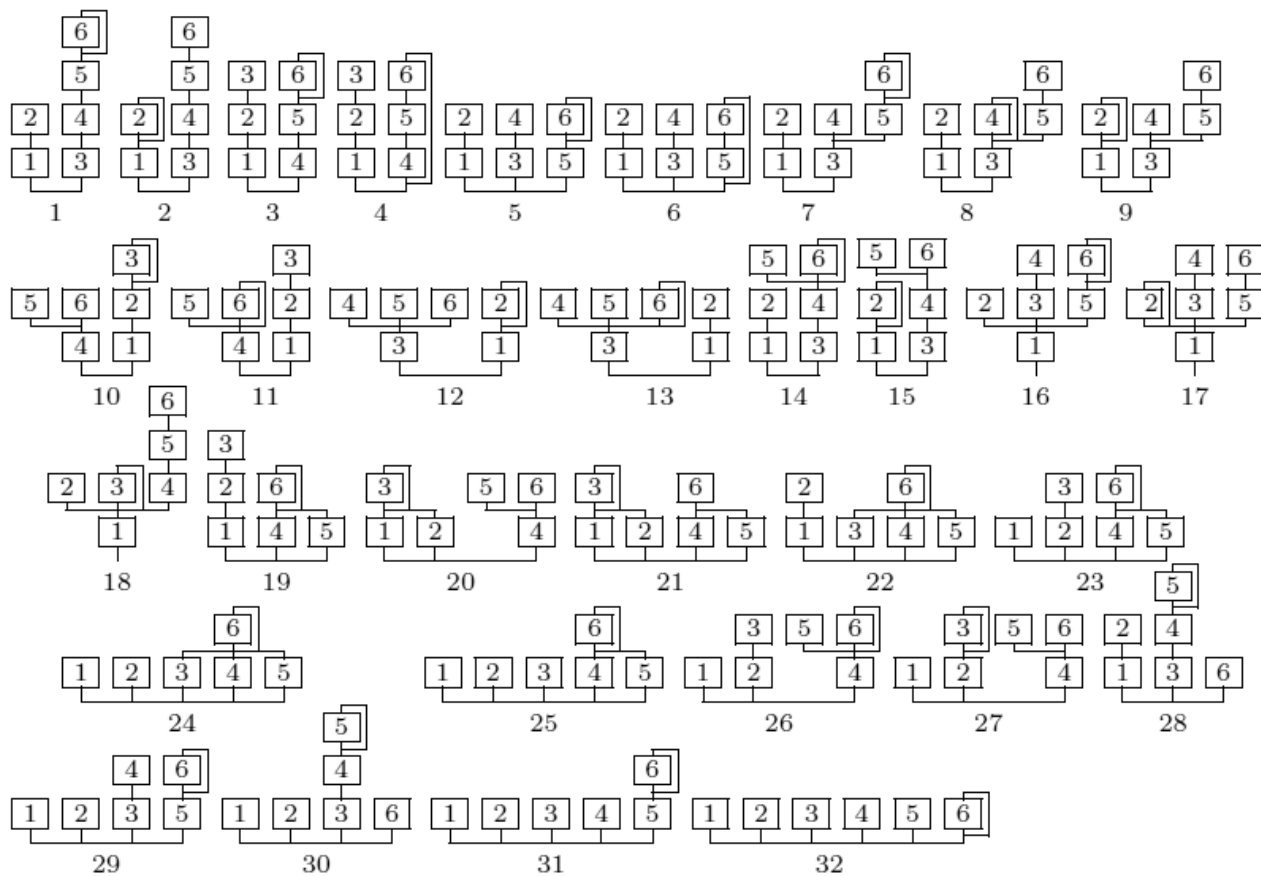
Kde  $f_c$  je frekvence nosiče,  $f_{m1}$  a  $f_{m2}$  frekvence obou modulátorů,  $A_{m1}$  výstupní amplituda prvního modulátoru a  $A_{m2}$  výstupní amplituda modulátoru druhého.

## Implementace zvuku naprogramovaného pro Yamahu DX7 do systému Nord Modular



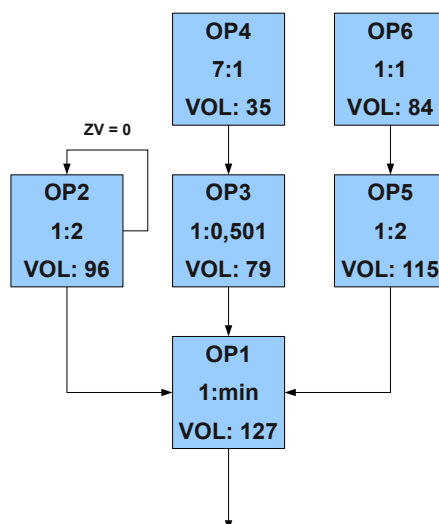
Obrázek 6.4: Syntezátor Yamaha DX7 [9]

Syntezátor Yamaha DX7 pracoval s šesti oscilátory, z nichž každý měl vlastní hlasitostní obálku. Firma Yamaha blok oscilátoru s hlasitostní obálkou pojmenovala dle vlastní terminologie operátorem. Termín se ujal a dodnes se používá u většiny FM syntezátorů. V syntezátoru je dostupno 32 předdefinovaných vzájemných konfigurací těchto operátorů. Každou z těchto konfigurací nazýváme algoritmem. Signál výstupu každého operátoru mohl jít buďto do směšovače výstupních signálů operátorů a odtud přímo na audio výstup, nebo mohl sloužit jako modulační vstup jiného operátoru, v tom případě ovšem výstupní hlasitost tohoto operátoru neudávala hlasitost signálu, ale míru frekvenční modulace, s níž byl následný operátor modulován. [7]



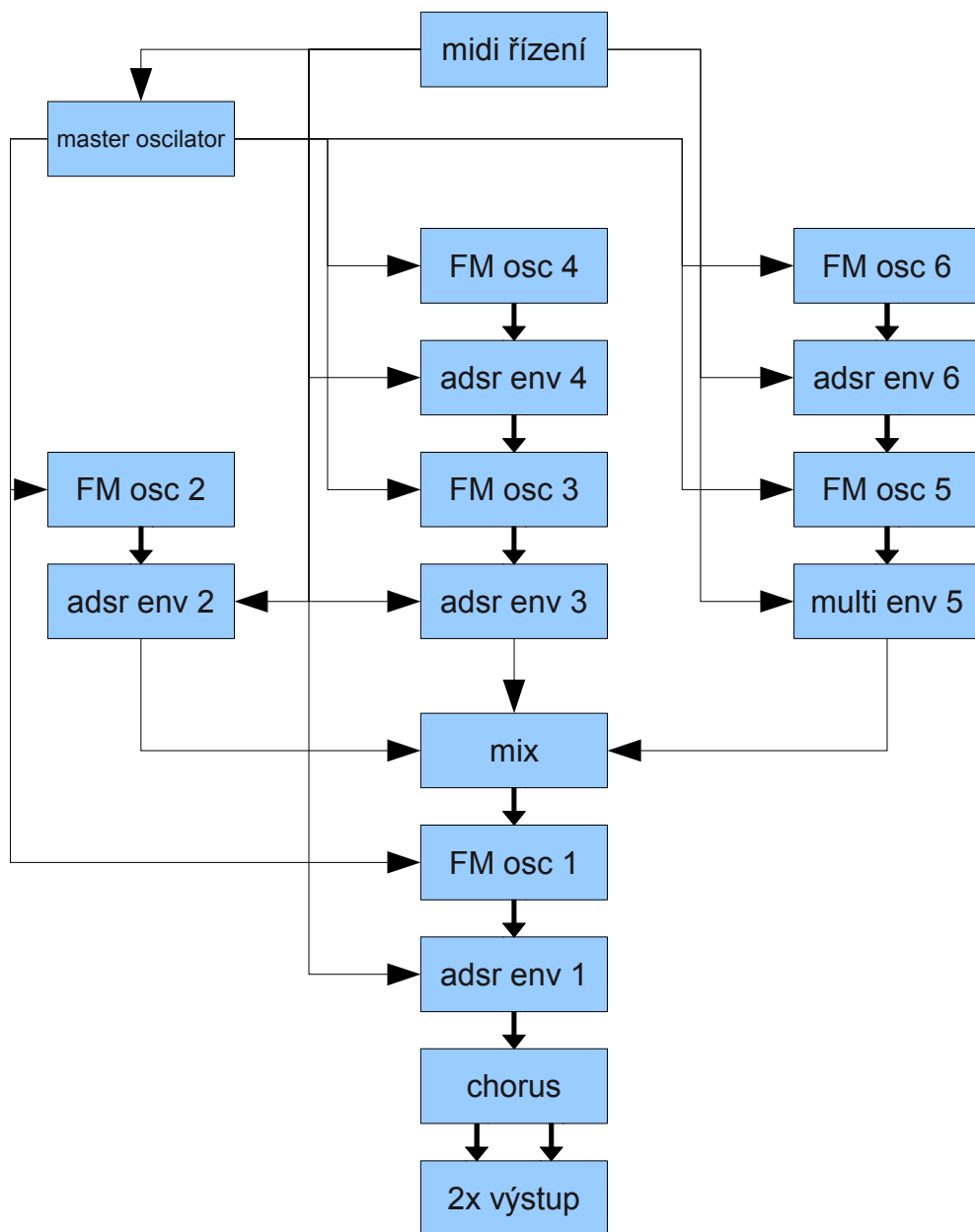
Obrázek 6.5: Schéma algoritmů syntezátoru Yamaha DX7 [7]

Pro implementaci zvuku v Nord Modularu nám tedy stačí sestavit modul, stávající z řídicího oscilátoru kontrolovaného externím MIDI signálem, ten pak bude řídit šest dílčích oscilátorů, které budou v módu děliče. Každý z nich musí mít přiřazenu separátní hlasitostní obálku. Zde stojí vzít za úvahu, zdali v jednotlivých případech volit klasické ADSR obálky, nebo složitější pětisegmentové multi obálky. Tvarování průběhu je totiž u FM zvuků velmi důležité. Dále už potřebujeme jen směšovače a výstupní audio modul. Konfiguraci potřebného operátoru dosáhneme patřičným předrátováním výše uvedených bloků.

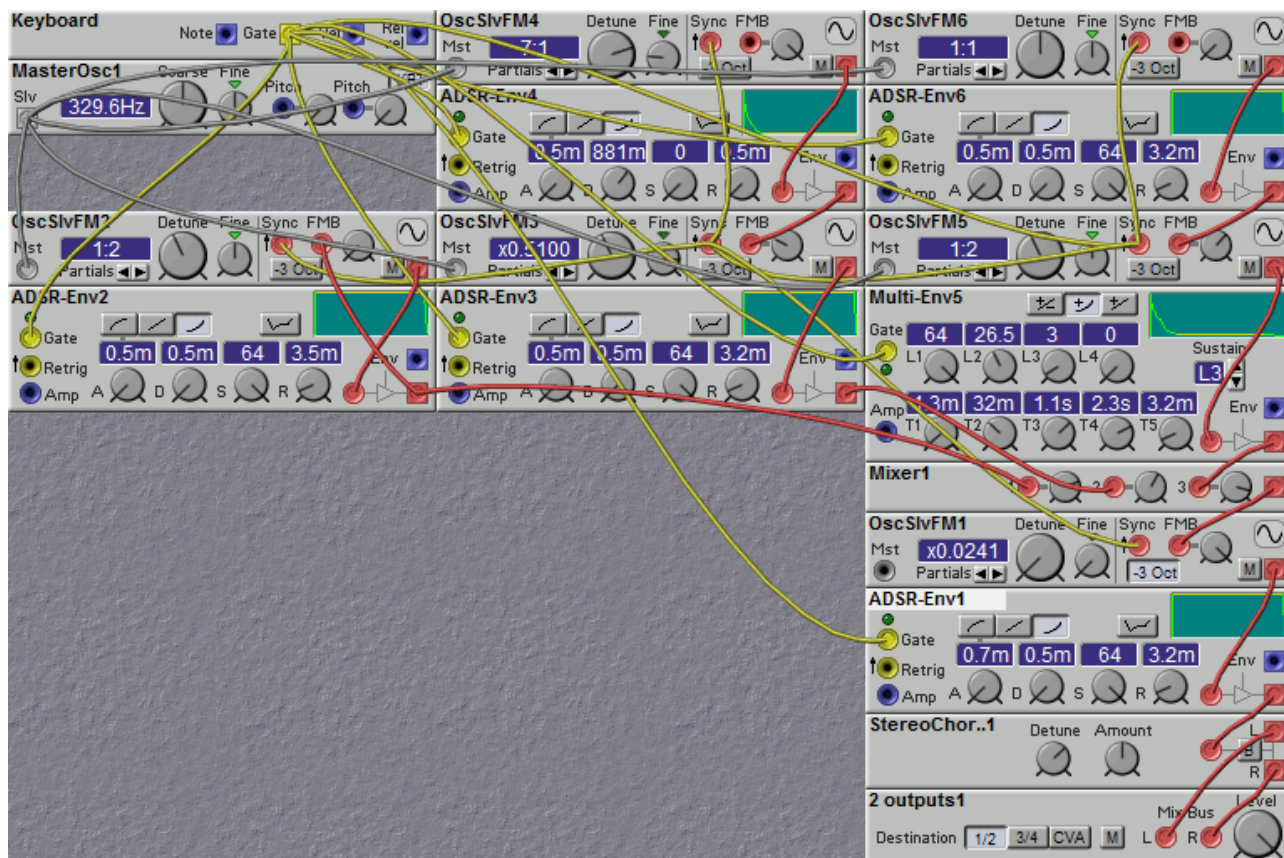


Obrázek 6.6: Schéma basového programu, přenesené z Yamaha DX7

Jako příklad si zvolíme implementaci konkrétního basového programu (zvuku) z obrázku 6.6. Je založen na algoritmu č. 17, kde je operátor 5 modulován operátorem 6, operátor 3 operátorem 4, operátor 2 vlastní zpětnou vazbou, která je však v programu basy potlačena, a operátor 1 signálem smíchaným z výstupů operátorů 5, 3 a 2. Poměry frekvencí a výstupní hlasitosti jsou uvedeny v zadání.



