

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za radiokomunikacije

Diplomski zadatak br. 792

GLAZBENI SINTETIZATORI

Danko Kozar

Zagreb, 1998. Godine

Ovaj rad posvećujem petorici glazbenika koji su u meni probudili osjećaj glazbe i oblikovali moj glazbeni ukus:

*Chris Lowe
Boris Blank
Jean-Michel Jarre
Vince Clarke
Ricki Wilde*

Sadržaj

UVOD	1
1. SINTEZA ZVUKA	3
1.1 Što je sinteza ?.....	3
1.2 Kontroleri.....	3
1.3 Imitativna i apstraktna sinteza.....	3
1.4 Tri elementa zvuka	4
2. VALNI OBLICI.....	6
2.1 Spektralne i glazbene karakteristike osnovnih valnih oblika.....	6
2.1.1 Sinusni valni oblik.....	6
2.1.2 Pravokutni valni oblik	7
2.1.3 Pulsni valni oblik.....	7
2.1.4 Trokutni valni oblik.....	8
2.1.5 Pilasti valni oblik.....	9
2.1.6 Pregled odnosa amplituda harmonika trokutnog, pravokutnog i pilastog valnog oblika	10
2.1.7 Šum.....	10
2.1.8 Valni oblici nastali miješanjem osnovnih valnih oblika	10
3. MONOFONI I POLIFONI SINTETIZATORI	12
3.1 Monofoni sintetizatori	12
3.1.1 Naponska kontrola.....	12
3.1.2 Glasovni modul	14
3.2 Polifoni sintetizatori	15
3.2.1 Prioritet tonova (<i>Note Priority</i>)	16
3.2.3 Multitimbralni sintetizatori	16
4. ANALOGNI SINTETIZATORI (EVOLUCIJA SINTETIZATORA)	17
4.1 Prvi sintetizator - modularni sistem.....	17
4.1.1 Moduli	18
4.2 Uvođenje fiksnog <i>routinga</i>	20
4.3 Memoriranje parametara	20
4.4 Uvođenje glavnog oscilatora	21
4.5 Zaključak.....	21

5. DIGITALNI SINTETIZATORI	22
5.1 Generiranje signala	23
5.1.1 Generiranje signala pomoću tablice valnih oblika	23
5.1.2 Transpozicija tonova	24
5.1.3 Višeslojnost zvuka (<i>multilayering</i>) i zone (<i>zones</i>)	24
5.1.4 Metode poboljšanja nedostatka prirodosti uzorkovanog zvuka	26
5.2 Procesiranje na nivou glasa	27
5.3 Procesiranje na nivou instrumenta	28
5.4 MIDI kontrolni signali	28
5.5 Arhitektura instrumenta.....	29
5.6 Osnovna terminologija digitalnih sintetizatora	29
5.6.1 Glas.....	30
5.6.2 <i>Patch</i>	30
5.6.3 Program	30
5.6.4 Korisničko sučelje (<i>User Interface</i>)	30
5.6.5 Mijenjanje parametara (<i>Editing</i>)	31
5.6.6 Snimanje parametara (<i>Saving</i>)	31
6. VRSTE GLAZBENIH SINTETIZATORA	32
6.1 Sastavni blokovi sintetizatora.....	32
6.2 Podjela sintetizatora po načinu rada	34
6.2.1 Modularni sintetizatori	34
6.2.2 Potpuno varijabilni sintetizatori	35
6.2.3 Pretprogramirani sintetizatori.....	35
6.2.4 Programabilni sintetizatori	36
6.2.5 Hibridni sintetizatori	37
6.2.6 <i>Sampleri</i>	39
6.2.7 Sistemi računalno-sintetizator	40
6.2.8 Programi i simulacije na računalu.....	41
7. OSNOVNI SKLOPOVI ANALOGNIH SINTETIZATORA - OSNOVNI POJMOVI SINTEZE	42
7.1 Oscilatori	42
7.1.1 Naponom kontrolirani oscilator (<i>Voltage Controlled Oscillator</i>)	43
7.1.2 Digitalno kontrolirani oscilator (<i>Digitally Controlled Oscillator</i>).....	43
7.1.3 Dva razgođena oscilatora s malom razlikom u frekvencijama	44
7.1.4 Sub-oktavni oscilator.....	46
7.1.5 Modulacija širine pulsnog valnog oblika (<i>PWM - Pulse Width Modulation</i>)	46
7.1.6 Generator šuma (<i>Noise Generator</i>).....	46
7.1.7 Mješalo valnih oblika (<i>Audio Mixer</i>)	47

7.2 Naponom kontrolirani filtri.....	47
7.2.1 Niskopropusni filter.....	48
7.2.2 Ostali filtri	51
7.2.3. Hibridni naponom kontrolirani filtri	52
7.3 Naponom kontrolirano pojačalo (VCA – <i>Voltage Controlled Amplifier</i>)	52
7.4 Generator envelope (EG - <i>Envelope Generator</i>).....	53
7.4.1. ADSR envelope.....	53
7.4.2. RL (Rate-Level) envelope.....	56
7.4.3. Utjecaj envelope (<i>Env. Amount</i>).....	56
7.5 Niskofrekvencijski oscilator (LFO - <i>Low Frequency Oscillator</i>).....	57
7.6. <i>Keyboard Tracking</i>	59
7.7. Jačina pritiska tipke (<i>Velocity</i>)	60
7.8. Sinkronizacija Oscilatora (<i>Sinc, Hard Sinc</i>).....	60
7.9. <i>Cross Modulation</i>.....	62
7.10. <i>Cross Filter Modulation</i>	62
7.11. Balansna modulacija (<i>Ring Modulation</i>)	62
8. VRSTE SINTEZE.....	63
8.1 Aditivna sinteza (<i>Additive Synthesis</i>).....	63
8.2 Subtraktivna sinteza (<i>Subtractive Synthesis</i>)	65
8.3 Frekvencijska modulacija (<i>Frequency Mudulation - FM, AFM</i>)	66
8.3.1 Princip FM sinteze	67
8.3.2 Osnovna konfiguracija FM-a	67
8.3.3 Matematička teorija frekvencijske modulacije.....	68
8.3.4 Primjena matematičkih spoznaja o frekvencijskoj modulaciji.....	72
8.3.5 Konstrukcija osnovnih valnih oblika frekvencijskom modulacijom.....	73
8.3.6 Ostali zvukovi FM sinteze.....	74
8.3.7 Pregled pozicija harmonika u spektru FM-a za različite odnose modulator: nosilac.....	74
8.3.8 Promjena spektralnog sadržaja promjenom jačine modulacije (<i>Modulation Amount</i>)	76
8.3.9 Realizacija FM sinteze digitalnom tehnologijom.....	79
8.3.10 Operator.....	80
8.3.11 Algoritam	83
8.3.12 Povratna veza unutar algoritama (<i>feedback</i>)	86
8.3.13 Korištenje sinteze frekvencijskom modulacijom u praksi	86
8.4 Sintaza fazne distorzije.....	87
8.4.1 Glasovni modul PD sinteze	90

8.4.3 Generatori envelope kod PD sintetizatora.....	92
8.5 Sinteza reprodukcijom uzorkovanog zvuka (PCM, AWM,AWM2,AI)	92
8.5.1 Uzorkovanje (<i>Sampling</i>)	93
8.5.2 Frekvencija uzorkovanja	94
8.5.3 Prikaz uzorkovanog zvuka	94
8.5.4 Uređivanje uzorkovanog zvuka DSP funkcijama	96
8.5.5 Memorija	96
8.6 Linearno Aritmetička Sinteza	96
8.7 Vektorska sinteza.....	99
8.8 Sinteza sekvenci valnih oblika (<i>Wave Sequencing</i>).....	101
8.9 Granularna sinteza	103
8.10 Karplus-Strong sinteza.....	103
8.11 Fizikalno modeliranje.....	103
8.11.1 Digitalno procesiranje signala	106
8.11.2 Algoritmi fizikalnog modeliranja.....	106
8.11.3 Razvoj različitih zvukova	108
9. LITERATURA	110

Uvod

Ovaj rad bavi se problematikom elektronskih glazbala novije generacije poznatih pod imenom glazbeni sintetizatori (engl. "music synthesizers"). Glazbeni sintetizatori nastali su evolucijom električnog registriranja zvuka instrumenata (pomoću mikrofona ili kontaktnih mikrofona) i elektromehaničkih glazbenih instrumenata: električne gitare, električnog klavira i električnih orgulja. Njihovo doba bilo je doba velikih spoznaja o karakteru zvuka, te njegovoj analogiji sa električnim oscilacijama. Elektromehanički instrumenti zvuk su proizvodili titranjem mehaničkog dijela iznad elektromagneta (žica gitare), ili periodičkim primicanjem i odmicanjem od elektromagneta (nazubljeni kotač Hammondovih orgulja). Povijest glazbenih sintetizatora počinje trenutkom kad se iz procesa generiranja zvuka izbacuju mehanički dijelovi i nadomještaju električnim oscilatorima. Korištenje oscilatora za generiranje valnog oblika uvelo je napon kao kontrolni parametar; s naponom se mogu vršiti razne manipulacije, pa time i stvarati velik broj različitih zvukova. Kad se tome dodaju i niskofrekvencijski modulacijski oscilatori, naponom kontrolirani filtri i pojačala, te generatori envelope, dobiva se jedan vrlo snažan glazbeni instrument, s velikim mogućnostima promjene karaktera zvuka od strane izvođača. Pritom je zvuk glazbenih sintetizatora bitno različit od svih dotadašnjih klasičnih i elektromehaničkih glazbenih instrumenata; zbog toga je otvorio nove horizonte u glazbenom izričaju i općenito napravio revoluciju u glazbi. Glazbeni sintetizator prvi je uistinu kreativan glazbeni instrument, koji omogućava glazbeniku onu osnovnu glazbenu kreativnost: kreiranje vlastitog zvuka. Potreba za ovakvim instrumentom bila je neizbježna jer je s vremenom sve više ljudi željelo kreirati vlastite zvukove, a ne samo služiti se zvukovima ugrađenim u tvornici (električne orgulje).