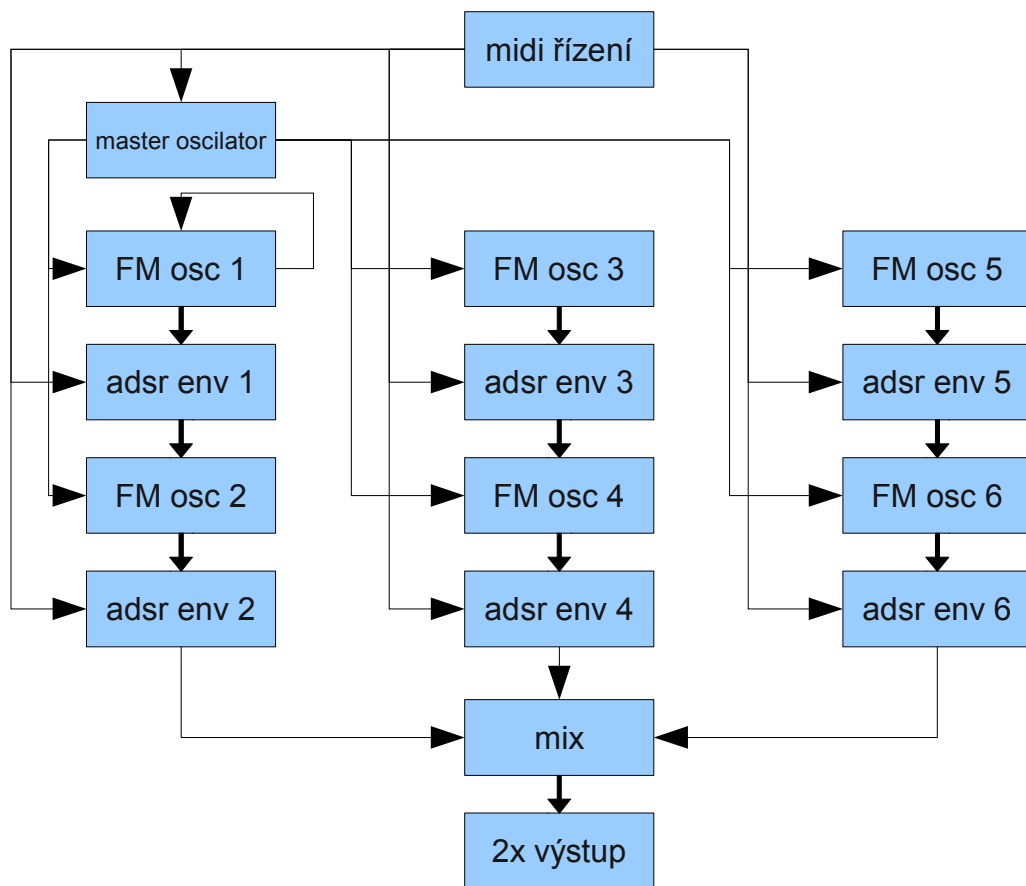
Obrázek 6.7: Blokové schéma basového programu z Yamahy DX7



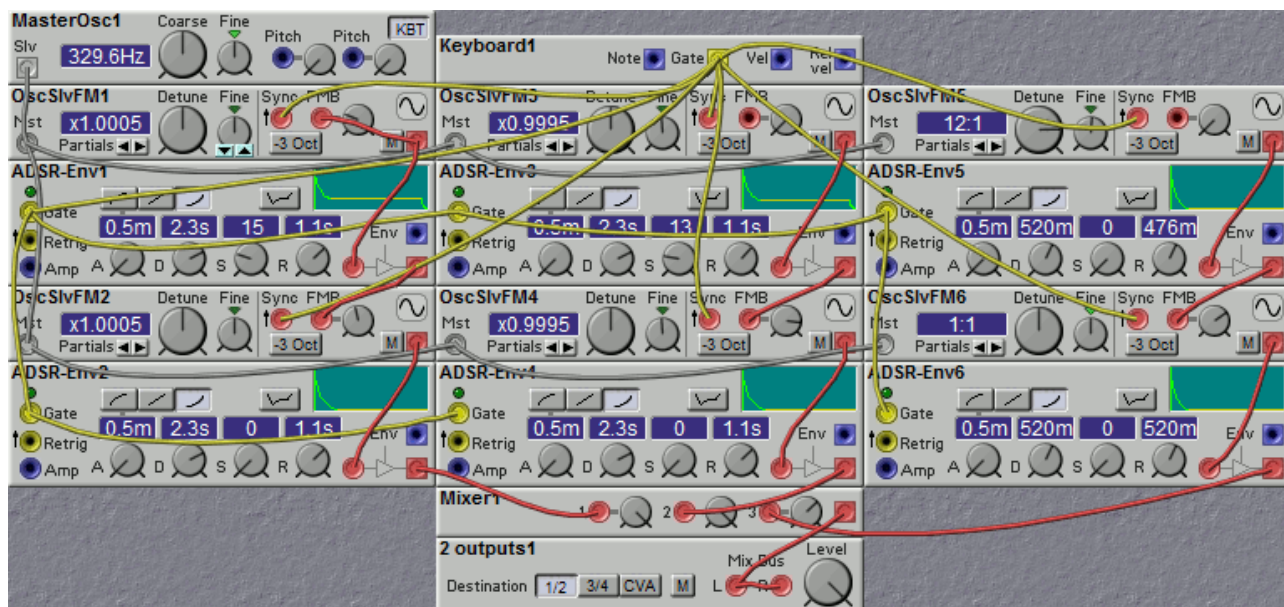
Obrázek 6.8: Schéma realizace basového programu z Yamahy DX7

Velký důraz je nutno dát na nastavení křivek obálek, které v zadání nebylo uvedeno. Pro složitější průběh, v tom to případě u operátoru 5, je lepší volit pětisegmentovou obálku. Výsledný zvuk má typickou charakteristiku FM nástrojů. Tímto způsobem lze v Nord Modularu realizovat většinu FM programů z Yamahy DX7.

Na schématu Yamahy DX7 jsem založil rovněž emulaci elektrického pianu. Je postavena na algoritmu č. 5, pouze číslování operátorů zde není dodrženo. Program sestává ze tří složek, z nichž každá je modulována jedním operátorem. Jednodušší emulace pianu by se dala realizovat i pouze čtyřmi operátory, první dvě dvojice FM operátorů jsou nakonfigurovány velmi podobně, avšak zvuk by nebyl tak komplexní a plný. Zdvojením této složky a velmi jemným nadlazením jedné a podlazením druhé je dosaženo plnějšího zvuku. Třetí složka je modulována operátorem naladěným na poměr 1:12 a má velmi krátký čas doznění. Simuluje nám tak prvotní bříknutí při úderu klávesy. Barvu zvuku lze ještě doladit jemnou úpravou modulačních úrovní a změnou tvaru hlasitostních obálek. Výsledný zvuk se velmi podobá klasickým DX pianům.



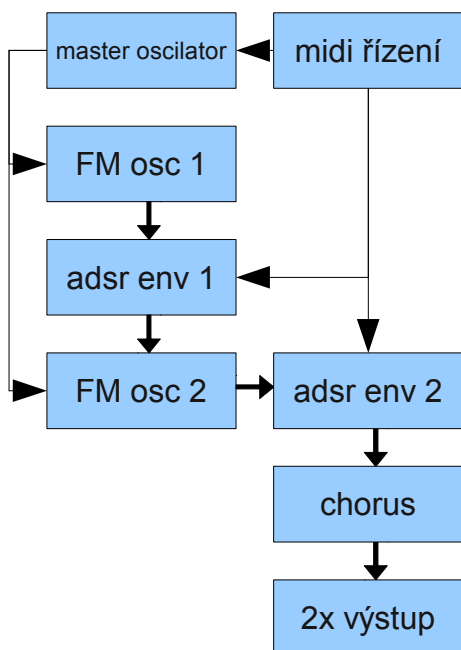
Obrázek 6.9: Blokové schéma modulu elektrického pianu



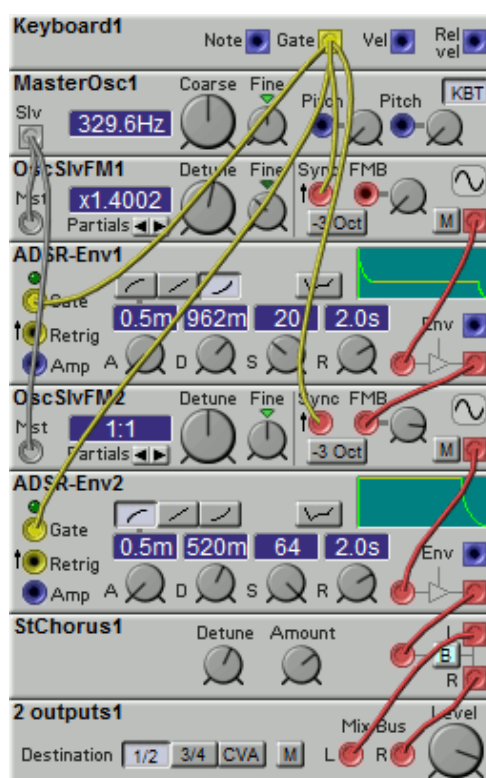
Obrázek 6.10: Schéma realizace modulu elektrického pianu

K realizaci velmi zajímavých zvukových barev pomocí FM syntézy ovšem není třeba vždy složitých zapojení se šesti operátory. Příkladem toho jsou následující dva programy, založené pouze na dvou operátorech. Shodou okolností jsou oba z nich zvuky, založené na neharmonických složkách. Konfigurujeme-li totiž frekvenci modulátoru ku frekvenci nosiče v násobném poměru, výsledné složky budou znít harmonicky. Rozladíme-li však od sebe frekvenci nosiče a modulátoru, vzniknou nám FM syntézou rovněž neharmonické složky.

Prvním příkladem zvuku s neharmonickými frekvenčními složkami je emulace zvonu. Řekl bych, že právě emulace neharmonických, kovových barev je jedna z nejsilnějších stránek FM syntézy. Lze to ostatně posoudit na následujícím příkladu naprosto jednoduchého zvuku, založeném pouze na dvou operátorech a chorusem na výstupu. Výsledný zvuk je naprosto plný, sytý, pevný a lze ho dosáhnout s naprostým minimem použitých komponentů.



Obrázek 6.11: Blokové schéma emulace zvonu

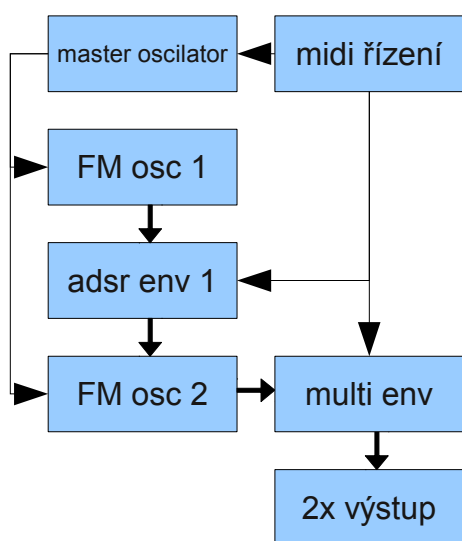


Obrázek 6.12: Schéma realizace emulace zvonu

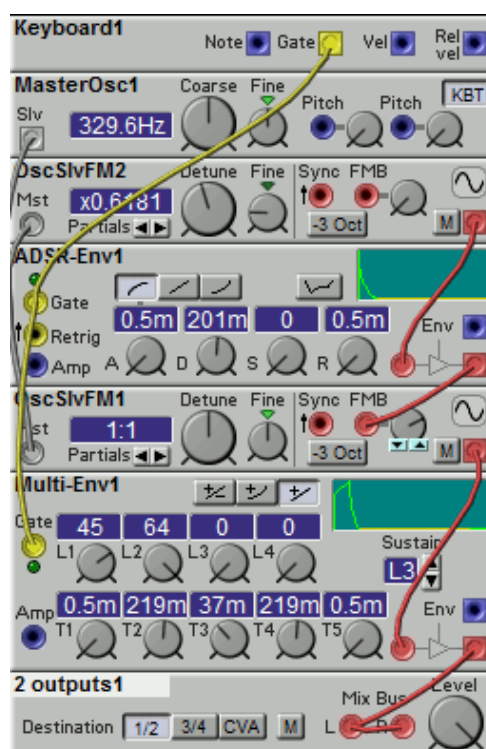
Modulátor je transponován na 1,4 násobek frekvence nosiče a vybaven obálkou s cca sekundovým dozněním do zhruba dvacetiprocentní úrovně špičkového signálu. To je prakticky vše, co je třeba k dotvoření efektu kovového úderu zvonu. Výsledek je podtržen koncovým efektem chorusu.



Druhým neharmonickým zvukem, založeným na téměř identickém modulu s pouhými dvěma operátory je "dřevěná" sub basa. Rozdíl zapojení spočívá pouze v absenci chorusu, který by nám v tomto případě velmi pevný basový zvuk poněkud rozostřil a v použití pětisegmentové obálky pro nosič. Podobně vytvarovaný náběh hlasitosti by se nám totiž s pouhou ADSR obálkou naprogramovat nepodařil. Náběh ze tří čtvrtin hlasitosti do plné úrovně se v něm uskuteční během 0,2 sekundy. Následuje stejně dlouhé doznění do nuly. Modulátor má frekvenci nižší než nosič, cca 0,62 násobek. Výsledný zvuk je velmi hutný, pevný, silně basový a dobře čitelný. Pro oba předešlé moduly platí heslo "hodně muziky za málo peněz" a opět dokazuje, že nejjednodušší programy mohou být často mnohem efektivnější, než mnohé velmi složitě programované.

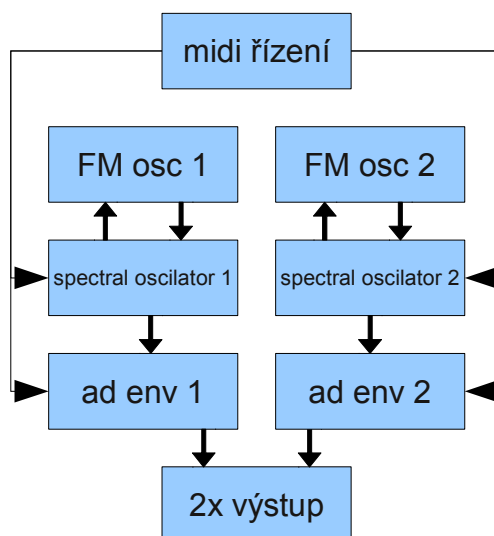


Obrázek 6.13: Blokové schéma "dřevěné" basy

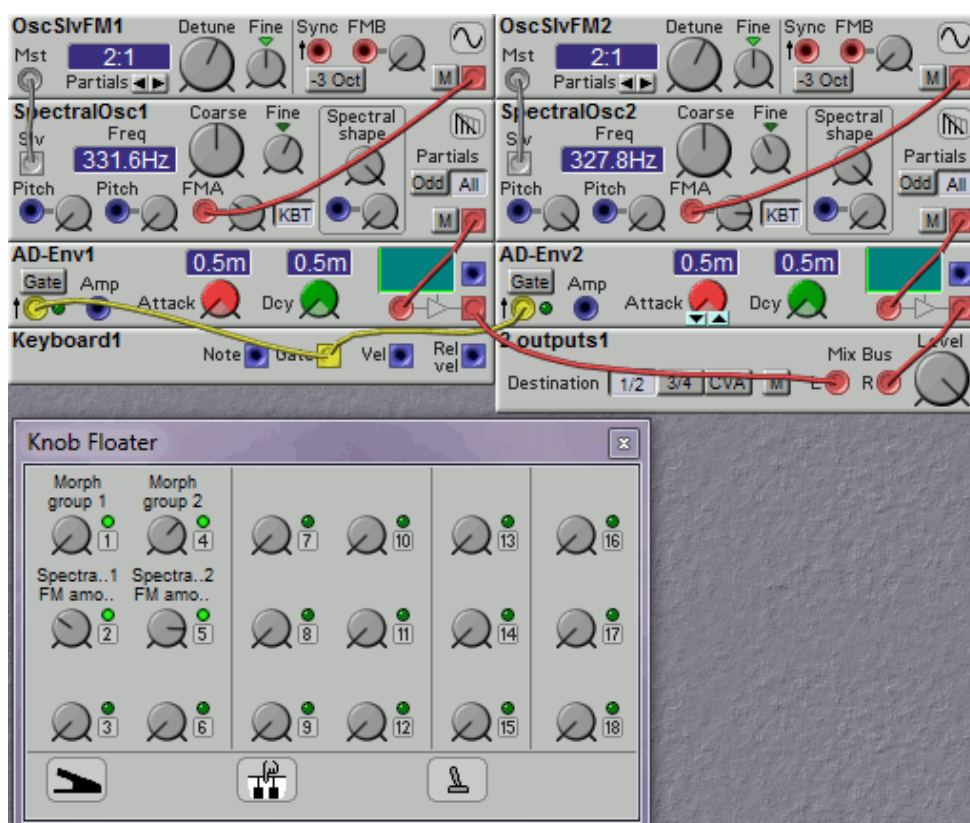


Obrázek 6.14: Schéma realizace "dřevěné" basy

Posledním příkladem použití FM syntézy není typický FM zvuk, ale kombinace generátoru harmonických složek s frekvenční modulací.



Obrázek 6.15: Blokové schéma spektrálního modelu s FM modulací

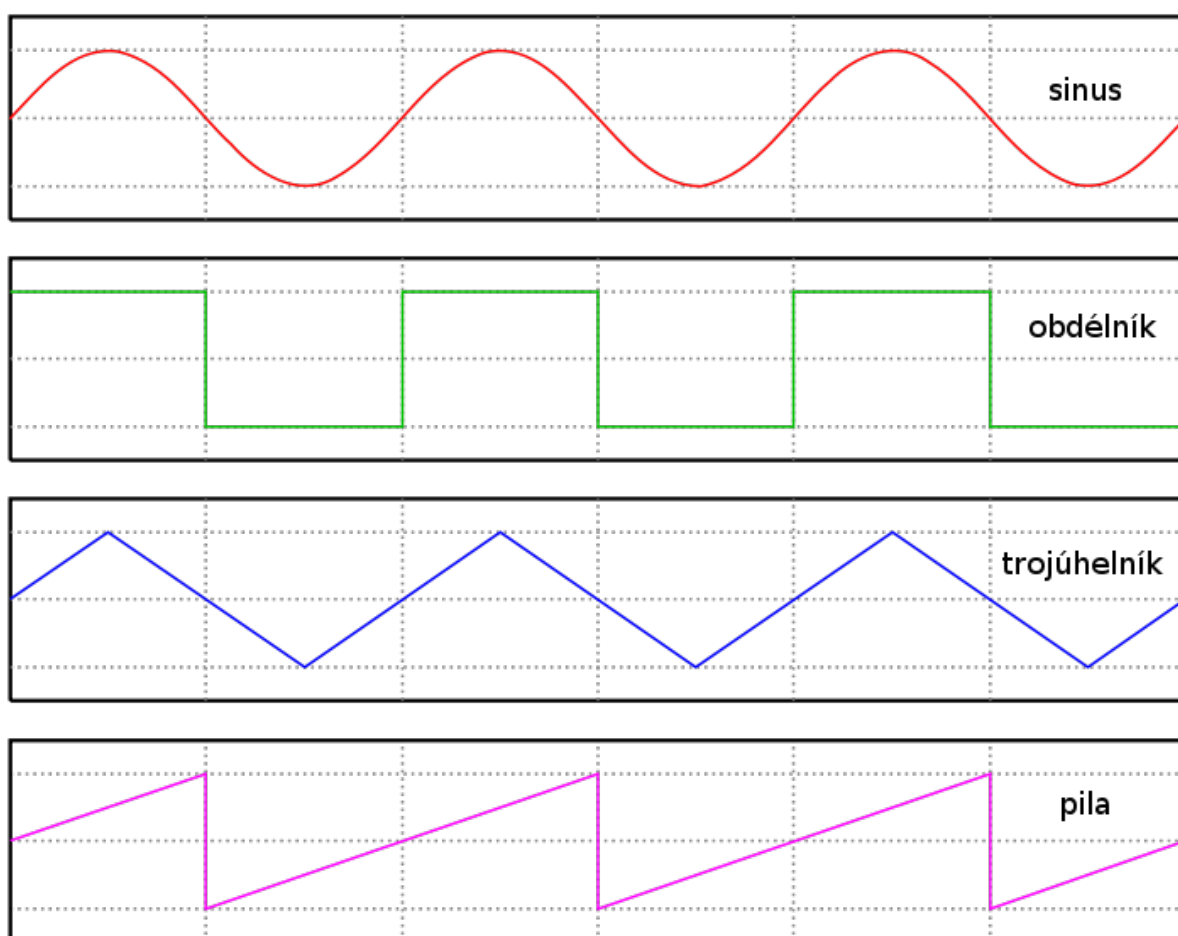


Obrázek 6.16: Schéma realizace spektrálního modelu s FM modulací

Základem modulu je spektrální oscilátor, který kromě základní frekvence produkuje i vyšší harmonická složky. Celý tento blok je modulován oscilátorem nastavený na poměr 2:1 k hlavnímu, složkovému oscilátoru. Model produkuje velmi bohatá frekvenční spektra a je poslechem velmi příjemný. Na konci je použita nejjednodušší AD obálka, která ovšem v tomto případě zcela postačuje, protože model je předurčen především pro přehrávání krátkých melodických i monotónních sekvencí krátkých not, v ideálním případě si jej lze představit jako model řízený arpeggiátorem. Zajímavého efektu je zde docíleno zdvojením celého modelu a umístěním každé části do odděleného kanálu stereobáze. Nastavíme-li poté frekvenční modulaci každého bloku na jinou úroveň, zvuk začíná dostávat další dimenzi. Oba regulátory hlasitostních obálek jsou spřaženy do skupiny a namapovány rovněž na ovládací panel Nord Modularu, aby se obálka dala řídit shodně pro oba audiokanály. Na ovládací panel jsou vyvedeny rovněž ovládací prvky frekvenční modulace spektrálních oscilátorů, tentokrát však pro každý kanál zvlášť, poněvadž právě rozdíly v modulaci obou kanálů činí výsledný zvuk zajímavějším. Jedná se o další z řady velmi jednoduchých, ale velmi dobře znějících modulů.

## 7 Subtraktivní syntezátor

Subtraktivní syntéza je neoblíbenější a v syntezátorech nejčastěji používanou formou syntézy zvuku. Je populární především jednoduchou editací a velmi zajímavými zvukovými barvami, typickými pro tzv. analogové syntezátory. Zatímco additivní, či FM syntéza jsou konstrukční metody stavby barvy tónu, syntéza subtraktivní je metodou spíše destruktivní, která je založena na principu modifikace a ořezávání harmonických složek vlnových tvarů s bohatou škálou frekvenčních spekter. Jako zdroje signálu se v analogových subtraktivních syntezátorech používalo oscilátorů generujících vlny základních tvarů, jako je pila, trojúhelník, obdélník, popřípadě ještě sinus a šum.



Obrázek 7.1: Základní tvary signálů používaných v subtraktivních syntezátorech [10]

### Sinusová vlna:

Sinusová vlna obsahuje pouze základní frekvenční složku a žádné harmonické. [11]

### Trojúhelníková vlna:

Tvarem i zvukem se nejvíce se podobá sinusoidě, obsah harmonických složek je poměrně chudý, nalezneme u ní pouze liché harmonické složky a úbytek amplitudy vyšších harmonických složek je exponenciální. [11]

### Obdélníková vlna:

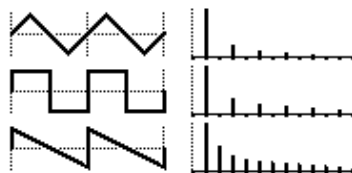
Ideální obdélníková vlna představuje periodické přepínání mezi dvěma úrovněmi hodnot signálu. V praxi však i přesto obdélníková vlna obsahuje širokou škálu harmonických složek, ovšem stejně, jako u trojúhelníkové vlny pouze lichých. Na rozdíl od ní jsou však úbytky amplitud vyšších harmonických lineární. Obdélníková vlna zní "dutě", a proto je v subtraktivní syntéze používána k napodobení dechových nástrojů, apod. [11]

### Pilová vlna:

Pila je v subtraktivní syntéze nejpoužívanější tvar vlny, oblíbě se těší pro svůj bohatý obsah harmonických složek a to jak lichých, tak sudých. Obsahuje tedy všechny celočíselné harmonické a úbytek amplitudy vyšších harmonických je lineární, což dělá z pily na harmonické složky nejbohatší základní vlnový tvar. Zní velmi jasně a plně. [11]

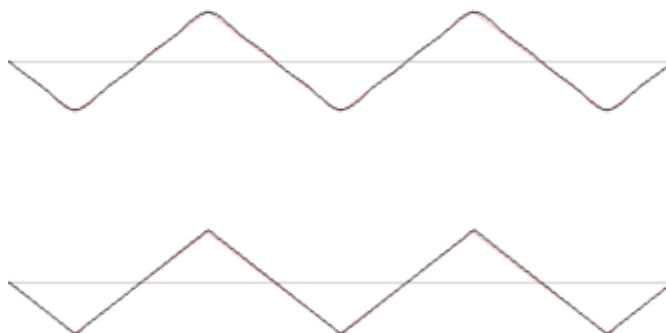
frekvence	f	2f	3f	4f	5f	6f	7f	8f	9f
trojúhelník	1	-	1/9	-	1/25	-	1/49	-	1/81
obdélník	1	-	1/3	-	1/5	-	1/7	-	1/9
pila	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9

Tabulka 7.1: Amplitudy harmonických složek základních tvarů signálů [11]



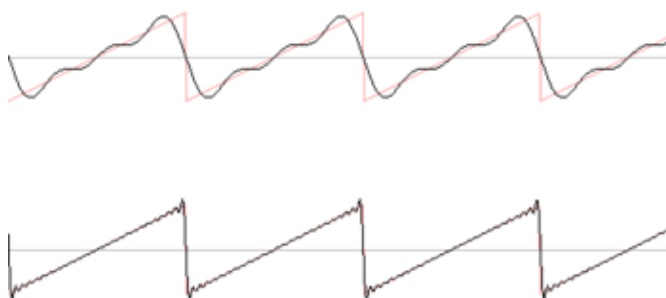
Obrázek 7.2: Grafické znázornění vyšších harmonických složek základních tvarů signálu [11]

Jak je zřejmé z předchozích tabulek, vlny tvarů pily, obdélníku a trojúhelníku lze vytvořit modelováním sinusového signálu pomocí fourierových serií, principem, který byl vysvětlen v kapitole o additivní syntéze. Výsledné vlny nemají ideální tvar pily, obdélníku, či trojúhelníku, ale obsahují již zmiňované vyšší harmonické složky.



*Obrázek 7.3a a 7.3b: Modelování trojúhelníkové vlny pomocí fourierových serií [12]*

Obrázky ukazují trojúhelníkovou vlnu vymodelovanou třemi a deseti členy fourierovy řady. Je vidět, že po desátém členu je tvar již velmi věrný.



*Obrázek 7.4a a 7.4b: Modelování pilkové vlny pomocí fourierových členů [13]*

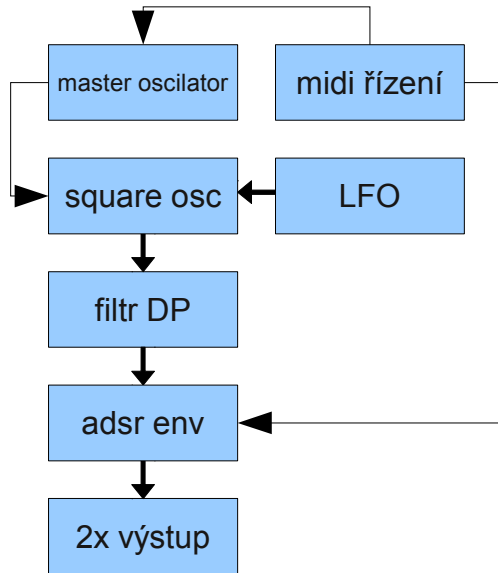


*Obrázek 7.5a a 7.5b: Modelování obdélníkové vlny pomocí fourierových serií [14]*

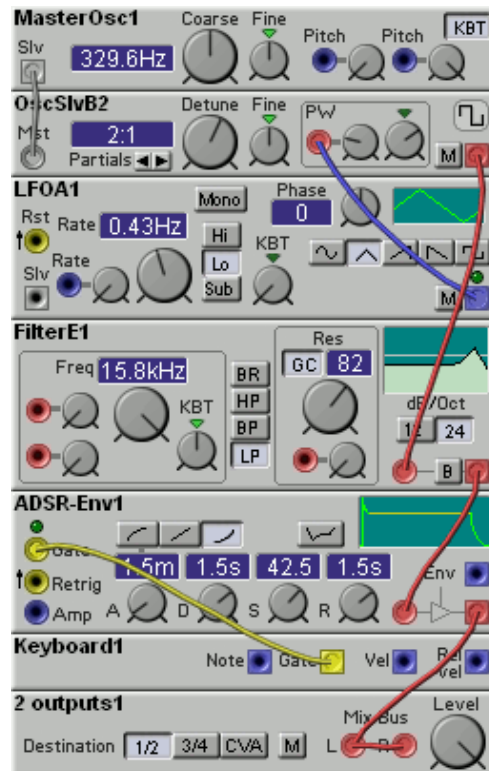
Červená křivka ukazuje ideální tvar obdélníkové vlny a zelená tvar skutečný, na obrázku 7.5a modelovaný třemi fourierovými sériemi a na obrázku 7.5b patnácti fourierovými sériemi. Je vidět, že ani poté není tvar vlny ideální. K odchylkám dochází hlavně v hranách pulzu, kde rozkmit značně převyšuje amplitudu hrany obdélníku. Tuto odchylku nazýváme tzv. Gibbsovým jevem. Nejpatrnější je právě na obdélníkovém pulsu. Projevuje se při aproximaci nespojitých funkcí funkcemi spojitými. Odchylka s použitím vyšších harmonických složek slábne. [15]