Postoji mnogo vrsta sintetizatora, svaki namijenjen određenoj ulozi. Na primjer, glazbenik koji koristi sintetizator u živo na pozornici, koristit će drugu vrstu sintetizatora nego osoba koja ga koristi u glazbenom studiju i koja ima svoje posebne zahtjeve. Razlike u ova dva primjera korištenja sintetizatora su u broju istovremenih glasova koji mogu biti proizvedeni (polifonija), mogućnosti interaktivnog komuniciranja glazbenika i instrumenta (što je osobito važno za sviranje u živo), različite potrebe za karakterom zvuka itd. Također, neki su sintetizatori namijenjeni solo sviranju osnovnih melodija (dakle polifonija ne igra ulogu), a neki za sviranje pozadinskih akorda (polifonija potrebna).

U daljnjem tekstu umjesto pojma "glazbeni sintetizator" koristit ću samo pojam "sintetizator"; pod njime podrazumijevam glazbeni sintetizator, pošto obrađujem isključivo sintetizatore čujnih frekvencija (do 20 kHz) a ne druge vrste sintetizatora (kao što su sintetizatori radio frekvencija u visokofrekvencijskom području).

Zbog povijesnog razvoja, sastavni dijelovi sintetizatora, kao i sve riječi i kratice u vezi sa elektronskim instrumentima, imaju engleske nazive. Oni su se udomaćili kod većine glazbenika; stoga smatram neophodnim navoditi i engleske nazive - bit će pisani u zagradama iza hrvatskih pojmova (ako postoje), te kurzivom.

Diplomski rad podijeljen je na osam poglavlja:

Prvo govori općenito o sintezi zvuka, njenoj osnovnoj podjeli na imitativnu i apstraktnu, te o tri osnovna elementa zvuka.

Drugo poglavlje obrađuje spektralne i glazbene karakteristike osnovnih valnih oblika koji se koriste u sintetizatorima.

Treće poglavlje odnosi se na podjelu sintetizatora po polifoniji - monofone, polifone i multitimbralne sintetizatore.

Četvrto poglavlje obrađuje analogne sintetizatore od njihovog nastanka pa do posljednjih proizvedenih, pa je to na neki način kratak prikaz evolucije sintetizatora.

Peto poglavlje objašnjava principe rada digitalnih sintetizatora, probleme digitalnog generiranja signala te digitalno procesiranja unutar sintetizatora na više nivoa. Također daje pregled osnovne terminologije digitalnih sintetizatora.

Šesto poglavlje obrađuje vrste sintetizatora po tehničkoj realizaciji, pa zapravo daje pregled tehnološkog razvoja sintetizatora, kao i prednosti i mane različitih tehnologija.

Sedmo poglavlje opisuje principe rada osnovnih sklopova analognih sintetizatora, a time i osnovne pojmove sinteze, jer su se nazivi sklopova i načina njihove upotrebe zadržali i kod digitalnih sintetizatora.

Osmo, posljednje poglavlje je najopširnije: obrađuje sve postojeće vrste sinteze - od onih najkonvencionalnijih poput subtraktivne sinteze, pa sve do najnovije - sinteze fizikalnog modeliranja.

1. SINTEZA ZVUKA

1.1 Što je sinteza ?

Općenito, sinteza je proces kombiniranja osnovnih elemenata, da bi se pomoću njih stvorio potpuno nov element, tj. stvaranje nečeg kompleksnog od određenog broja jednostavnih komponenata. Elektronska sinteza zvuka ima sličan koncept, u kojem je kompleksni zvuk konstruiran definiranjem jednostavnih osnovnih elemenata. Svaki zvuk čine tri osnovna elementa: visina tona (engl. *pitch*), karakter zvuka (boja tona, *timbre*) i glasnoća (*volume*). Određivanjem vrijednosti ovih triju parametara, kreiramo specifični zvuk. Elektronski sintetizator zvuka je naprava čija je upravo to svrha. Ako pomaknemo stvari na viši nivo i uvedemo neku vrstu kontrolnog elementa (kontroler), na primjer klavijaturu, imamo korisniju napravu - elektronski glazbeni sintetizator.

1.2 Kontroleri

Kontroler je sučelje pomoću kojeg glazbenik komunicira sa sintetizatorom tokom sviranja. Najpoznatiji i najviše korišten kontroler je klavijatura (koja daje informacije o vremenu pritiska i otpuštanja tipke, a najčešće i o jačini pritiska i naknadnom pritisku, tzv. *aftertouch*), a zajedno s njom i kotačići za modulaciju (koji se najčešće koriste za malu promjenu visine tona i dodavanje vibrata). S vremenom, razvile su se i druge vrste kontrolera osim klavijature: postoje gitarski, duhači, gudači, vokal, te pedal kontroleri. Oni omogućavaju glazbenicima koji sviraju navedene instrumente komunikaciju sa sintetizatorom gotovo jednako uspješno kao u klavijaturista.

Razlozi zašto je većina sintetizatora kontrolirana klavijaturom su sljedeći:

1. Pošto je klavijatura, u načelu, samo niz specijalnih sklopki, posebno je pogodna za komunikaciju s elektronskim krugovima sintetizatora.
2. Klavijatura je sigurno najefikasnija naprava za prijenos informacije s čovjeka na stroj. Deset prstiju ljudskih ruku mogu omogućiti istovremeni prijenos deset notnih informacija. Na gitari je moguće sviranje najviše pet tonova odjednom (pet prstiju), a na duhačkim instrumentima jedan.
3. Prvi sintetizatori koristili su klavijature kao kontrolere.

1.3 Imitativna i apstraktna sinteza

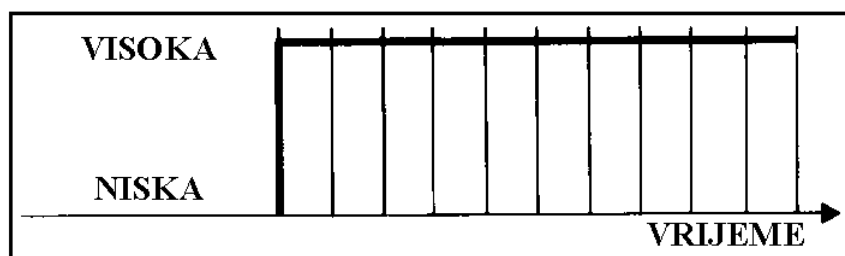
Osnovna podjela sinteze je na imitativnu i apstraktnu. Imitativna sinteza teži što vjernijem oponašanju zvuka violine, francuske trube ili elektronskih orgulja. U načelu, ovi zahtjevi postižu se uzorkovanjem (*sampliranjem*) zvuka, koje će biti obrađeno u jednom od poglavlja - a to nije iskreno govoreći vrsta sinteze, nego kopiranje nekog postojećeg zvuka, ukoliko se ne kombinira s drugim zvukovima ili se ne manipulira njime samim da bi se dobio drugi zvuk. Apstraktna sinteza teži kreiranju potpuno novog zvuka, tj. onog koji se ne može čuti ni iz jednog drugog izvora zvuka.