## Modelování subtraktivních syntezátorů:

### Sólový nástroj pulse:



Obrázek 7.6: Blokové schéma zvuku pulse

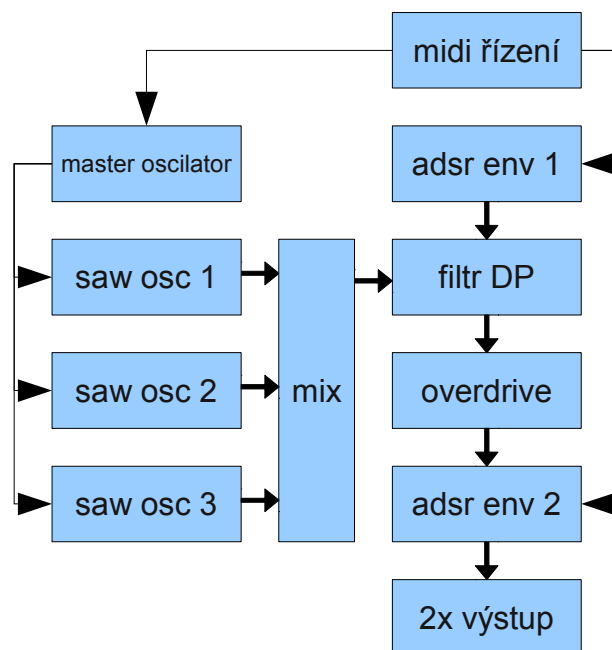


Obrázek 7.7: Schéma zapojení zvuku pulse

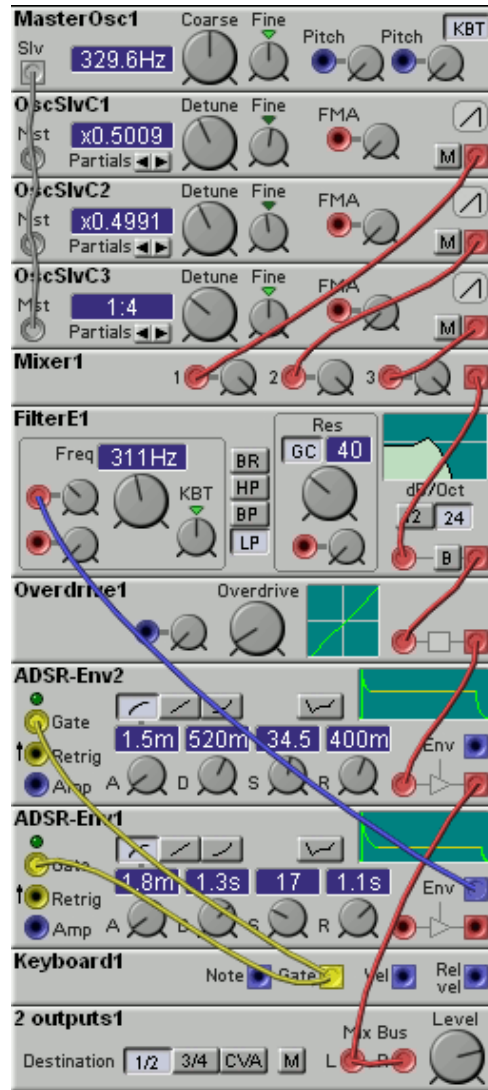
Příklad barvy zvuku, založené na jedné vlně tvaru obdélníku. Jde vlastně o jediný model čistě subtraktivního syntezátoru. Základní tvar obdélníkového pulsu je nadladěn o jednu oktávu vůči řídicí MIDI frekvenci a pomocí nízkofrekvenčního oscilátoru je zde modulována šířka obdélníkového pulsu. Modulační vlna má tvar trojúhelníku a frekvenci 0,43 Hz. Signál dále prochází frekvenčním filtrem typu dolní propust se zvýraznitelným rezonančním kmitočtem a strmostí křivky 24 Db na oktávu. Na konci je zapojen generátor obálky s rychlým náběhem a jeden a půl sekundovým dozněním do amplitudy o hodnotě cca tři čtvrtin hodnoty maximální, po uvolnění klávesy pak jeden a půl sekundovým dozvukem. Na modelu je velmi dobře slyšitelný efekt modulace šířky obdélníkového pulsu PWM. Model produkuje velmi brilantní a efektně znějící barvu zvuku, vhodnou pro sólové party.



### Model emulace analogové basy



Obrázek 7.8: Blokové schéma modelu analogové emulace basy

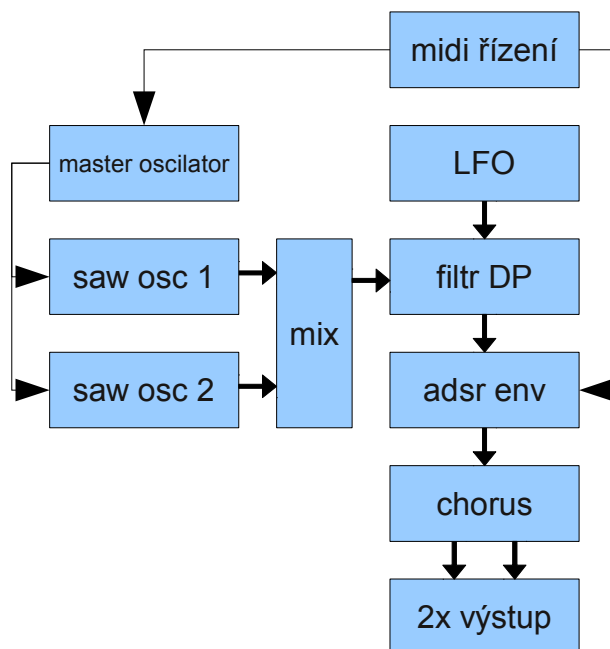


Obrázek 7.9: Realizace modelu analogové emulace basy

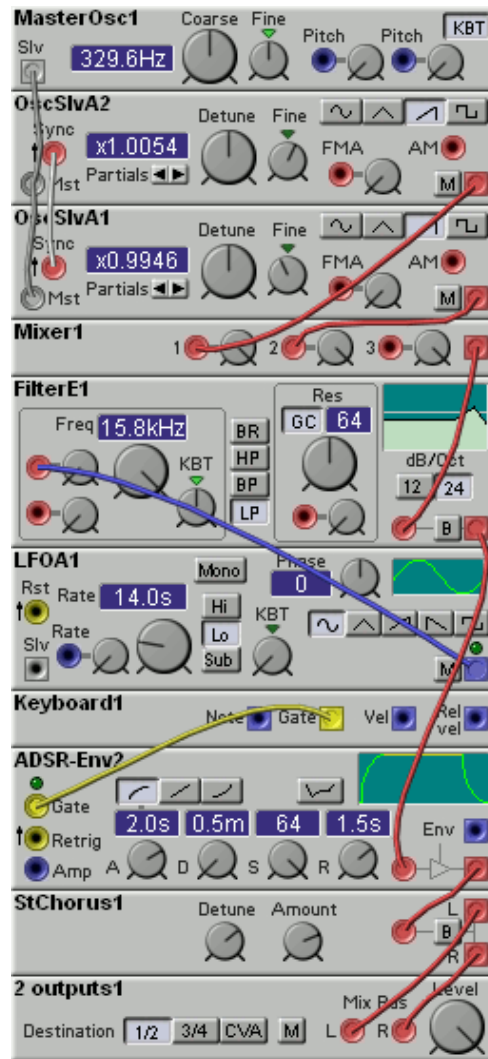
Model je založen ne na jednom, ale na třech oscilátorech, jedná se tedy o subtraktivní syntézu s prvky syntézy additivní, obdobného modelu ovšem využívala většina analogových subtraktivních syntezátorů. Zvuk je založen kompletně na pilových vlnách. V prvních dvou oscilátorech je signál laděn na polovinu frekvence přicházející z MIDI řízení, oba oscilátory jsou vůči sobě velmi jemně rozladěny. Vzájemnou interferencí obou oscilátorů se docíluje efekt pevnějšího a plnějšího zvuku. Oscilátor třetí je oproti prvním dvěma o oktávu podladěn, jeho frekvence tedy činí 1/4 frekvence MIDI řízení. Výsledný signál je smíšen, veden do tradičního DP filtru, poté do procesoru efektu přebuzení a odtud do generátoru obálky a audio výstupu. Pro modulaci frekvence filtru DP je zde použita separátní ADSR obálka s trochu odlišným tvarem průběhu. Na tomto modelu je patrné, proč je subtraktivní syntéza tolik oblíbená. Modifikací pouhých tří parametrů lze docílit naprosto odlišných, velmi dobře znějících barev. Stačí pouze měnit hodnoty frekvence a rezonance filtru DP a hodnotu přebuzení procesoru overdrive. Při vyšších hodnotách overdrive lze velmi dobře emulovat barvy známého basového syntezátoru

Roland TB 303, který právě díky přebuzeným basovým barvám dostal v devadesátých letech velké popularity na techno scéně.

### Emulace elektronických smyčkových ploch



Obrázek 7.10: Blokové schéma modelu emulace elektronických smyčců

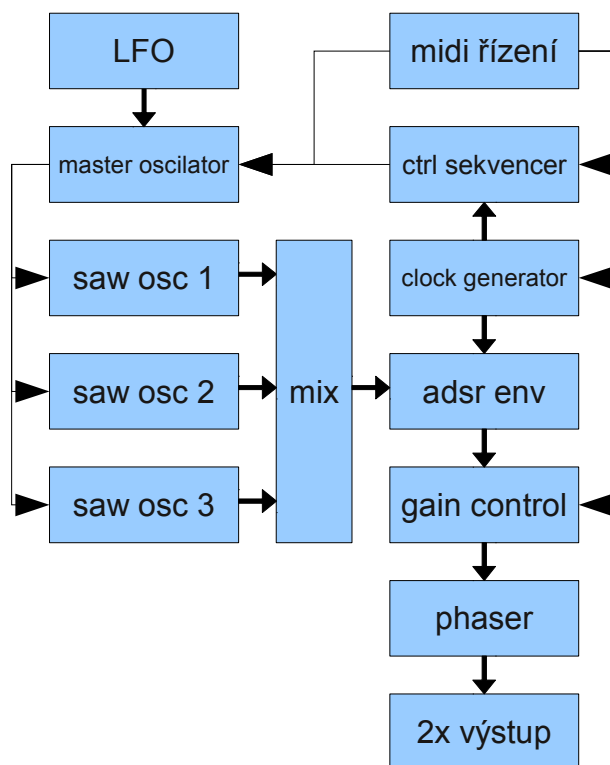


Obrázek 7.11: Realizace modelu emulace elektronických smyčců

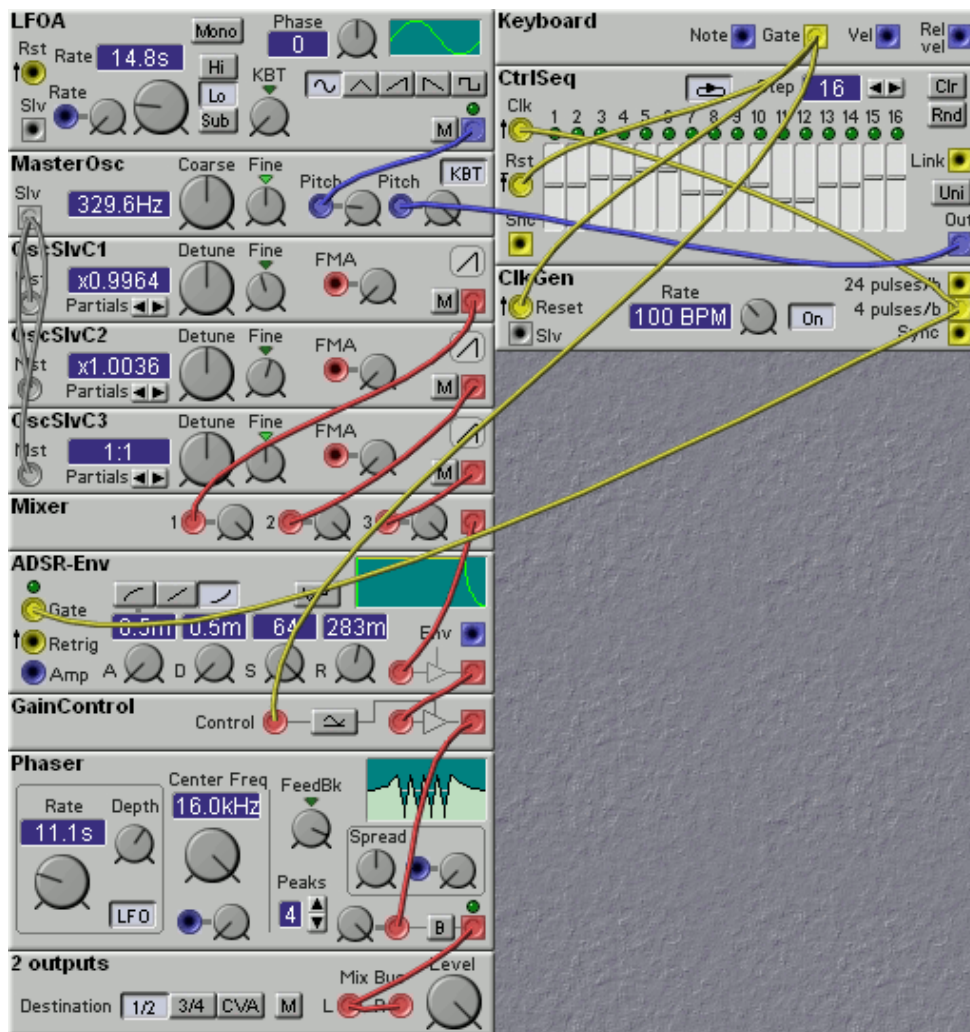
Elektronické smyčce jsou tvořeny dvojicí pilových oscilátorů, u kterých je rovněž, stejně jako u předchozího a většiny dalších modelů využit efekt jemného nadladění a podladění každého z nich o stejnou hodnotu, jejichž signál je po smíšení opět veden do nepostradatelného prvku subtraktivních oscilátorů, filtru DP. U něj je opět, jako většinou zvýrazněn rezonanční kmitočet. Frekvenci filtru lze měnit nízkofrekvenčním oscilátorem se sinusovým tvarem signálu a frekvencí 1/14 Hz. Při zvýšení hodnoty modulace frekvence filtru tímto LFO se docílí velmi příjemného efektu "plynutí" smyčcové plochy, vhodného zejména při velmi dlouhém držení akordu. Při hraní kratších not bude tento efekt, vzhledem k velmi nízké frekvenci LFO, neslyšitelný. Pro smyčce je velmi důležitý specifický tvar obálky, který musí mít pomalý náběh (v našem případě 2 sekundy,) úroveň sustain na maximální hodnotě amplitudy a slyšitelný dozvuk. Zde 1,5 sekundy. Na výstupu je pro větší efekt zapojen procesor chorus.