1.4 Tri elementa zvuka

Svaki zvuk definiran je trima parametrima:

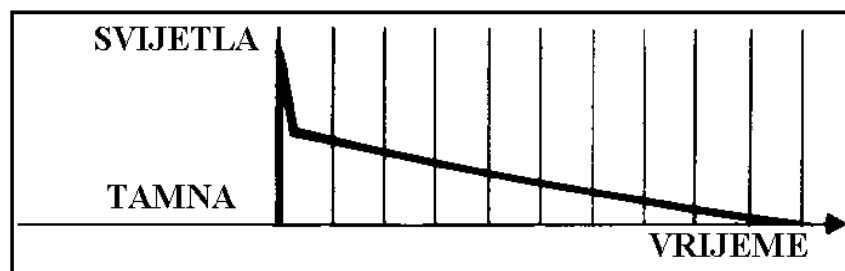
1. Visinom tona (*pitch*)
2. Bojom tona (*timbre*)
3. Glasnoćom (*amplitude*)

Ta tri parametra rijetko se kada vremenski konstantna - kod svih glazbenih instrumenata oni su vremenski promjenjivi. Kod klasičnih instrumenata ta je promjena kontinuirana. Sljedeće tri slike pokazuju spomenutu kontinuiranu promjenu ova tri parametra kod sviranja jednog tona na klaviru u trajanju od deset sekundi:



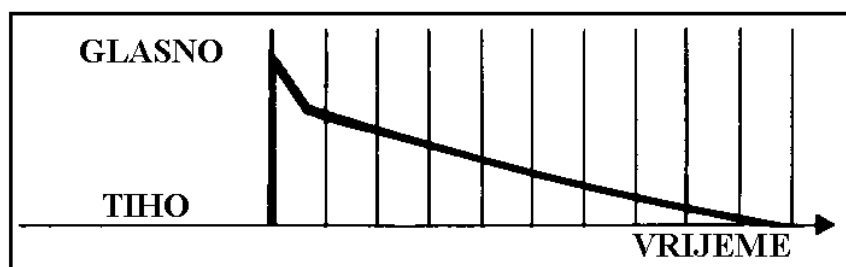
Slika 1.1: Promjena visine tona odsviranog na klaviru

Visina tona: Kod klavira visina tona ostaje konstantna.



Slika 1.2: Promjena boje tona odsviranog na klaviru

Boja tona: Zvuk je u početku vrlo svijetao, dakle ima jako izražene više harmonike (uzrok tome je udar klavirskog čekića na žicu), a s vremenom postaje sve mekaniji, jer viši harmonici odumiru prije nego prvih nekoliko harmonika.



Slika 1.3: Promjena glasnoće tona odsviranog na klaviru

Glasnoća: Prije nego što je nota odsvirana, glasnoća je nula; zatim u trenu skače do maksimuma, i postepeno se smanjuje do nule dok se ton stišava.

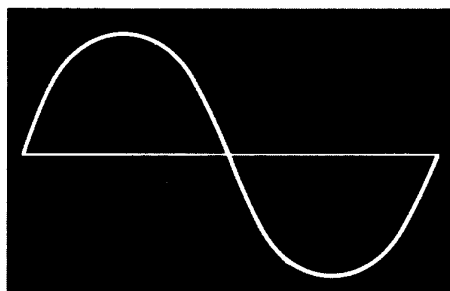
Identično klaviru, i glazbeni sintetizator mora imati mogućnost vremenske promjene ova tri parametra. Najjednostavnije je to postići okretanjem potencijometara za visinu tona i glasnoću, te mijenjanjem parametara izlaznog filtra koji mijenja boju tona zvuka. No to rješenje je, naravno, nepraktično pa se već kod prvih sintetizatora prešlo na automatizaciju ovih promjena. Baš kao što je glasnoća nekog zvuka gledana na ekranu osciloskopa reprezentirana njegovom ovojnicom (envelopom), u sintetizatoru se programira krivulja za glasnoću sastavljena od pravaca, s nekoliko prijelomnih točaka, ekvivalentna envelopi prirodnog zvuka. Ta krivulja upravlja pojačanjem ulaznog signala (nekog valnog oblika), i naziva se isto tako envelope. Razlog zašto je sastavljena od pravaca je ušteda memorije sintetizatora, koje su prvi od njih imali vrlo malo (a prije toga broja ekvivalentnih potencijometara za definiranja parametara envelope kod starijih analognih sintetizatora). Pošto su envelope sastavljene od pravaca prihvatljive i prirodne, ostale su u upotrebi; jedina promjena kod modernijih sintetizatora jest veći broj prijelomnih točaka to jest nivoa glasnoće. Ekvivalentno envelopi za glasnoću, i sve druge krivulje koje se nalaze u memoriji sintetizatora a služe promjenama određenih parametara (visine tona, rezonantne frekvencije filtra...) nazivaju se envelope.

2. Valni oblici

Već od prvih analognih sintetizatora u upotrebi je nekoliko osnovnih valnih oblika koji se dobivaju oscilatorima i koji su se zadržali do danas. Nalaze se u svim modernim digitalnim sintetizatorima, uza sve ostale digitalizirane zvukove, i to zbog svog specifičnog sintetskog zvuka. Ti valni oblici su: Sinusoida (*sine*), trokut (*triangle*), pila (*sawtooth* ili *saw*), pravokutni valni oblik (*square*) i pravokutni valni oblik s promjenjivim vremenskim odnosom pozitivnog i negativnog poluperioda (*pulse*). Svi ovi valni oblici su periodički, jer se vremenski ponavljaju bez promjene, za razliku od uzorkovanih zvukova kod digitalnih *sampler*a koji se najčešće ne ponavljaju nego su odsvirani u jednom proletu, a dužine su i nekoliko stotina perioda osnovnog tona i vremenski promjenjivog karaktera.

2.1 Spektralne i glazbene karakteristike osnovnih valnih oblika

2.1.1 Sinusni valni oblik



Slika 2.1: Osciloskopski prikaz sinusnog valnog oblika

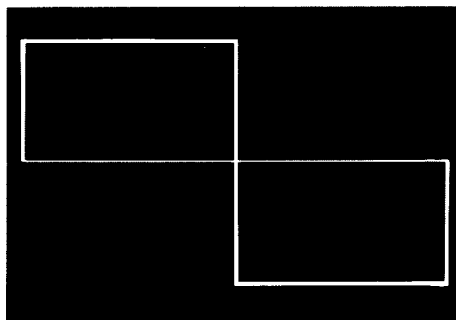
Sinusni valni oblik osnovni je element zvuka. Svaki se zvuk može rastaviti na pripadajuće sinusoide, dok se sinusoida ne može rastaviti na jednostavnije valne oblike. Taj valni oblik bilo je u počecima dosta teško generirati elektronski; u današnjoj tehnologiji taj problem je prevladan.

Oblik: Vrlo blag i kontinuiran, bez oštih rubova, što rezultira njegovim jednostavnim čistim tonom.

Spektar: Sinusni valni oblik ima samo osnovni harmonik.

Zvuk: Sinus ima zvuk nalik na flautu, vrlo jasan i čist.

2.1.2 Pravokutni valni oblik



Slika 2.2: Osciloskopski prikaz pravokutnog valnog oblika

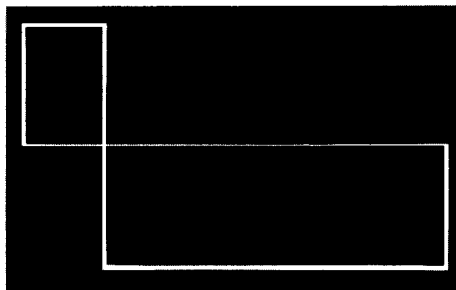
Pravokutni valni oblik najjednostavnije je generirati. Slika pokazuje da se zapravo sastoji od dva stanja: visokog i niskog. Zapravo, uključujući i isključujući sklopku dobivamo pravokutni valni oblik.

Oblik: Jednostavna promjena visoko - nisko stanje. Često se susrećemo sa "pravokutnim" oblikom sa zaobljenim uglovima, što znači da neki harmonici viših frekvencija nedostaju.

Spektar: Formula pravokutnog valnog oblika je: $\sin(f) + 1/3\sin(3f) + 1/5\sin(5f) + 1/7\sin(7f) + \dots$ gdje je f osnovna frekvencija. Pošto amplituda viših harmonika pada s porastom frekvencije, niži harmonici igraju glavnu ulogu u određivanju valnog oblika, pa tako i njegovog zvučnog karaktera, dok su viši harmonici rezultat oštarih uglova. Ima samo neparne harmonike.

Zvuk: Pravokutni valni oblik ima mekan, zvučni karakter šupljeg tijela, vrlo nalik klarinetu, sa sličnošću naročito u dominantnim neparnim harmonicima, koji daju pravokutnom valu karakteristiku nazalnog zvuka.

2.1.3 Pulsni valni oblik

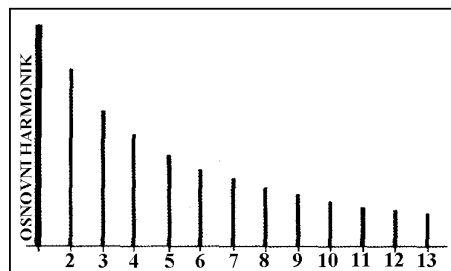


Slika 2.3: Osciloskopski prikaz pulsnog valnog oblika

Pulsni val varijacija je pravokutnog valnog oblika.

Oblik: Ponovno valni oblik postoji u dva stanja, visokom i niskom, ali ovog puta relativni odnosi dva stanja nisu isti. Da bi definirali točni oblik pulsnog vala, dajemo postotnu vrijednost kojom izražavamo relativni odnos trajanja visokog i niskog stanja. Tako je npr. pulsni val od 50% zapravo pravokutni val, dok je pulsni val od 20% 2/10 vremena u visokom, a 8/10 vremena u niskom stanju.

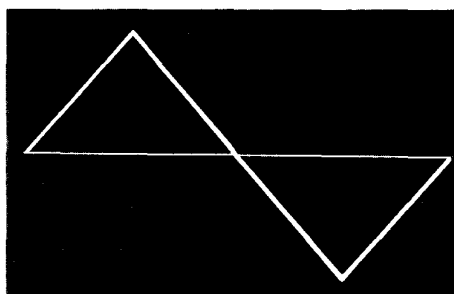
Spektar: Tipičan spektar pulsnog valnog oblika prikazan je na donjoj slici. Točne amplitude harmonika ovise o specifičnom valnom obliku, ali u usporedbi s pravokutnim valnim oblikom, ovdje se pojavljuju i parni harmonici.



Slika 2.4: Spektar pulsnog valnog oblika

Zvuk: Pulsni val ima karakteristiku svirale, nazalnog karaktera. Postaje sve slabiji što se više njegov odnos udaljava od 50%. Slušatelju 5 postotni pulsni val zvuči jednako kao i 95 postotni.

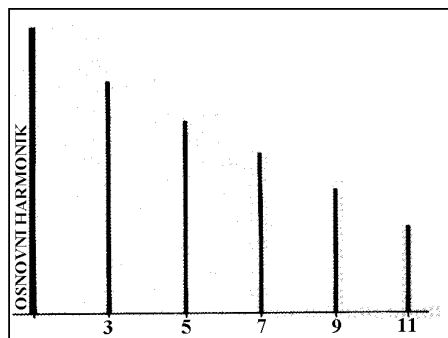
2.1.4 Trokutni valni oblik



Slika 2.5: Osciloskopski prikaz trokutnog valnog oblika

Oblik: Trokutni val je na neki način sličan sinusnom valu, ali umjesto kontinuiranih promjena, sastoji se od ravnih linija i oštrog vrha.

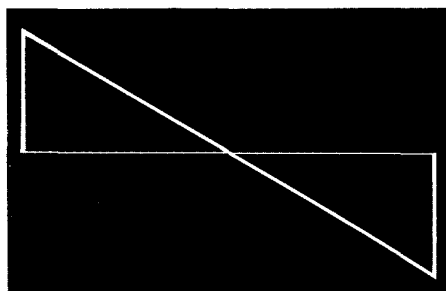
Spektar: Te razlike su zaslužne za prisutnost neparnih harmonika u malim količinama. Amplituda ovih harmonika pada s kvadratom pozicije, tako da je npr. 9-ti harmonik prisutan u omjeru 1:81 prema osnovnom harmoniku.



Slika 2.6: Spektar trokutnog valnog oblika

Zvuk: Trokutni valni oblik, poput sinusnog, ima sličnu čistoću i jednostavnost, ali prisustvo ovih dodatnih neparnih harmonika čini ga svjetlijim od sinusnog vala. Mnogima je njegov zvuk ugodniji od sinusnog.

2.1.5 Pilasti valni oblik

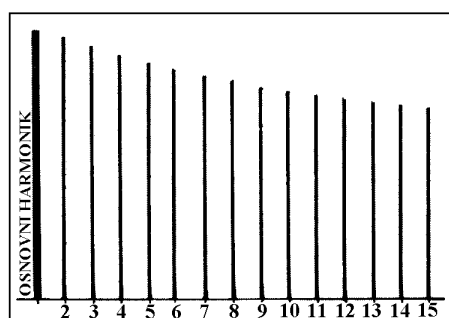


Slika 2.7: Osciloskopski prikaz pilastog valnog oblika

Postoje dvije vrste pilastog vala - uzlaznog i silaznog nagiba (engl. *ramp up* i *ramp down*), ali audio-spektar oba zvuči potpuno jednako, budući da imaju jednaki harmonički sadržaj i da su zrcalne slike jedan drugome.

Oblik: Na prvi pogled, pilasti val izgleda jako slično trokutnom valu, ali treba primijetiti da se nakon dostizanja minimuma (ili maksimuma) nivo "resetira" i kreće ponovno sa svoje početne pozicije.

Spektar: Kod pilastog vala nisu dominantni ni parni, ni neparni harmonici. Amplitude viših harmonika padaju vrlo lagano.



Slika 2.8: Spektar pilastog valnog oblika

Zvuk: Pilasti valni oblik, bogat harmonicima, spektralno je vrlo svijetao, punog zvuka. Ima duhački karakter.

2.1.6 Pregled odnosa amplituda harmonika trokutnog, pravokutnog i pilastog valnog oblika

Harmonik:	F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F
Trokutni	1	-	-1/9	-	1/25	-	-1/49	-	1/81
Pravokutni	1	-	1/3	-	1/5	-	1/7	-	1/9
Pilasti	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9

(negativni predznak znači invertiranu fazu dotičnog harmonika)

2.1.7 Šum

Šum (noise) još je jedan važan zvuk koji koristimo u sintetizatorima. On po svojoj prirodi nije valni oblik, pošto je njegov karakter slučajan, dakle ne dobiva se oscilatorima, već generatorom šuma - najjednostavniji od njih pojačavaju šum sa nekog elementa, npr. otpornika. Neizbježan je pri oponašanju zvuka perkusionističkih instrumenata kod kojih je nemoguće utvrditi visinu tona osnovne frekvencije, i kod kojih zbog toga nema definirane visine tona.

2.1.8 Valni oblici nastali miješanjem osnovnih valnih oblika

Većina sintetizatora omogućava miješanje dva ili više oscilatorskih signala zajedno (vidi poglavlje 7.1.7.). Rezultantni valni oblik jednostavna je suma tih valnih oblika, stoga će i harmonici dobivenog valnog oblika biti jednaki sumi istoimenih harmonika. Neki sintetizatori raspolažu samo sklopkama kojima se uključuju pojedini valni oblici, a ne potencimetrima za doziranje. Bolje je rješenje, naravno, ono s potencimetrima, pošto se pomoću sklopki ne može podešavati amplituda svakog pojedinog valnog oblika koji ulazi u sumator. Sljedeća tablica prikazuje harmonički spektar valnog oblika koji nastaje sumiranjem pravokutnog i pilastog valnog oblika kod sintetizatora koji raspolaže sklopkama, pa su tako moguće samo 100 postotne amplitudne vrijednosti. Harmonici rezultantnog vala dobiveni su kao prosječne vrijednosti dva sumirana, kako bi se bolje ilustrirao njegov spektralni sadržaj:

Harmonik:	F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F
Pravokutni	100%	–	33.3%	–	20%	–	14.3%	–	11.1%
Pilasti	100%	50%	33.3%	25%	20%	16.7%	14.3%	12.5%	11.1%
REZULTANTNI	100%	25%	33.3%	12.5%	20%	8.3%	14.3%	6.25%	11.1%

Sljedeća tablica prikazuje harmonički sadržaj rezultatnog valnog oblika kakav se može proizvesti na sintetizatoru gdje je doziranje signala realizirano potencijometrima: sumiraju se pravokutni valni oblik i pilasti, s 75% amplitude pravokutnog:

Harmonik:	F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F
Pravokutni	100%	–	33.3%	–	20%	–	14.3%	–	11.1%
Pilasti	75%	35.5%	25%	18.8%	15%	12.5%	10.7%	9.38%	8.33%
REZULTANTNI	100%	21.4%	33.3%	10.7%	20%	7.14%	14.3%	5.36%	11.1%