## Subtraktivní syntezátory se sekvencerem:

### Model Sekvencer v módu arpeggio



Obrázek 7.12: Blokové schéma modelu sekvencer



Obrázek 7.13: Realizace modelu sekvencer

Model analogového zvuku řízeného sekvencerem. Nejedná se ovšem o klasický sekvencer, který by udával danou melodii, která se má přehrát, ale o sekvencer, udávající relativní hodnotu výšky noty, oproti hodnotě noty stisknuté na řídicí MIDI klaviatuře. Sekvencer je tvořen generátorem hodinového pulsu a notovým šestnáctikrokovým sekvencerem. Generátor hodinového pulsu je nastaven na frekvenci 100 BPM, tj. beatů za minutu. Beat je časová hodnota odpovídající jedné čtvrtině taktu. Generátor hodin zde generuje 4 pulsy na beat, což při čtyř čtvrtinovém taktu znamená jeden puls každou šestnáctinu. Tento zdroj hodinového signálu je napojen na šestnáctikrokový notový sekvencer, což znamená, že jeden krok bude znamenat jednu šestnáctinu taktu, celá sekvence se tedy přehraje za jeden takt. U každého kroku notového sekvenceru se udává, o kolik půltónů má být daná nota nadladěna, či podladěna vůči základní frekvenci oscilátoru. Je-li frekvence oscilátoru řízena MIDI signálem, což v našem případě je, bude sekvencerem hraná melodie relativní vůči notě, stisknuté a držené na klaviatuře. Výstup notového sekvenceru musí být zapojen na pitch modulační vstup řídicího master oscilátoru. Podle něj se pak budou shodně přeladovat i frekvence všech podřízených slave oscilátorů. Další podmínkou, aby nám takový

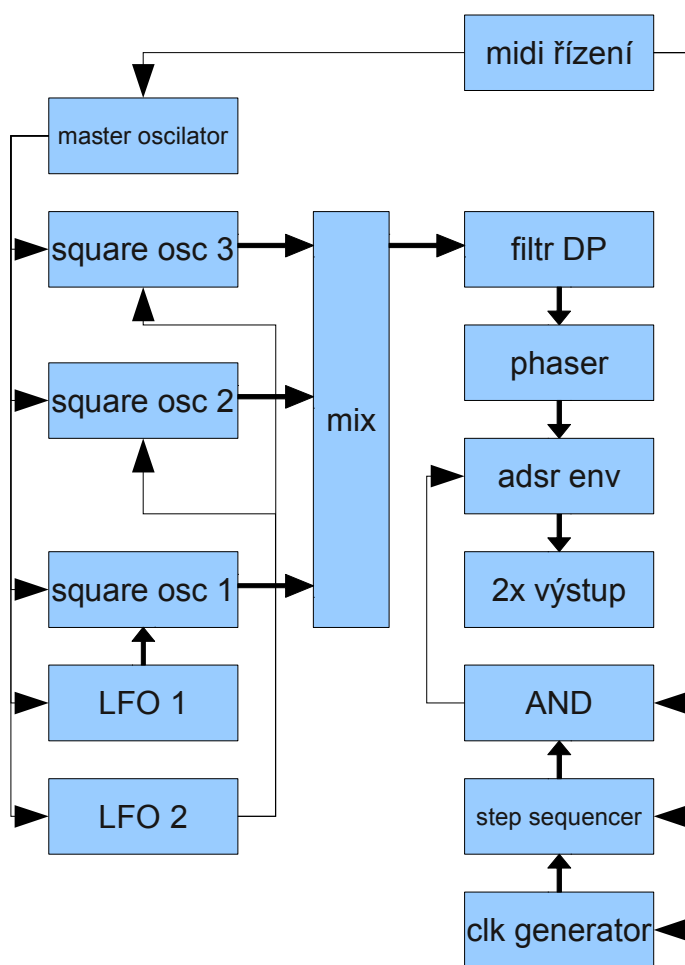
"rozkladový" sekvencer fungoval je ta, že každé šestnáctině musí odpovídat jeden signál otevírající hlasitostní obálku. Toho se docílí zavedením výstupu generátoru hodinového pulsu na gate vstup hlasitostní obálky. Ještě zbývá docílit, aby se celý model spouštěl stiskem klávesy a vypínal jejím uvolněním. K řízení je použit modul řízení audiosignálu signálem kontrolním, který je zapojen za generátor obálky. Signálem kontrolním je v našem případě logický signál gate přicházející z externí MIDI klaviatury. Stejného efektu by se dalo docílit přivedením obou signálů, jak hodinového signálu clock, tak řídicího signálu gate klaviatury na gate vstup hlasitostní obálky přes logický procesor AND, který by zajistil, že hlasitostní obálka by se otevřela pouze při obou vstupních řídicích hodnotách procesoru AND nastavených na hodnotu logickou 1. Tento druhý model řízení sekvenceru je realizován u jednoho z dalších zvuků.

Syntezátor samotný je tvořen třemi pilovými oscilátory, z nichž dva jsou vůči sobě opět jemně rozladěny. Emulujeme-li analogový subtraktivní syntezátor, je občas vhodné, emulovat jej i s chybami, které se u původních, starých železných analogových syntezátorů projevovaly. Jedna z takových chyb byla nestabilita oscilátorů, které se často poněkud rozlad'ovaly. Proto v tomto modelu pomocí nízkofrekvenčního oscilátoru, nastaveného na velmi nízkou hodnotu 1/14,8 Hz emulují právě specifické rozlad'ování starých dinosaurů, jak se dnes původním analogovým syntezátorům říká. Výstup sinusového LFO je zapojen na druhý pitch vstup základního master oscilátoru.

Výstup všech třech pilových oscilátorů je smíšen, veden do generátoru obálky a odtud do filtru phaser. Jedná se o sofistikovanější filtr, složený z více pásmových propustí a zádrží a produkuje velmi zajímavý efekt. Odtud je již signál veden na výstup.

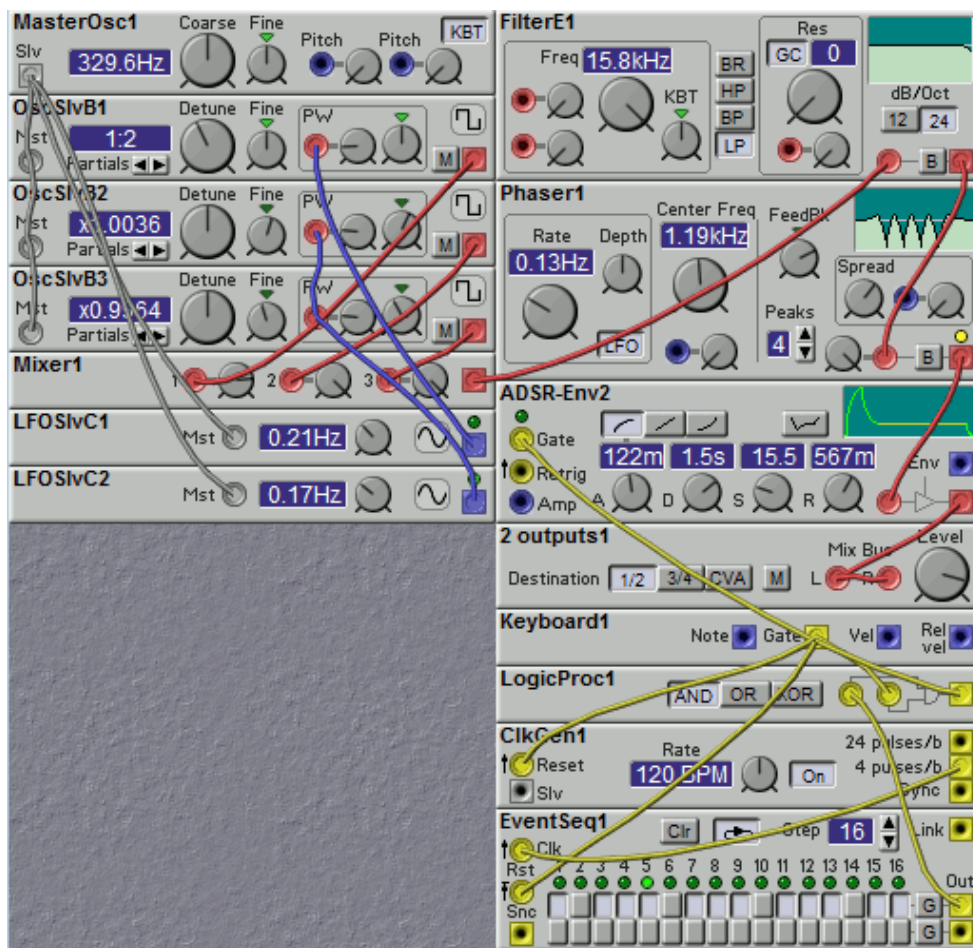
K sekvenceru nutno dodat, že je naprogramován tak, aby hrál vždy dvojice shodných tónů a to o frekvenci základní, poté o jednu oktávu nadladěných, poté o dvě oktávy nadladěných, poté o jednu oktávu podladěných, poté o frekvenci základní, poté o dvě oktávy podladěných, poté opět o frekvenci základní a nakonec o jednu oktávu nadladěných. Přehrávání sekvencí se spouští vždy stiskem klávesy na externí klaviatuře a trvá po dobu jejího stisku. Tímto stylem se na Modularu dají programovat i rozklady akordů, tzv. arpeggia. Po stisku příslušné noty pak zazní rozklad naprogramovaného akordu, odvíjející se od stisknuté noty.

## Sekvencovaná elektronická plocha



obrázek 7.14: Blokové schéma modelu elektronické sekvencované plochy



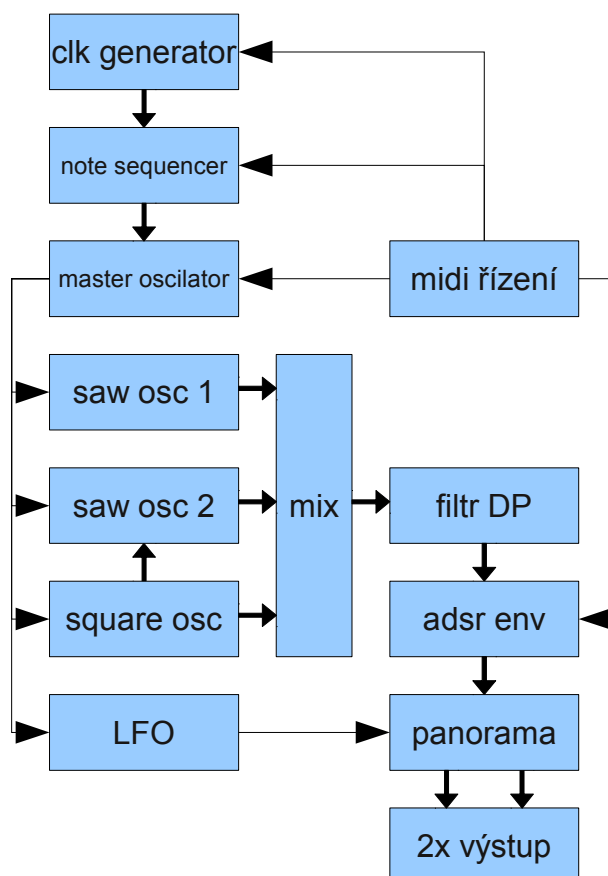


Obrázek 7.15: Realizace modelu elektronické sekvencované plochy

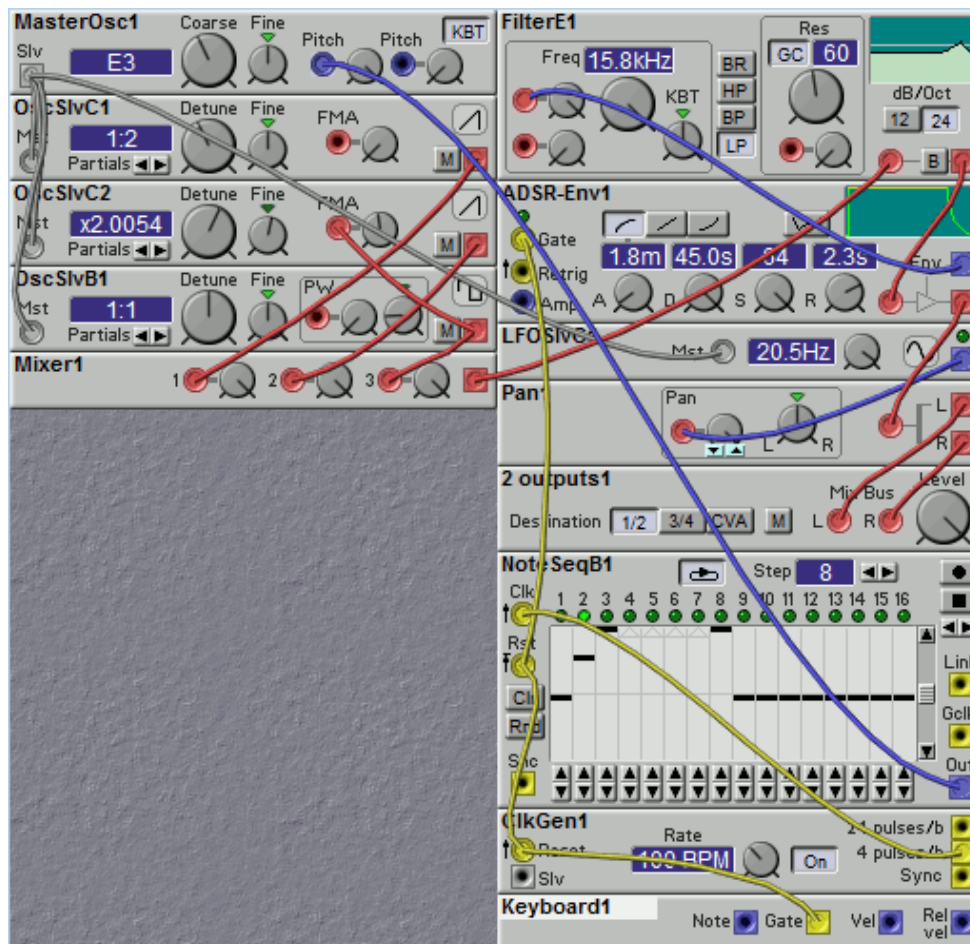
Zvuk je založen na třech oscilátorech, generujících obdélníkovou vlnu. První oscilátor je podladen o oktávu, druhé dva jsou na frekvenci základní a opět, jak bývá u subtraktivních syntezátorů zvykem, vůči sobě jemně rozladěny. Šířka pulzu všech třech oscilátorů je modulována nízkofrekvenčními oscilátory, generujícími sinusovou vlnu. První oscilátor modulujeme frekvencí 0,21 Hz, druhý a třetí stejným LFO o frekvenci 0,17 Hz. Signál je smíšen, prochází filtrem DP, poté phaserem a nakonec generátorem obálky a odtud do výstupu. Spínání zvuku je řízeno jednak klasicky MIDI signálem z externí klaviatury, ale zároveň rytmickým sekvencí. Ten je opět řízen hodinovým generátorem produkujícím 4 pulzy na beat, to jest jeden puls každou šestnáctinu taktu. Šestnáctikrokový rytmický sekvencer umožňuje u každého kroku buďto zapnout, či vypnout pulz. Výsledkem je tedy rytmická sekvence pulzů o frekvenci 1/16 taktu. Výstup krokového sekvenceru je zapojen na gate signál generátoru hlasitostní obálky. Výška tónu je řízena pouze MIDI klaviaturou, avšak stisk klaviatury neotvírá hlasitostní obálku, ale spouští rytmickou sekvenci, řízenou krokovým sekvencí. Spínání sekvenceru je realizováno druhým způsobem, popsaným u předchozího modelu, kdy logické signály sekvenceru a signálu gate externí MIDI klaviatury jsou vstupy logického procesoru AND, který otevře výstup pouze v okamžicích, kdy jsou na obou

vstupech kladné hodnoty. Výsledný zvuk by se dal popsat jako rytmicky přerušovaný zvuk elektronické plochy, zvolna měnící své harmonické složení, díky nízkofrekvenční integrované modulaci efektu phaser. Jedná se o zvukový efekt velmi typický pro styl trance. Filtr DP je v základním nastavení zcela otevřen, v hudbě lze jeho zavření a postupné otevírání použít k efektu pomalého vmíchávání, nástupu nástroje, místo postupného zesilování. Docílí se tím mnohem zajímavějšího nástupu, kdy zvuk jakoby vychází ze stínu.