3. Monofoni i polifoni sintetizatori

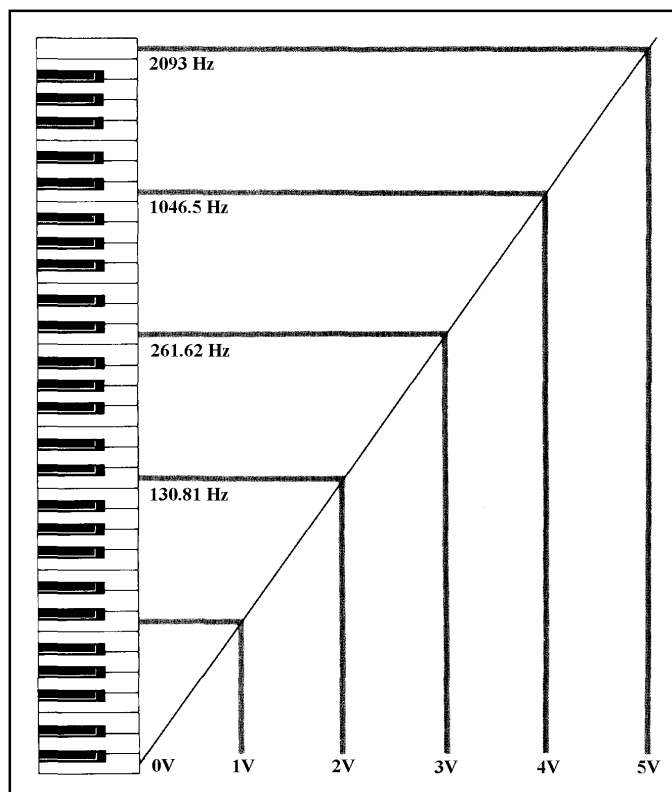
Polifonija ili višeglasje pojam je koji se koristi u zbornom pjevanju i kao takav je prenijet na sintetizatore. Jedan glas sintetizatora može se opisati kao jedan izvor zvuka. Sintetizatori se dijele na monofone i polifone. Monofoni sintetizatori, baš kao i duhači instrumenti ili ljudski glas, ne mogu istovremeno odsvirati više od jednog tona. Polifoni sintetizatori, isto kao i klavir, sposobni su proizvesti više tonova istovremeno. No, za razliku od klavira, koji je potpuno polifon instrument (jer teoretski mogu istovremeno zazvučati sve njegove tipke, pošto svaka ima svoj zasebni mehanizam), sintetizatori imaju ograničenu polifoniju - najčešće su 6,8,16 ili 32- polifoni, dok je današnji standard modernih digitalnih sintetizatora 64, ili čak 128 glasova.

3.1 Monofoni sintetizatori

Monofoni sintetizatori bili su, zbog svoje jednostavnosti, prvi na sceni. Sve što je bilo potrebno, bio je elektronski krug sposoban za stvaranje željenog zvuka, i jednostavna klavijatura - kontroler, da bi se zvuku dala željena visina tona.

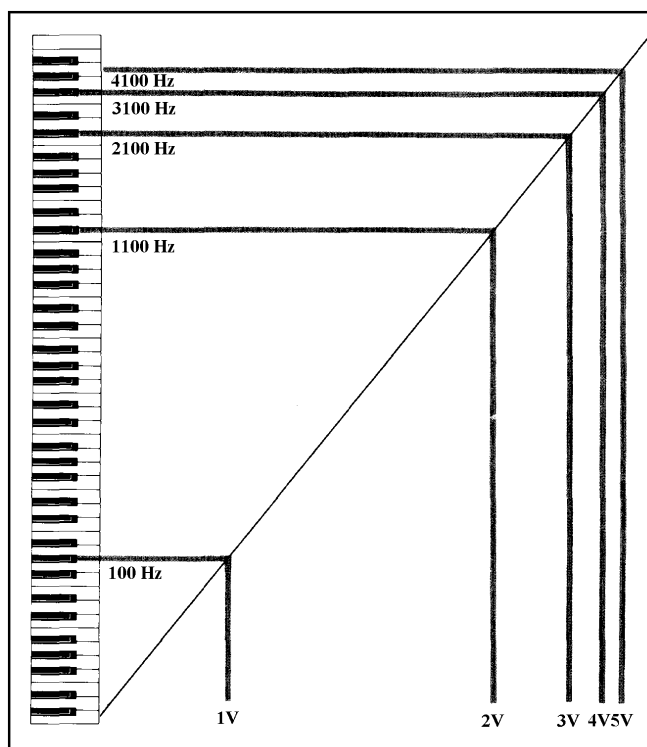
3.1.1 Naponska kontrola

Od prvih komercijalnih sintetizatora s kraja 1960-tih, pa sve do pojave digitalne obrade i prijenosa informacija kod sintetizatora, svaki je parametar bio upravljan naponom. Tako na primjer, kod prijenosa informacije o visini tona kod sistema 1 volt po oktavi, najniža tipka klavijature proizvodi napon 0V, nota jednu oktavu više 1V, dvije oktave više 2V itd. Napon s klavijature tada je doveden u korelaciju s željenom visinom tona koji treba proizvesti. Na taj se način može specificirati samo jedna nota istovremeno: zbog toga naponska kontrola povlači monofoniju.



Slika 3.1: Sistem 1 volt po oktavi (1V Per Octave System)

Postoji i druga vrsta naponske kontrole: razlika frekvencija od 1000 Hz, počevši od najnižeg tona, reprezentira se naponom od jednog volta. To daje sistem jednog volta na tisuću Hz, prikazan na slici 3.2.

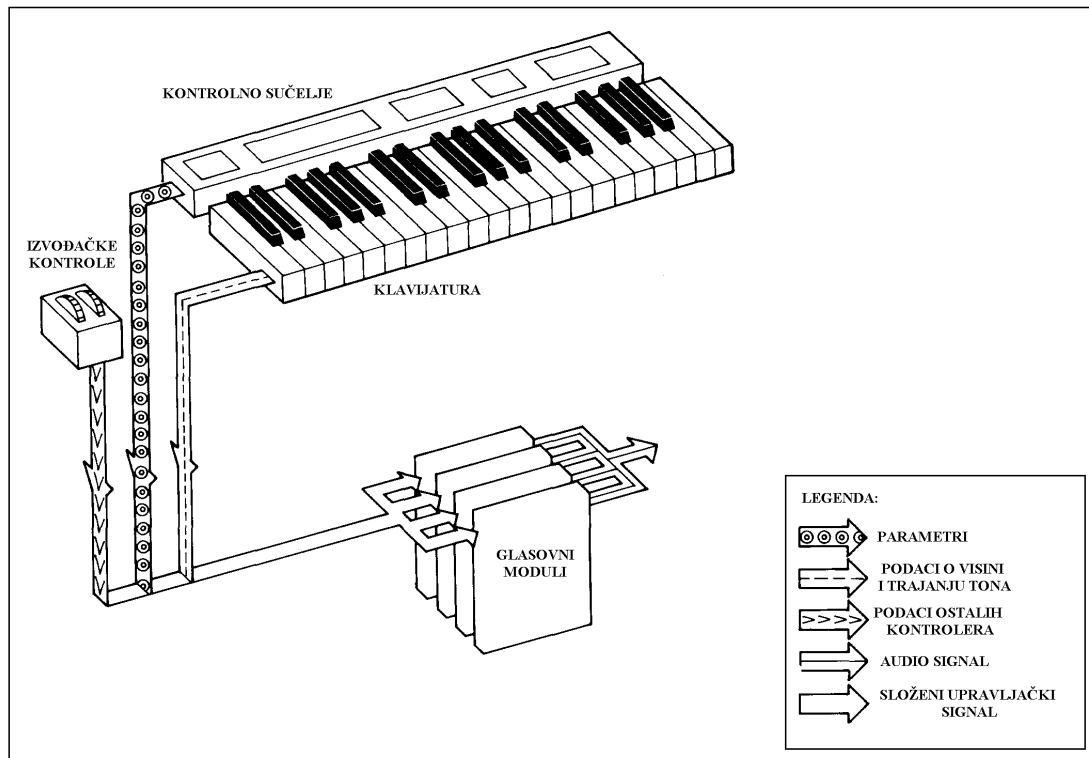


Slika 3.2: Sistem 1 volt na 1000 Hz (1V Per 1000 Hz System)

3.1.2 Glasovni modul

Glasovni modul električni je krug koji proizvodi jedan glas. Prima tri vrste informacije:

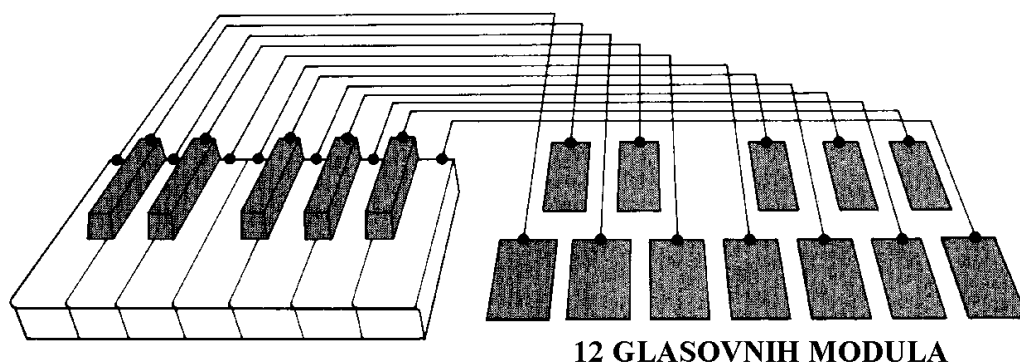
1. Podatke s klavijature - koja nota je odsvirana, kada i koliko dugo. (ovo se naziva *Controller Data*)
2. Druge informacije od glazbenika pomoću kojih on unosi više osjećaja u sviranje - pomoću kotačića za visinu tona, kotačića za modulaciju (vibrato) i ostalih kontrolera. Poznato kao *Performance Data*.
3. Podatke o parametrima zvuka (*Parameter Data*) - set podataka prije umemoriranih u sintetizator, najčešće tri prije spomenuta osnovna elementa zvuka: visina, boja i glasnoća tona, kao i njihove envelope, ukoliko nisu konstantne.



Slika 3.3: Osnovni sastavni blokovi sintetizatora

3.2 Polifoni sintetizatori

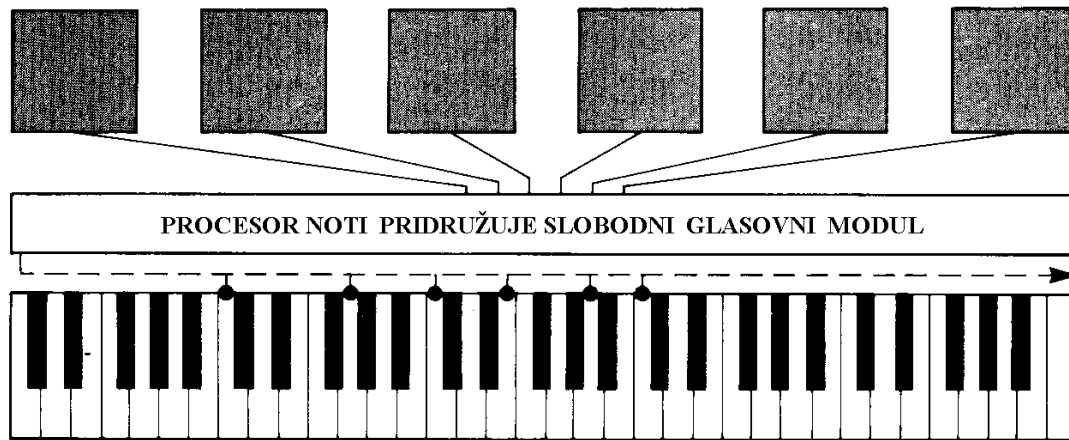
Postoji nekoliko varijacija polifonih sintetizatora. Idealno bi bilo da polifoni sintetizator ima na raspolaganju jedan glas za svaku tipku na klavijaturi: tada je potpuno polifon. Tako bi 5- oktavni sintetizator trebao imati 61 glasovni modul. Prvi polifoni sintetizatori bili su potpuno polifoni, ali iako su imali mali broj oktava (dvije do tri), to rješenje bilo je vrlo skupo.



Slika 3.4: Potpuna polifonija: 12 glasovnih modula za 12 tipki klavijature

Kao rezultat toga nastao je koncept sintetizatora s pridruživanjem glasova (*voice assignable synthesizer*). Princip je sljedeći: pošto glazbenik zapravo svira samo četiri do osam nota istovremeno, umjesto gomile redundantnih glasovnih modula, ovaj

sintetizator ima ih manji broj, i to na način da instrument registrira koja je nota odsvirana, te zapošljava slobodni glasovni modul, pridružujući mu tu notu.



Slika 3.5: 6-polifoni sintetizator s pridruživanjem glasova

3.2.1 Prioritet tonova (*Note Priority*)

Kada su svi glasovni moduli zaposleni, ne možemo više odsvirati nijedan drugi ton - sintetizator je takoreći "zaglavljen" (*stuck*). Tada valja ili proizvesti taj ton na račun drugog koji ćemo ugasiti, ili ga uopće ne proizvesti, dok neki glasovni modul ne bude slobodan. Stoga postoje dva osnovna principa, od kojih se najčešće može jedan odabrati po volji:

Prioritet posljednjog tona (*Last Note Priority*): posljednji ton uvijek je odsviran, a prvi koji je bio pokrenut od onih tonova koji sviraju, ugašen je.

Prioritet sviranih tonova (*Held Note Priority*): ton koji želimo odsvirati neće se čuti dok ne oslobodimo neku od tipki koje držimo, a tako i neki od glasovnih modula.

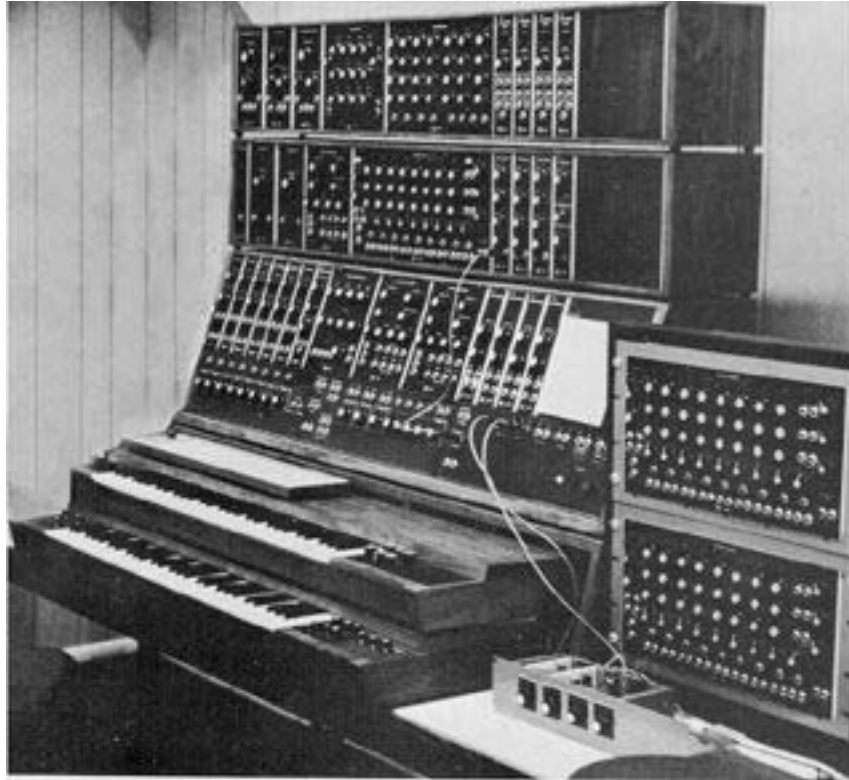
Postoje i rješenja koja se rjeđe upotrebljavaju, kao što su **prioritet nižeg tona (*Low Note Priority*)**, te **prioritet višeg tona (*High Note Priority*)**. Princip prvog je da je moguće čuti posljednju notu samo ukoliko je ona niža od svih ostalih, a na račun one koja je odsvirana najprije. Isto vrijedi za prioritet višeg tona, uz to da će se novi ton proizvesti samo ukoliko je viši od svih drugih.

3.2.3 Multitimbralni sintetizatori

Multitimbralnost je pojam koji označava sposobnost sintetizatora da istovremeno proizvodi različite zvukove, koji se kontroliraju preko više MIDI kanala (MIDI protokol razmjenjuje informacije na 16 kanala). Uvjet za multitimbralnost je polifonija - monofoni sintetizatori ne mogu biti multitimbralni.

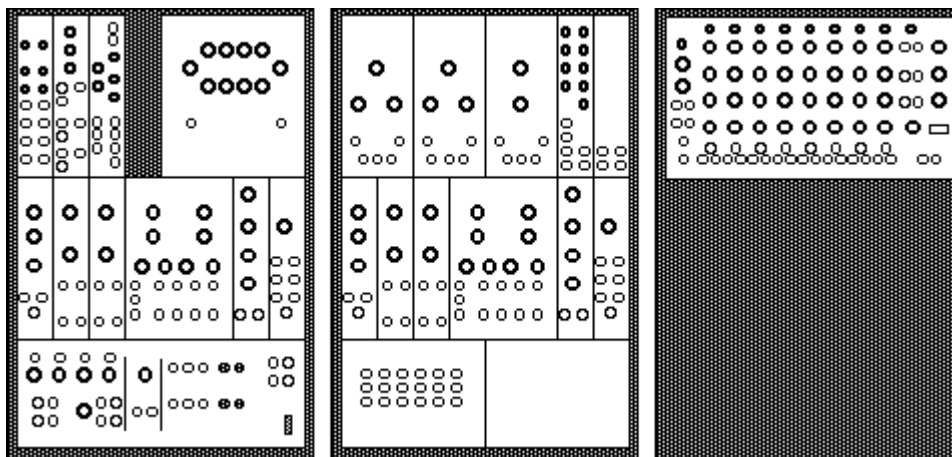
4. Analogni sintetizatori (Evolucija sintetizatora)

4.1 Prvi sintetizator - modularni sistem



Slika 4.1: Moog: Prvi sintetizator u današnjem smislu riječi

1963. godine, Robert Moog (USA) proizveo je prvi sintetizator u današnjem smislu riječi. Svi principi i osnovni elementi Moogovog sintetizatora, prisutni su u ostalim sintetizatorima, bilo u analognom, bilo u digitalnom obliku. Šezdesetih godina stanje u elektronici bilo je takvo da još nije bilo integriranih krugova više integracije, tako da je sintetizator bio sastavljen od diskretnih elemenata - to podrazumijeva fizički velike dimenzije. Uz to, visoke cijene prvih sintetizatora bile su ekstremno visoke. Zbog toga je prvi sintetizator Roberta Mooga bio modularnog tipa - sastavljen je od proizvoljnog broja modula koji se fizički spajaju u jedno kućište, a električki se spajaju kablovima čiji položaj je promjenjiv, zavisno od zvuka koji želimo postići (razne kombinacije električkog toka signala nazivaju se rutinzi, engl. *routing*). Tako je svaki korisnik imao izbor nad brojem određenih modula koje će kupiti, pa tako i mogućnostima cijelog modularnog sistema. Svaki pokvareni modul mogao se promijeniti - ekvivalentno današnjoj promjeni pokvarenog integriranog kruga, tako da je to još jedan razlog i prednost podjele cijelog sistema u module.