### Model experimentálního melodického arpeggia



Obrázek 7.16: Blokové schéma modelu melodického arpeggia



Obrázek 7.17: Realizace modelu melodického arpeggia

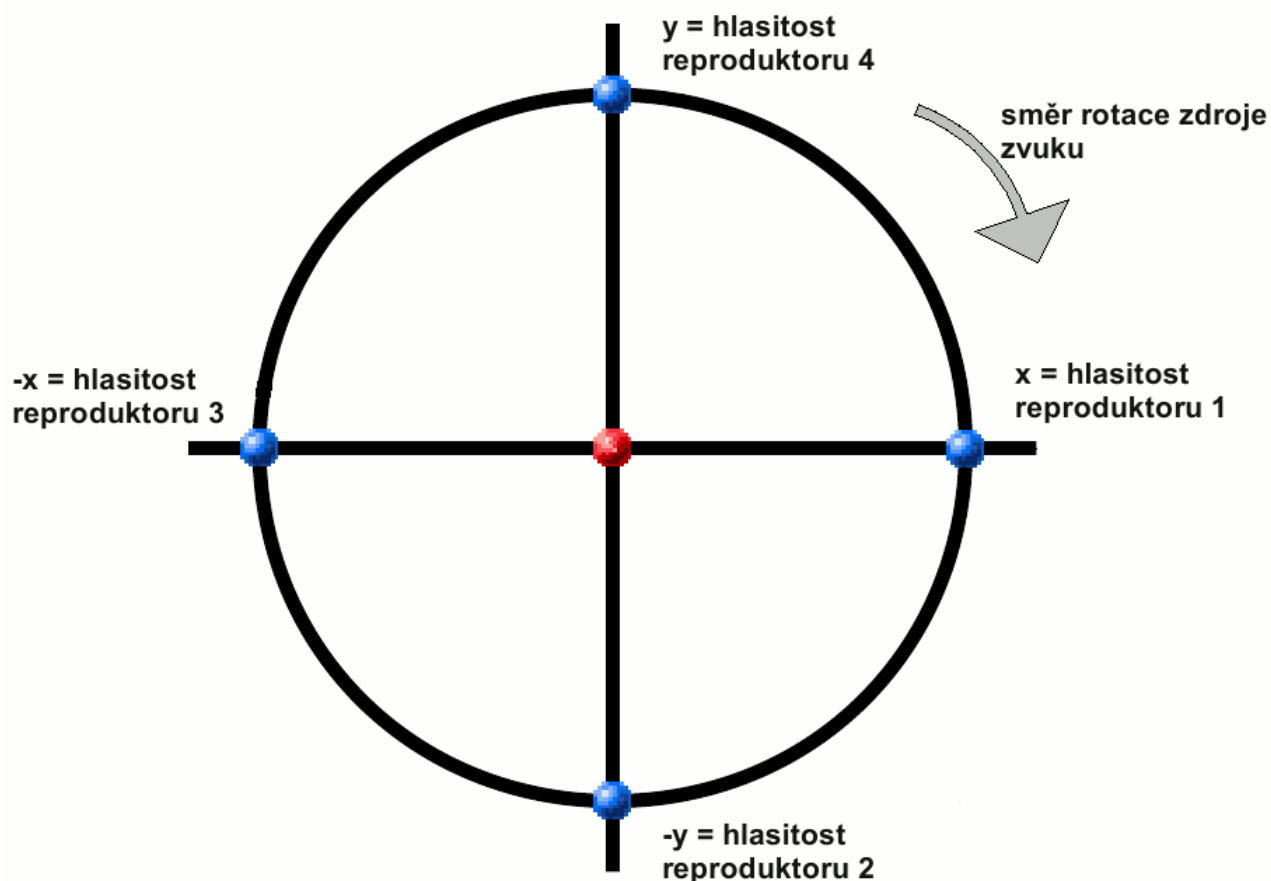
Experimentální model melodického arpeggia je zajímavou formou použití melodického sekvenceru. V předchozích modelech jsme použili jednou model řízení rytmu i melodie pomocí patternových sekvencí, podruhé řízení sekvencí pouze rytmu hry a v tomto třetím modelu je použit melodický sekvencer bez řízení rytmu hry, což znamená, že po stisknutí klávesy na externí MIDI klaviatuře je přehráván tón, který i po dobu držení klávesy mění svou frekvenci dle melodického rozkladu naprogramovaného v notovém sekvenceru. Krok sekvenceru je nastaven na dobu jedné šestnáctiny taktu, naprogramováno je osm kroků, které se cyklí, což znamená, že během jednoho taktu se melodická sekvence stihne přehrát dvakrát. Relativní ladění jednotlivých kroků je nastaveno na 0, 7, 12, 19, 24, 31, 36 a 12 půltónů vůči původnímu stisknutému tónu. Syntezátor samotný se skládá ze dvou pilových oscilátorů a jednoho oscilátoru obdélníkového. První pilový oscilátor je podladěn o oktávu, druhý o oktávu nadladěn a navíc ještě jemně rozladěný. Obdélníkový oscilátor pracuje na základní frekvenci a jeho signál je jednak smíšen se signálem zbylých dvou oscilátorů, ale zároveň je i zaveden do FM modulačního vstupu druhého pilového oscilátoru. Jedná se tedy o kombinaci subtraktivní a FM syntézy. Dále je zvuk veden do tradičního DP filtru s rezonancí a generátoru hlasitostní obálky. Zajímavým prvkem je modul stereobáze,

řízení nízkofrekvenčním oscilátorem produkujícím sinus o frekvenci 20,5 Hz. Znamená to, že zvuk 20x za sekundu přeletí mezi pravým a levým reproduktorem. To je pro lidské ucho pohyb příliš rychlý, než aby jej postřehlo, avšak vytvoří zajímavý psychoakustický efekt prostorového rozložení zvuku ve stereobázi. U hlasitostní obálky je ponechán téměř dvou a půl sekundový dozvuk, což stačí k vytvoření velmi zajímavého dojmu jakési melodické ozvěny i při velmi krátkém stisku klávesy. Model je vhodný pro zajímavé hudební experimenty.

## 8 Model rotace zdroje zvuku

Nord modular disponuje čtyřmi výstupními audio kanály. To umožňuje napojení na až čtyři samostatně řízené reproduktory, které mohou tvořit kvadrofonickou soustavu, což umožňuje programování pohybu zvuku ve dvourozměrném prostoru.

Rozhodl jsem se vytvořit modul simulující rotaci zvuku v prostoru mezi reproduktory. Pohyb zvuku v při rotaci lze přirovnat k pohybu bodu po kružnici. Pro názornost přikládám schéma, modré body představují ideální rozmístění reproduktorů a červený bod uprostřed ideální polohu posluchače ve středu systému. Okamžitou hlasitost jednotlivých reproduktorů (bodů) lze vyjádřit zápisem souřadnic  $x$ ,  $y$  pro momentální polohu bodu.



Obrázek 8.1: Diagram rotace zdroje zvuku

Již na první pohled je patrné, že hlasitost reproduktorů lze řídit pomocí goniometrických funkcí.

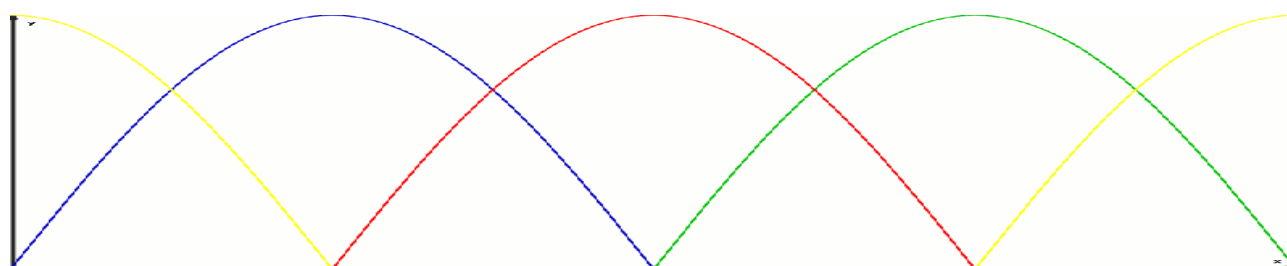
Pro reproduktor 1 platí, že hlasitost  $A_1 = |\cos x| \langle 0;1 \rangle$

Pro reproduktor 2 platí, že hlasitost  $A_2 = |-\sin x| \langle -1;0 \rangle$

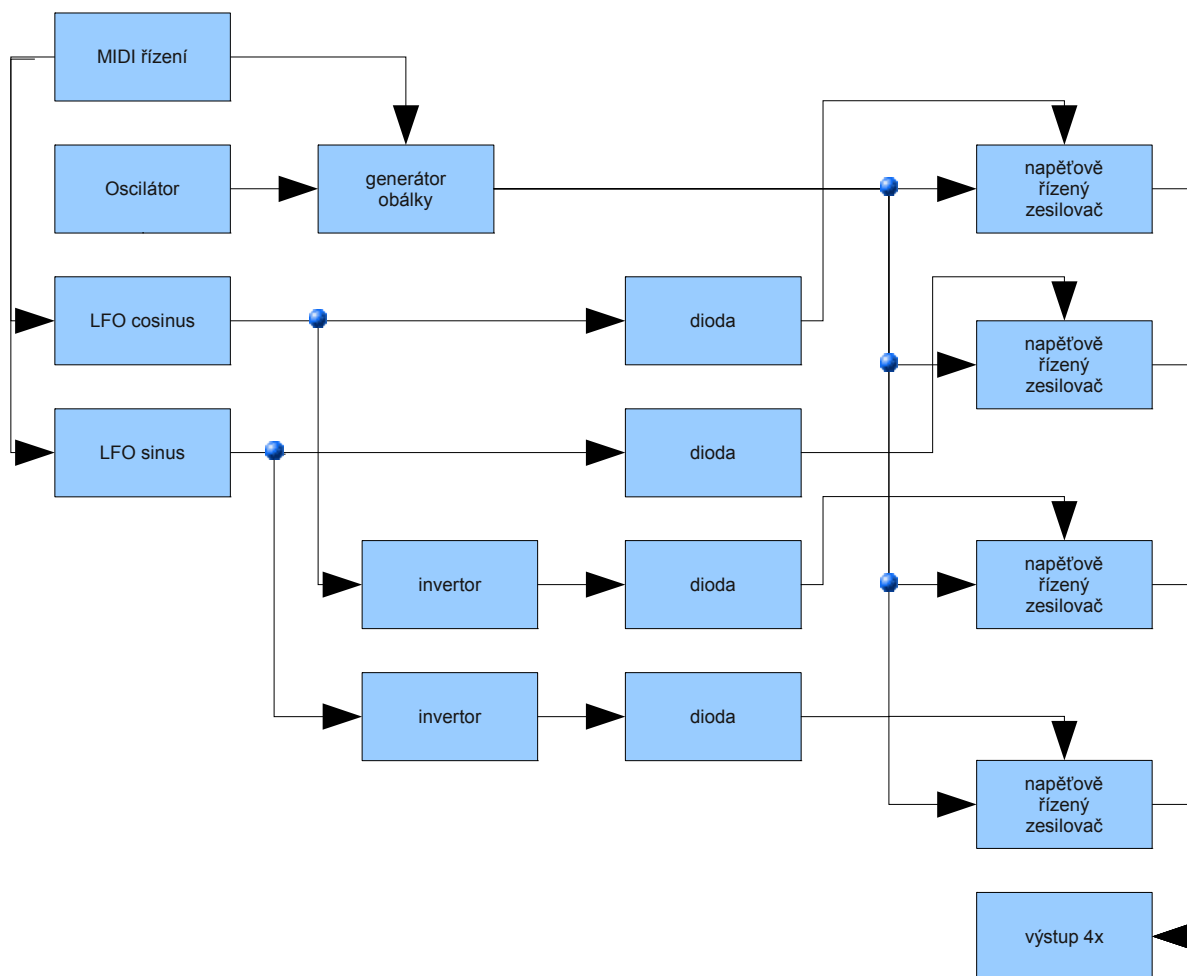
Pro reproduktor 3 platí, že hlasitost  $A_3 = |-\cos x| \langle -1;0 \rangle$

Pro reproduktor 4 platí, že hlasitost  $A_4 = |\sin x| \langle 0;1 \rangle$

Základem systému řízení tedy budou dva nízkofrekvenční oscilátory, generující sinusový signál o shodné frekvenci, vzájemně fázově posunuty o  $\pi/2$  které jsou mezi sebou synchronizovány. Jejich výstup pak bude transformován do čtyř řídicích signálů pro jednotlivé audiokanály. Ty pak budou přivedeny řídicí vstupy napěťově řízených zesilovačů, jejichž vstupem bude audiosignál, jehož pohyb budeme řídit. Žlutá barva na obrázku 8.2 znázorňuje hlasitost reproduktoru 1, modrá barva reproduktoru 2, červená reproduktoru 3 a zelená reproduktoru 4. Modrá a zelená složka jsou de facto diodou "usměrněným" sinusovým signálem a červená se žlutou "usměrněným" cosinus signálem.



Obrázek 8.2: Hlasitostní křivky jednotlivých reproduktorů



Obrázek 8.3: Blokové schéma modelu rotace zdroje zvuku

Jako zdroj audio signálu jsem použil oscilátor generující sinusový průběh. Signál z něj přichází do generátoru hlasitostní obálky, která je řízena MIDI signálem z klávesnice, popřípadě sekvenceru. Pak se rozděluje do čtyř napěťově řízených zesilovačů, které udávají hlasitost jednotlivých audio kanálů. Ty jsou propojeny s modulem čtyř nezávislých audio výstupů. Ty je nutno propojit s kvadrofonní zesilovací a reprosoustavou.