Slika 4.2: Izgled modularnog sistema Moog

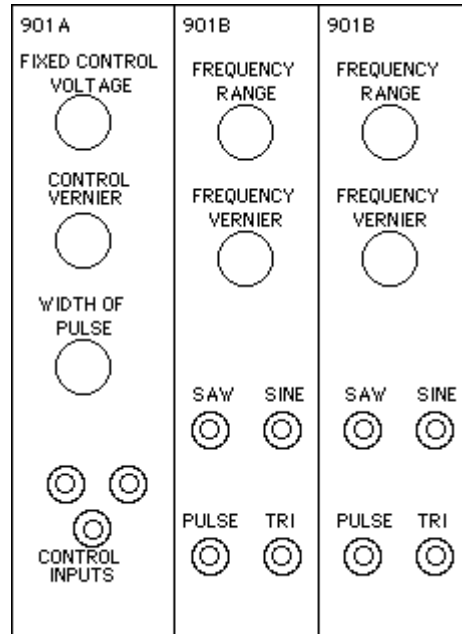
4.1.1 Moduli

Na tržištu su u početku prodaje Moogovog sintetizatora bili dostupni sljedeći moduli:

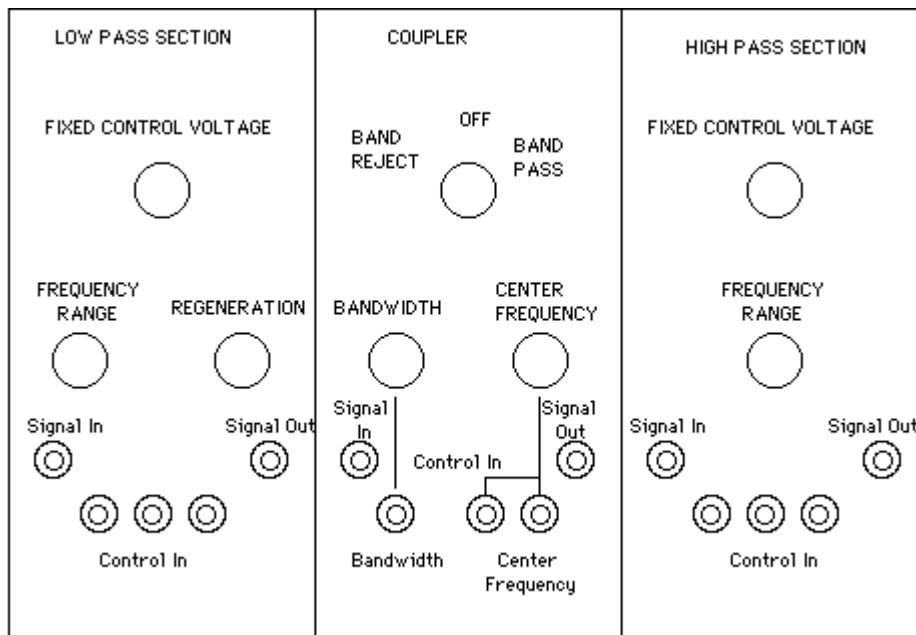
- **Naponom upravljani oscilator** (901 Voltage Controlled Oscillator, 901A, 901B VCO)
- **Naponom kontrolirana pojačalo** (902 Voltage Controlled Amplifier)
- **Generator envelope** (911 Envelope Generator)
- **Naponom kontroliran niskopropusni filter** (904A Voltage Controlled Low Pass Filter)
- **Naponom kontroliran visokopropusni filter** (904B Voltage Controlled High Pass Filter)
- **Modul za kombinaciju prethodna dva filtra, tj. za dobivanje pojasnog propusta** (904C Filter Coupler)
- **Grafički ekvalizator** (907 Fixed Filter Bank)
- **Sekvencer** (960 Sequential Controller)
- **Generator šuma** (Random Signal Generator 903A)

Uz navedene module na tržištu se pojavio još čitav niz sličnih, ali unaprijeđenih, bilo Moogovih, bilo izrađenih od strane pojedinaca (što je bilo moguće zbog njihove jednostavnosti i kompatibilnosti). Klavijatura kao glavni kontroler, odvojena je od kućišta s modulima i daje kontrolni napon od 1V po oktavi.

Svaki modul sam je za sebe nezavisna elektronska naprava. Praktički nema veza ugrađenih unutar sistema: ništa se ne dešava dok se pomoću kablova moduli ne spoje zajedno. Kablovi na krajevima imaju 1/4-inčne telefonske priključke. Slika 4.3 prikazuje izgled oscilatorske, a slika 4.4 filtarske sekcije modula.



Slika 4.3: Oscilator 901A i oscilatori 901B modularnog sistema Moog



Slika 4.4: Filtarska sekcija modula modularnog sistema Moog

Moduli ispunjavaju jednu od tri tipa funkcija - one su:

- **Izvor signala**
- **Procesor signala**
- **Izvor kontrolnog signala**

Kablovi koji spajaju module tada prenose jedan od tri tipa informacije:

- **Signali** (čujni signal - u analognom naponskom obliku)
- **Kontrolni napon** (napon koji govori modulima što da rade)
- **Okidni naponi** (pulsevi koji govore modulima kada da nešto naprave)

Male su električne razlike između tipova modula. To znači da jedan oscilator može biti korišten kao izvor signala, kontrolnog ili okidnog napona. Ne postoji ni dobar ni loš način korištenja Moogovog instrumenta - niti jedna kombinacija kablova ili potencijometarskih podešavanja ne može ga oštetiti. Naravno, neke kombinacije modula ne proizvode nikakav zvuk.

Nakon Moogova sintetizatora, pojavilo se nekoliko sličnih modela drugih proizvođača. Sve su to bili modularni sistemi, ali su bili kompaktniji, tj. najčešće je cijeli osnovni sistem bio modul (s mogućnosti nadogradnje). Tipični predstavnici toga doba su sintetizatori: EMS VCS 3/Synthi A, te ARP 2600. Mijenjanje toka električnih signala i dalje se vrši kablovima, kao i podešavanje parametara potencijometrima.

4.2 Uvođenje fiksnog *routinga*

Pošto je zapaženo da je najčešće korištena kombinacija *routinga* - osnovni princip subtraktivne sinteze, tj. lanac oscilator- filter- pojačalo, razvoj sintetizatora početkom sedamdesetih kreće u sljedećem pravcu: izbacuje se prekapčanje kablovima, a ugrađuje se fiksni *routing*, po ovom slijedu, unutar sistema. Generatori triju envelope (visine tona, rezonantne frekvencije filtera i pojačanja) nalaze se u svakom stupnju, a svi parametri se i dalje podešavaju potencijometrima. Niskofrekvencijski oscilatori također se pridjeljuju određenim stupnjevima uključivanjem jednostavnih sklopki. Naposljetku, i fizički izgled sintetizatora se mijenja: klavijatura se stapa u jednu kompaktnu cjelinu sa sintetizatorom.

Prednosti ovog novog razmišljanja su jednostavnost i preglednost programiranja zvuka, dok su mu mane smanjena kreativnost; iz lanca možemo izbaciti određeni neželjeni element (npr. filter), dok ga nemamo mogućnost premještati s jednog mjesta na drugo u lancu. Stoga je evidentno da na ovaj način imamo manju slobodu promjene toka signala nego kod modularnog sistema s kablovima.

Ovi sintetizatori nazivaju se potpuno varijabilnim. Svaki parametar mijenjamo potencijometrom i stoga ne postoji nikakva mogućnost memoriranja zvuka. Ako želimo novi zvuk, moramo ga preprogramirati, tj. namjestiti potencijometre. Za snimanje u studiju to ne predstavlja nikakav problem, jer tamo ima vremena da se sintetizator preprogramira, no za izvedbe u živo bilo je potrebno da glazbenik ima nekoliko unaprijed isprogramiranih instrumenata, svaki sa svojim zvukom.