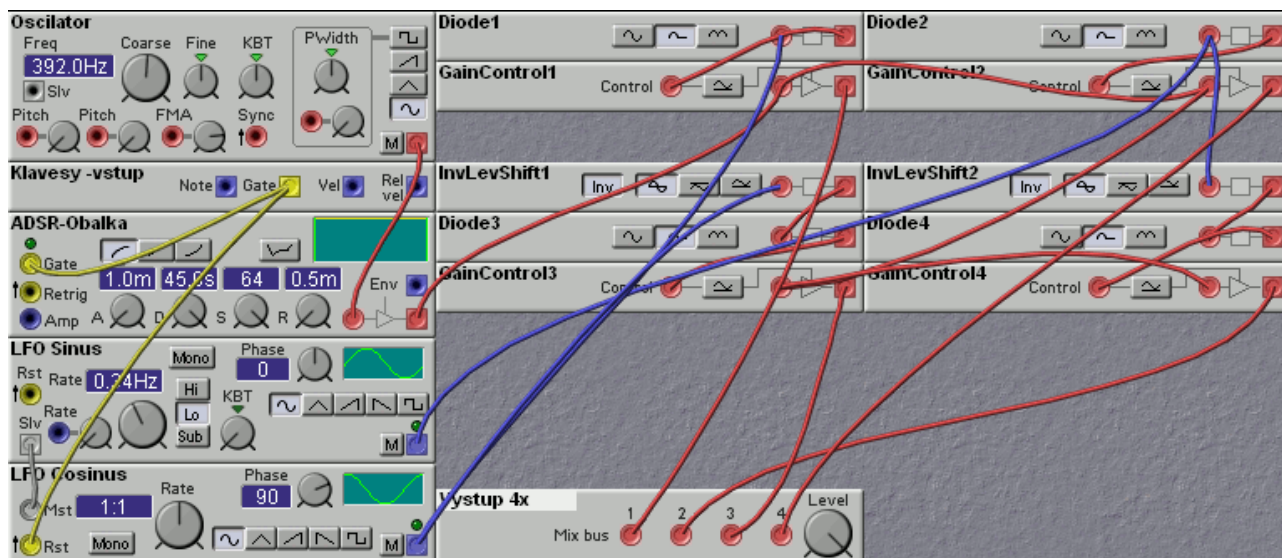
Řízení hlasitosti jednotlivých napěťově řízených zesilovačů probíhá pomocí dvou nízkofrekvenčních oscilátorů (LFO), generujících signál o velmi nízké frekvenci. V našem případě 0,34 Hz. Oba oscilátory jsou naladěny na shodnou frekvenci, avšak druhý je fázově posunut o  $\pi/2$ , což z něj dělá de facto generátor funkce cosinus. Pro správnost fungování systému je nutno shodně nastavit počátek oscilací obou LFO, aby jejich vibrace byly synchronizované a fázový posuv byl skutečně  $\pi/2$ . To se děje nastavením synchronizačního impulsu, kterým je v našem případě

inicializační MIDI signál. Tolik ke zdroji řídicího signálu.

Rotaci započneme na reproduktoru jedna. V tomto bodu musí být úroveň řídicího signálu pro kanál 1 na maximální úrovni. Úrovni hlasitosti pro reproduktor 1 odpovídají kladné hodnoty funkce cosinus pro osu x. Proto na vstup napětově řízeného zesilovače pro kanál 1 přivedeme audio výstup LFO oscilátoru, fázově posunutého o  $\pi/2$ . Napřed však musíme odfiltrovat zápornou složku signálu, což uděláme zapojením diody jako jednocestného usměřovače mezi výstup LFO a vstup napětově řízeného zesilovače prvního kanálu. Řídicí signál pro reproduktor číslo 2 odpovídá hodnotám  $|\sin x| \langle -1; 0 \rangle$ . Budeme tedy potřebovat zápornou půlplnu sinusového signálu, ovšem v kladných hodnotách. Vezmeme tedy signál z LFO generujícího sinus a za něj zapojíme audio invertor. Ten nám převrátí zápornou půlplnu sinu na kladnou a kladnou na zápornou. Kladné, ze které se nám nyní stala záporná se poté opět zbavíme diodou, zapojenou jako jednocestný usměřovač. Výsledný signál už můžeme přivést na řídicí vstup napětově řízeného zesilovače pro audio kanál 2. Pro třetí kanál použijeme opět LFO generující funkci cosinus, ovšem tentokrát budeme potřebovat jeho zápornou půlplnu.  $|\cos x| \langle -1; 0 \rangle$ . Proto znovu napřed použijeme invertor audio signálu, který nám zápornou půlplnu dostane do kladných hodnot a kladné do záporných a původně kladné, nyní záporné hodnoty funkce cosinus, odfiltrujeme jednocestným usměřovačem. Takto získaný řídicí signál přivedeme na vstup napětově řízeného zesilovače kanálu 3. Konečně čtvrtý audio kanál bude řízen hodnotami, odpovídajícími kladné půlplně sinusového signálu  $|\sin x| \langle 0; 1 \rangle$ , proto pro řízení použijeme signál LFO generující sinus a jednocestným usměřovačem se zbavíme druhé, záporné půlplny. Tím získáme řídicí signál pro napětově řízený zesilovač čtvrtého audio kanálu.



## Realizace modelu rotace zvuku pomocí systému Clavia nord modular:



Obrázek 8.4: Realizace modelu rotace zdroje zvuku

Jako zdroj audio signálu je použit oscilátor generující sinus. Odtud je signál veden do generátoru ADSR obálky, který je řízen signálem Gate z klaviatury, či sekvenceru, připojeného na vstup MIDI IN. Stisk klávesy, tedy spuštění noty, tak otvírá průchod signálu generátorem obálky. Ten je dále veden do čtyř napěťově řízených zesilovačů, které jsou napojeny na výstupní panel audio sběrnice s regulovatelnou úrovní výstupní hlasitosti. Zdrojem řízení rotace signálu jsou dva nízkofrekvenční oscilátory LFO, první v režimu master a pevně nastavenou frekvencí 0,34 Hz generující sinus a druhý, s ním spojený v režimu slave s děličem nastaveným na poměr 1:1 slave / master, což znamená, že osciluje na frekvenci shodné s master LFO oscilátorem. Tvar signálu tohoto oscilátoru je nastaven rovněž na sinus, ovšem s fázovým posunem 90°, což z něj dělá generátor signálu cosinus. Synchronizace počátku oscilací obou nízkofrekvenčních oscilátorů je zajištěna signálem Rst. Jako jeho zdroj je použit vstupní signál Gate z klávesnice, popřípadě jiného zdroje MIDI řízení.

Signál pro řízení audio kanálu 1 je veden z LFO generujícího cosinus, poté usměrněn jednocestným usměrňovačem a přiveden na vstup napěťově řízeného zesilovače. Řídicí signál pro audio kanál 2 přivádíme z LFO generujícího sinus, poté otočíme kladnou půlvlnu do záporné a zápornou do kladné audio invertorem a nakonec odstraníme první půlvlnu, po inverzi nabývajících záporných hodnot, jednocestným usměrňovačem. Audio kanál 3 používá pro řízení, stejně jako audio kanál 1, za zdroj LFO s cosinovým tvarem signálu, ovšem tentokrát je signál invertován, poněvadž potřebujeme opět záporné hodnoty signálu. Nepotřebné části signálu se poté opět zbavíme jednocestným usměrňovačem. Signál řízení audio kanálu 4 odpovídá kladné půlvlně

sinusového signálu, proto použijeme LFO sinus a pouze v jednocestném usměrňovači odstraníme zápornou půlvlnu. Audio výstupy všech čtyř kanálů jsou vedeny do modulu 4x out.

Rychlost rotace zvuku lze řídit změnou frekvence LFO sinus. Frekvence druhého nízkofrekvenčního oscilátoru se mění v závislosti na frekvenci LFO řídicího, je totiž zapojen v režimu slave, funguje tedy pouze jako dělič s nastavením poměru 1:1. Rychlost oběhu tónu kolem posluchače sedícího uprostřed kvadrofonní reprosoustavy tedy v našem případě činí 0,34 Hz. Pro funkčnost systému je nutné dodržet pořadí rozmístění reproduktorů dle schématu na obrázku 1. Fiktivní zdroj zvuku v našem zapojení rotuje po smyšlené kružnici, jak ukazuje šipka na obrázku 1, ve směru otáčení hodinových ručiček. Změnu směru rotace lze docílit prohozením audiosignálů vedených do reproduktorů. Signál audio kanálu 1 bychom ponechali, signál audio kanálu 2 zapojili na reproduktor číslo 4, audio kanál 3 bychom opět ponechali a audio kanál 3 zapojili na reproduktor číslo 2.

## 9 Zhodnocení a závěr

### Vyhodnocení praktických kapitol

#### **Additivní syntezátor:**

Additivní syntéza je jednou ze základních metod syntézy zvuku, ale pro napodobování skutečných nástrojů není pro přílišnou komplikovanost skutečně věrné realizace příliš vhodná. V praxi se používá především pro emulaci varhanních barev, podobně jako jí bylo použito v posledním sestrojeném modulu.

#### **FM syntezátor:**

FM syntéza je vhodná pro tvorbu kovově znějících barev, jako například emulace zvonu, též se s ní dá docílit velmi dobrých pevně znějících basových zvuků, elektrických pian, rovněž zdařilé jsou emulace strunných spekter, cembal a podobně. To je ovšem pouze velmi řídký výčet schopností FM syntézy, která je svým charakterem velmi komplexní a dá se jí napodobit celá škála zvukových spekter. Vždyť nejsou daleko doby, kdy do zvukových karet byly osazovány OPL chipy firmy Yamaha, ve kterých bylo emulováno celé spektrum 128 nástrojů odpovídajících standartu General MIDI. Výsledek nebyl, pravda, nikterak ohromující, ale i přesto něco vypovídal o šíři možností nasazení této metody syntézy zvuku.

#### **Subtraktivní syntezátor:**

Subtraktivní syntéza je pro svou jednoduchost nejdědnější a snadno programovatelná a už při poslechu zvuků lze rozpoznat, že zde je nejsilnější stránka Nord Modularu. Ostatně hlavním účelem Modularu má být emulace modulárních analogových subtraktivních syntezátorů a tento účel také velmi dobře plní. Subtraktivní syntéza je naprosto nevhodná pro napodobování zvukových barev skutečných hudebních nástrojů, ty nezní příliš věrohodně, ale její hlavní síla je právě v již zmiňovaném vytváření zcela nových, synteticky znějících barev.

#### **Rotace zvuku:**

Tato kapitola je spíše zajímavostí na závěr celé práce a nastiňuje základy práce s kvadrofonním prostorem. Rotaci zvuku, jak je zřejmé, nelze realizovat na klasických stereofonních reprosoustavách, ale je možné ji implementovat na systém 5+1 používaný pro domácí kina. Tento modul je pouze modulem řídicím, šlo jen o implementaci řízení pohybu zvuku ve dvourozměrném poli. Jako zdroj je zde užit jen generátor sinusového průběhu. Pro použití

v hudební praxi by však bylo mnohem vhodnější jako zdroj použít sofistikovanějšího tónového generátoru, virtuálního modelu syntezátoru s předprogramovanou barvou tónu. Kupříkladu melodická sekvence uchu libého zabarvení tónu, rotující kolem posluchačovy hlavy by mohla být příjemným zpestřením poslechu a oživujícím prvkem moderní elektronické hudby. Problémem kvadrofonních soustav všeobecně je náročnost poslechu. Předpokládá odpovídající prostor s vhodným rozmístěním reproduktorů a nepohybujícím se posluchačem, umístěným ve středu této soustavy. Při pohybu posluchače ze středu pomyslné kružnice dochází ke zkreslení iluze rotace a celý efekt mizí. Proto kvadrofonní poslechové soustavy dosud nenašly širšího komerčního využití, s výjimkou filmového zvuku a hudby, kdy je celá složitá reprosoustava systému 5:1 instalována v kinosálu, kde posluchači příliš nechodí. Dostupnější verzí tohoto řešení jsou právě tzv. domácí kina.

### **Závěr**

Při výběru tématu jsem se snažil, aby má závěrečná práce nebyla pouze prací šuplíkovou, prací pro práci samou, nutným zlem nezbytným pro dokončení vysokoškolského studia po jejímž vypracování si člověk oddychne, zahodí ji a už v životě se k ní ani on, ani nikdo jiný nevrátí. Výsledkem práce jsou programy syntezátorových modulů, virtuální hudební nástroje, pomocí nichž lze komponovat hudbu na všech syntezátorových systémech Nord Modular. Programy lze použít jak jako celek, tak je modifikovat, či je použít pouze jako inspiraci při tvorbě jiných syntezátorových modelů. Práce tak rozhodně není prací mrtvou.

## Seznam použité literatury a zdrojů

[1] - Syntezátor. In *Wikipedia : the free encyclopedia [online]*. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 12. 2. 2006, last modified on 23. 9. 2010 [cit. 2010-12-18]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Syntezátor>>.

[2] - FORRÓ, Daniel. *MIDI - Komunikace v hudbě*. Praha : Grada, 1993. 272 s. ISBN 80-85623-56-0.

[3] - WiFiMorava. *WiFiMorava [online]*. 17. 10. 2005 [cit. 2010-12-21]. DIN konektory. Dostupné z WWW: <<http://internet.vprdeli.com/view.php?cisloclanku=2005101703>>.

[4] - Clavia DMI AB. *Www.clavia.se [online]*. 1995 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: <[www.clavia.se](http://www.clavia.se)>.

[5] - Clavia DMI AB. *Nord Modular Owner's Manual, Version 3.0 [online]*. Clavia DMI AB BOX 4214 SE-102 65 Stockholm SWEDEN : © Clavia DMI AB, 1999 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.nordkeyboards.com/downloads/manuals/nord\\_modular/nord\\_modular\\_v3.0\(eng\).pdf](http://www.nordkeyboards.com/downloads/manuals/nord_modular/nord_modular_v3.0(eng).pdf)>.

[online]. Clavia DMI AB BOX 4214 SE-102 65 Stockholm SWEDEN : © Clavia DMI AB, 1999 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: < [http://www.nordkeyboards.com/downloads/manuals/nord\\_modular/nord\\_modular\\_v3.0\(eng\).pdf](http://www.nordkeyboards.com/downloads/manuals/nord_modular/nord_modular_v3.0(eng).pdf) >.' />

[6] - *Fourierova analýza [online]*. 2009-05-18 [cit. 2010-12-13]. *Fourierova analýza*. Dostupné z WWW: <<http://jlswebs.wordpress.com/2009/05/18/fourierova-analyza/>>.

[7] - BENSON, Dave. *Music: A Mathematical Offering [online]*. University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UE, Scotland, UK : c Dave Benson 1995–2008, 14. 12. 2008 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.maths.abdn.ac.uk/~bensondj/html/math-music.html>>.

[8] - *IEEE Global History Network [online]*. 11. 9. 2008 [cit. 2010-12-21]. *FM Radio*. Dostupné z WWW: <[http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/FM\\_Radio](http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/FM_Radio)>.

[9] - *Wikimedia Commons* [online]. 30. 10. 2008 [cit. 2010-12-21]. YAMAHA DX7.jpg. Dostupné z WWW: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:YAMAHA\\_DX7.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:YAMAHA_DX7.jpg)>.

[10] - *File:Waveforms.svg*. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : *Wikipedia Foundation*, 23. 10. 2006 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Waveforms.svg>>.

[11] - *Www.angelfire.com* [online]. 25. 6. 1997 [cit. 2010-12-21]. *Subtractive synthesis*. Dostupné z WWW: <<http://www.angelfire.com/in2/yala/2ansynth.htm#VCO>>.

[12] - *File:Synthesis triangle.gif*. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : *Wikipedia Foundation*, 19. 12. 2005 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Synthesis\\_triangle.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Synthesis_triangle.gif)>.

[13] - *File:Synthesis sawtooth.gif*. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : *Wikipedia Foundation*, 19. 12. 2005 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Synthesis\\_sawtooth.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Synthesis_sawtooth.gif)>.

[14] - *Commons*. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : *Wikipedia Foundation*, 1. 4. 2010 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/SquareWave.gif>>.

[15] - *Square wave*. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : *Wikipedia Foundation*, 28. 10. 2010 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Square\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Square_wave)>.

## Příloha 1: Použité moduly

### Oscilátor A



Samostatný oscilátor generující audiosignál volitelného průběhu s možností vstupu externího signálu udávajícího rozladění, vstupu frekvenční modulace a při použití obdélníkového průběhu i modulace šířky pulsu. Dalšími parametry modulu jsou frekvence a jemné rozladění. KBT určuje způsob propojení oscilátoru s externí klaviaturou. Je-li KBT nastaveno na OFF, oscilátor bude generovat tón o frekvenci dané nastavením modulu. Při nastavení KBT na 1x bude frekvence odpovídat výšce tónu stisknutého na externí klaviatuře. Při hodnotách KBT vyšších, nebo nižších nebude ladění odpovídat přesně výšce hraného tónu, například při hodnotě KBT nastavené na 2x oscilátor při stisknutí tónu o oktávu vyšším, nežli je tón základní, zahraje tón ne o jednu, ale o dvě oktávy vyšší. Jedná se de facto o změnu strmosti ladění klaviatury. [5]

### Master Oscilátor



Master oscilátor je řídicí oscilátor, který se používá při použití více oscilátorů najednou a potřebě šetřit výpočetní výkon procesorů Nord Modularu. Stejně jako oscilátor A disponuje nastavením pro hrubé a jemné ladění a vstupem externího signálu udávajícího rozladění. KBT je zde redukováno na tlačítko, které pouze zapíná a vypíná propojení oscilátoru s externí klaviaturou, strmost ladění externí klaviaturou není možno ovlivnit. Chybí zde audio výstup, oscilátor je určen pouze pro řízení frekvence na něm závislých Slave oscilátorů. [5]

### Slave Oscilátor A



Slave oscilátor A je řízený oscilátor, který musí být spojen s řídicím Master oscilátorem udávajícím jeho frekvenci. U Slave oscilátoru se pak nastavuje pouze frekvence poměrná k frekvenci řídicího oscilátoru a jemné rozladění. K dispozici jsou rovněž vstupy pro frekvenční a amplitudovou modulaci. Oscilátor Slave A může produkovat signály tvaru sinus, trojúhelník, pila, nebo obdélník. [5]

### Oscilátor Slave C



Oscilátor Slave C je řízený oscilátor produkující pilový tvar signálu. Jeho parametry jsou relativní rozladění, jemné rozladění a vstup frekvenční modulace. [5]

### Oscilátor Slave B



Oscilátor Slave B je řízený oscilátor produkující obdélníkový tvar signálu. Jeho parametry jsou relativní rozladění, jemné rozladění a blok pro vstup a nastavení modulace šířky obdélníkového pulzu. [5]

### Oscilátor Slave FM



Oscilátor Slave FM je řízený oscilátor produkující sinusový tvar signálu. Jak již název napovídá, jeho nejčastější použití je FM syntéza. Jeho parametry jsou relativní rozladění, jemné rozladění a vstup pro frekvenční modulaci. [5]



## Oscilátor Sine Bank



Sinusová banka je blokem šesti vzájemně synchronizovaných sinusových oscilátorů se společným výstupem, z nichž u každého lze nastavit relativní rozladění, jemné rozladění a amplitudovou modulaci. K dispozici jsou každému oscilátoru rovněž tlačítka mute pro ztlumení výstupu daného oscilátoru. Jedná se rovněž o řízený oscilátor typu slave, který pro správnou funkčnost musí být spojen s oscilátorem řídicím. Sinusová banka je vhodná pro použití v additivní syntéze, kde je potřeba velkého množství oscilátorů sinusového tvaru. [5]

## Spectral Oscilátor



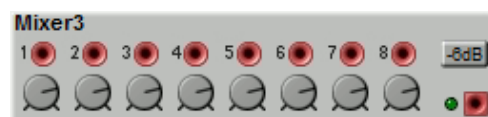
Spektrální oscilátor je zvláštním typem oscilátoru, produkujícím kromě základní frekvence i vyšší harmonické, a to dle specifického nastavení. Parametry jsou ladění, jemné ladění, dva vstupy externího signálu udávajícího rozladění, vstup frekvenční modulace a vstup modulace amplitudové. Tlačítko KBT zapíná ladění základní frekvence v závislosti na tónu stisknutém na externí klaviatuře. Parametr Spectral shape udává strmost křivky, s jakou ubývá amplituda vyšších harmonických složek, jinak řečeno jejich množství a hlasitost. Parametr lze řídit externím audio signálem. Tlačítka Odd a All určují, zdali jsou ve zvuku obsaženy pouze liché, nebo všechny celočíselné vyšší harmonické složky. [5]

### Mixer 3 in



Klasický mixer se třemi vstupy, směšuje vstupní audio signály dle nastavených poměrných hlasitostí. [5]

### Mixer 8 in



Klasický mixer s osmi vstupy, směšuje vstupní audio signály dle nastavených poměrných hlasitostí. [5]

### X-Fade



X-Fade je křížový směšovač, mísící signály ze dvou vstupů takovým způsobem, že při nastavení trimmeru na pozici 1 se na výstupu objevuje pouze signál z prvního vstupu, s jeho otáčením směrem k pozici 2 se k němu začíná mísit signál ze vstupu 2, na středové pozici se na výstupu objevuje signál z obou vstupů ve stejném poměru a při otočení trimmeru na pozici 2 se už na výstupu objevuje pouze signál ze vstupu 2. Směšování lze řídit externím audio signálem. [5]

### Panorama



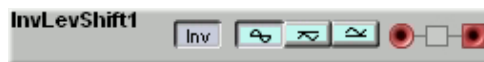
Panorama určuje pozici audio vstupu ve stereo bázi. Zapojí-li se výstupy modulu L a R do separátních audio výstupů Nord Modularu a odtud do stereofonní reprodukční soustavy, lze trimmerem L - R řídit pozici zvuku ve stereo bázi. Pozici zvuku ve stereo bázi lze řídit rovněž externím audio signálem. [5]

## Gain Control



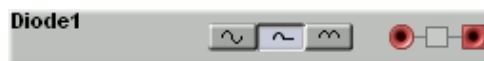
Napětově řízený zesilovač je modul řízení amplitudy průchozího audio signálu úrovní amplitudy řídicího signálu. Při hodnotách 0 až +64 na řídicím vstupu funguje jako volume control (kontroler hlasitosti) vstupního signálu. [5]

## Invertor / Level Shifter



Modul invertor / level shifter slouží i invertování, nebo transpozici audio signálu. Invertor otáčí kladnou půlvlnu do záporné a zápornou do kladné. Level shifter transponuje střídavý signál do kladné složky. [5]

## Dioda



Modul emulace polovodičové diody slouží jako usměrňovač analogového signálu. Funguje buďto v módu jednocestného usměrňovače, nebo usměrňovače dvoucestného. [5]

## Nízkofrekvenční oscilátor LFO A



Nízkofrekvenční oscilátor LFO je velmi podobný audio oscilátoru, rozdíl je pouze v tom, že generuje signály nižších frekvencí, které jsou určeny převážně k řízení. Modul má volitelný tvar vlny a řízení fázového posuvu. Zde je nutno vzít v potaz, že při použití fázového posuvu vůči jinému LFO musíme nastavit shodný počátek oscilací, to jest oscilátory mezi sebou synchronizovat. Můžeme tak učinit buďto použitím dalších oscilátorů v módu slave, nebo zasláním řídicího signálu RST. [5]

## Nízkofrekvenční oscilátor LFO Slave A



Slave, neboli řízený oscilátor se používá v případě, potřebujeme-li několik spřažených oscilátorů, jejichž frekvence bude shodná, či v poměru s frekvencí oscilátoru řídicího. LFO slave musí být propojen se svým Master oscilátorem, který udává jeho frekvenci. Frekvenci oscilátoru LFO slave lze nastavit pouze jako poměrnou vůči frekvenci oscilátoru řídicího. Modul umožňuje volbu tvaru signálu a fázový posuv. [5]

## LFO Slave C



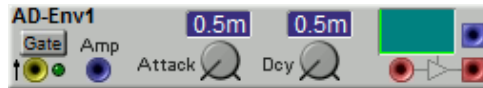
Nízkofrekvenční oscilátor LFO Slave C produkuje tvar vlny sinus. Jedná opět o oscilátor řízený, lze nastavit pouze frekvenci poměrnou k oscilátoru řídicímu. [5]

## ADSR Obálka



Modul hlasitostní obálky je zvláštním případem použití napětově řízeného zesilovače, určeným pro simulaci chování hlasitosti tónu při stisku klávesy, během jejího držení a po uvolnění. Jednotlivé segmenty vyznačují fáze při stisku, během stisku a po uvolnění klávesy. ADSR hlasitostní obálka bývá zapojena mezi tónový generátor a audio výstup. Zpravidla bývá řízena Gate signálem z externí MIDI klávesnice. Základní a nejpoužívanější ADSR obálka se skládá ze čtyř segmentů. Attack, neboli náběh určuje čas od stisku klávesy, za který nabude amplituda signálu maximální hodnotu. Decay, neboli rozklad určuje čas, za který se po doběhu fáze A amplituda ustálí na setrvalé hodnotě určené parametrem Sustain, neboli úrovni udržení zbytkové amplitudy. Fáze Release, neboli uvolnění určuje, za jakou dobu po uvolnění stisku klávesy napětově řízený zesilovač zcela utlumí signál. K dispozici jsou různé tvary křivek přechodu mezi jednotlivými segmenty. [5]

## AD Obálka



Zjednodušená hlasitostní obálka, sestávající pouze ze segmentů náběhu a rozpadu, nelze ji použít pro tvorbu zvuků, jejichž amplituda má setrvat na vyšší úrovni i při držení klávesy, hodnota sustain je zde totiž automaticky nastavena na nulu a hlasitost signálu začíná okamžitě po dosažení náběhového času slábnout. [5]

## Multi Obálka



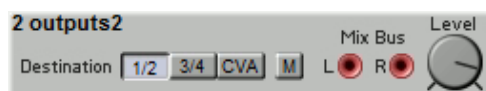
Nejsložitějším typem hlasitostní obálky je obálka pětisegmentová s nastavitelným časem i hlasitostní úrovní pro každý segment. Parametr sustain určuje, který segment obálky bude představovat ustálenou úroveň amplitudy při držení klávesy. Výhodou multi obálky je možnost programování složitějších tvarů průběhu hlasitostních křivek, nevýhodou složitější ovládání. [5]

## Keyboard - MIDI řízení



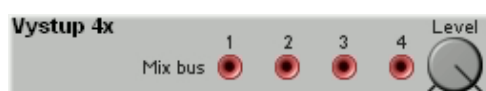
Modul MIDI řízení představuje zrcadlo MIDI IN vstupu Nord Modularu. Na jeho výstupech se objevují hodnoty dat, přicházejících z externí MIDI klaviatury, nebo sekvenceru do Modularu představují řídicí data pro práci syntezátoru. Signál Note představuje údaj o výšce tónu stisknuté klávesy na externí MIDI klaviatuře. Zpravidla není třeba tento signál propojovat s moduly oscilátorů, u nich se příjem signálu Note aktivuje zapnutím funkce KBT, která byla popsána u modulů oscilátorů. Na vstupu Gate se objevuje logická jednička v okamžiku, kdy byla stisknuta klávesa a mizí v okamžiku, kdy je stisk klávesy opět uvolněn. Signálem zpravidla řídíme hlasitostní obálku. Signál Velocity nám zasílá informaci o rychlosti, popřípadě síle, s jakou byla klávesa stisknuta. Zpravidla se zapojuje na regulátor hlasitosti, aby jemněji stisknutá nota hrála tišeji. Release Velocity udává rychlost uvolnění klávesy. [5]

## 2 Outputs - výstupní modul stereo báze se dvěma audio kanály



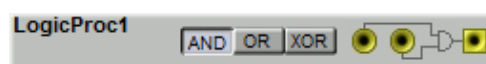
Modul představuje hardwarový link na audio výstupy Nord Modularu. Nástroj disponuje čtyřmi audio výstupy, tlačítka 1/2 a 3/4 tedy přepínají, do jaké dvojice výstupů bude stereo báze směřována. Level udává výstupní hlasitost, tlačítko mute slouží pro ztlumení a CVA směřuje výstup do vstupního modulu PolyArenaIn. [5]

## 4 Outputs - výstupní modul se čtyřmi audio kanály



Modul sběrnice, obsahující konektory pro všechny čtyři fyzické audio výstupy Nord Modularu. Regulátor výstupní úrovně řídí paralelně hlasitosti všech čtyř audio kanálů. [5]

## Logic Processor



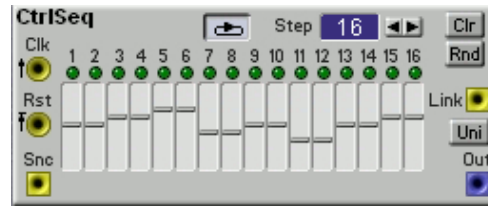
Logický procesor představuje jednotku pro základní matematické operace s binárními čísly AND, OR a XOR, představující logický součet a součin. Vstupy i výstup jsou binární. [5]

## Clock Generator



Generátor hodinového pulzu představuje řídicí jednotku sekvencí. Parametrem je tempo v Beatech za minutu a výstupem logické pulzy v hustotě 24 a 4 pulzů na beat. [5]

## Control Sequencer



Notový sekvencer pracuje relativně a každý krok udává míru rozladění v půltónech oproti základní frekvenci oscilátoru. Výstup se zpravidla zapojuje na pitch modulační vstup oscilátoru. Sekvencer může pracovat v cyklech, a to až o šestnácti krocích, počet kroků lze redukovat nastavením parametru step. Vstup CLK musí být zapojen na zdroj hodinového pulzu. Tlačítko CLR nuluje hodnoty všech kroků a tlačítko RND je nastavuje na hodnoty náhodné. [5]

## Event Sequencer



Krokový sekvencer produkuje na výstupu logickou jedničku na každém z šestnácti možných kroků, na kterém je patřičné políčko sekvenceru stisknuto. Počet kroků může být omezen parametrem step. Výstup se zpravidla zapojuje na Gate vstup hlasitostní obálky a produkuje rytmickou sekvenci dle naprogramování. Modul obsahuje dva sekvencery, které se řídí stejným hodinovým taktem. Zdroj hodinového signálu musí být zapojen na vstup CLK. [5]

## Filtr E



Filtr E je konfigurovatelný frekvenční audio filtr se zvýraznitelným rezonančním kmitočtem. Může pracovat v režimu horní propusti, dolní propusti, pásmové propusti a pásmové zádrže. Strmost filtru je volitelná, lze nastavit 12 a 24 dB na oktávu. Frekvenci a rezonanci filtru lze řídit externím audio signálem. [5]

## Stereo Chorus



Audio efekt chorusu spočívá v emulaci efektu znásobení hlasů. Ostatně slovo chorus znamená v překladu sbor. Parametr detune udává míru rozladění a amount úroveň audio efektu. Výstup modulu je stereofonní. [5]

## Overdrive



Efekt Overdrive, neboli přebuzení je známý všem kytaristům. Jeho princip spočívá v ořezávání vrcholů amplitud audio signálu. [5]

## Phaser



Audio efekt fázeru je ve skutečnosti sofistikovaným blokem frekvenčních filtrů, produkujícím velmi zajímavá spektra. Výslednou charakteristiku filtru lze vidět na displeji modulu. [5]