4.3 Memoriranje parametara

Prvi pokušaji memoriranja zvuka bili su, kao i kod računala, sa bušenim karticama (RMI Keyboard Computer KC-II). Dolazak digitalne tehnologije (memorije) unaprijedio je sintetizatore. Memoriranje se vršilo na sljedeći način: položaj svakog potencijometra kvantizirao se A/D konverterom malog broja stupnjeva (16), pretvorio

u digitalni broj i memorirao. Kasnije se taj zvuk pozvao brojem željenog programa (stoga su sintetizatori dobili i numeričku tastaturu). Taj zvuk bio je sada u sintetizatoru bez obzira na položaj potencijometara - tak kada smo pomakli neki od njih, promijenili smo određeni parametar.

4.4 Uvođenje glavnog oscilatora

Još jedno važno unaprjeđenje došlo je iz digitalne tehnologije: generator takta ili visokofrekvencijski multivibrator, čiji je signal vrlo visoke frekvencije i vrlo stabilan, zamijenio je klasične oscilatore. Njegov takt, frekvencije stotina kiloherca, određenim digitalnim djeliteljima frekvencije pretvara se u takt čujnih frekvencija koje odgovaraju osnovnim frekvencijama željenih tonova glazbene ljestvice. Tim se taktom okida jedan od generatora - ili pilastog ili pravokutnog signala. Na taj način dobivamo valne oblike vrlo stabilnih frekvencija, za razliku od oscilatora kod starijih generacija sintetizatora, koji su zbog svoje nestabilnosti proizvodili čujne varijacije u visini tona.

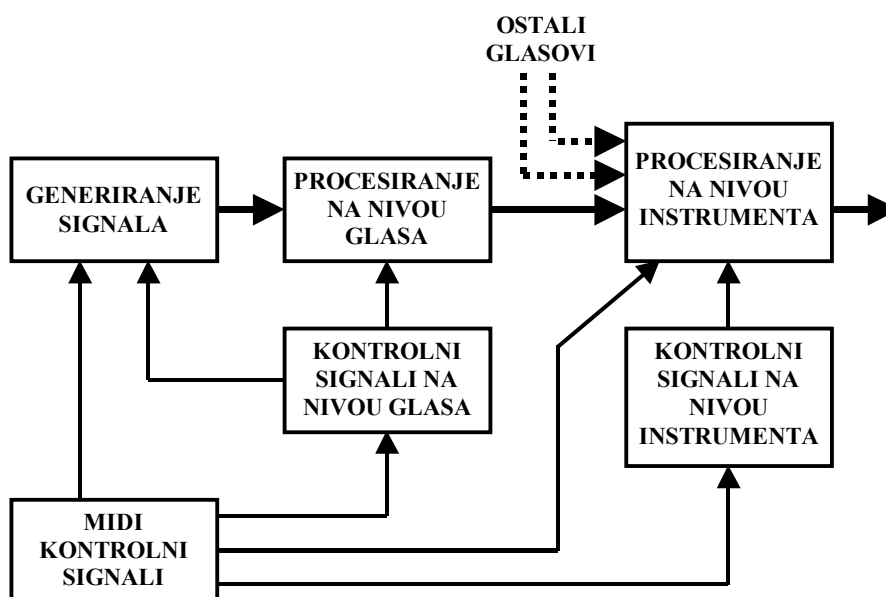
Važna napomena: Ovdje se još uvijek radi o analognoj sintezi; ono što je kod ove vrste sintetizatora digitalno jest isključivo mogućnost memoriranja zvukova i dobivanje stabilnije frekvencije valnih oblika pomoću digitalnih sklopova.

4.5 Zaključak

Pod analognom sintezom, dakle, podrazumijevamo generiranje valnih oblika pomoću fizički postojećih naponom kontroliranih oscilatora, njihovo filtriranje na analognim naponom kontroliranim filtrima, pojačavanje na naponom kontroliranim pojačalima te sumiranje pomoću analognog sumatora.

5. Digitalni sintetizatori

Svaki digitalni glazbeni sintetizator je u načelu računalo. Postoji mnogo tipova sinteza, no kada se usporede načini realizacije, sve one tehnički funkcioniraju na manje-više isti način. Poput CD player-a, digitalni sintetizatori na izlazu generiraju tok brojeva konstantne frekvencije (frekvencije uzorkovanja), koji se pretvaraju D/A konverterom u analognu formu, tj. u čujni signal. Cijelo procesiranje zvuka obavlja se prije D/A konvertera, u digitalnoj domeni - digitalnim oscilatorima, filtrima i pojačalima: sve je to ništa drugo nego jedna masovna kalkulacija. Digitalni sintetizator ima iste funkcije kao i analogni sintetizator. Ali umjesto električkih krugova, svaki glasovni modul je potprogram u glavnom programu sinteze: taj program je zapravo petlja koja se ponavlja jednom za svaki izlazni uzorak, dakle frekvencijom uzorkovanja. Spomenuti potprogrami moraju biti izvršeni najmanje jednom po periodu izlaznog uzorka. Pošto je brzina procesora ograničena, tako je i broj potprograma - glasovnih modula koji se istovremeno mogu obavljati unutar glavnog programa, ograničen. Zbog toga je i broj nota koje mogu biti odsvirane i raspoloživa kompleksnost zvuka, određena brzinom centralnog procesora (CPU). Kao i kod računala, brži procesor je i skuplji, pa se to odražava na cijenu instrumenta. Cijena može biti smanjena korištenjem niže frekvencije uzorkovanja, ali to se lako primjećuje u nižoj kvaliteti zvuka. Najbolji današnji sintetizatori približavaju se standardu kvalitete CD-a. Ovdje je prikazan tipični tok signala, digitalni ekvivalent analognog routinga:



Slika 5.1: Tok signala kod digitalnog sintetizatora

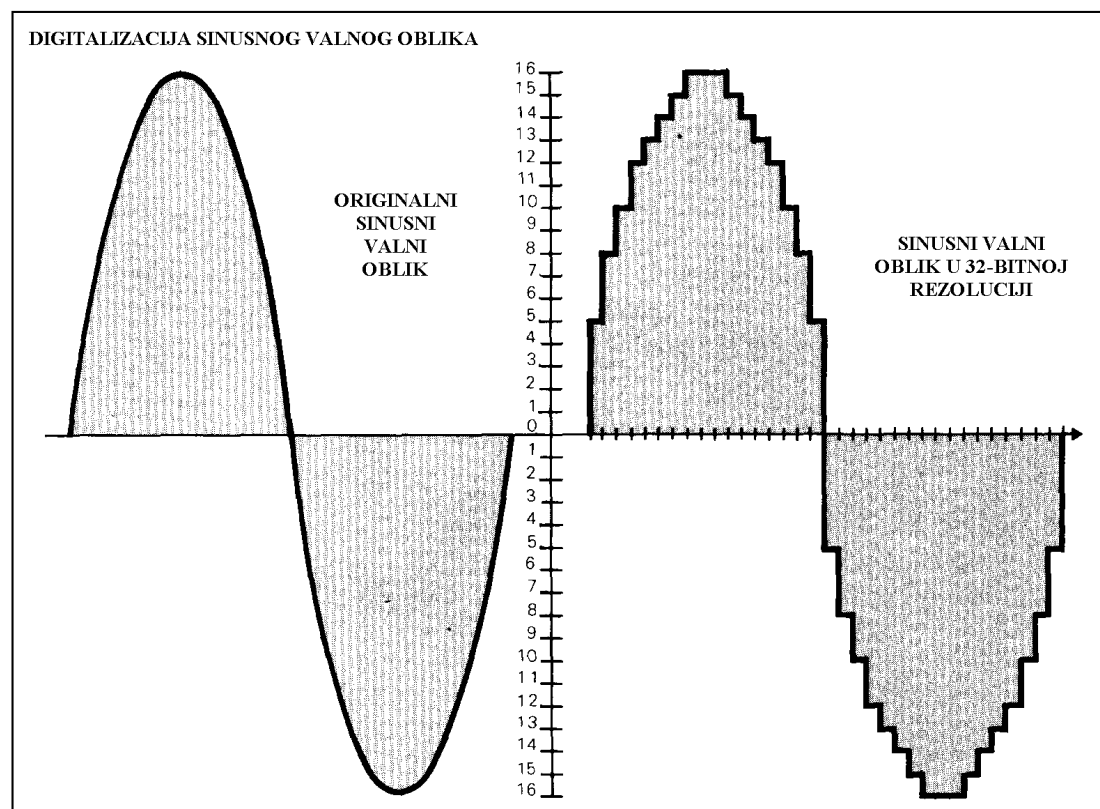
Generiranje signala unutar jednog glasovnog modula, zatim podešavanje toka signala i svih parametara da se dobije određeni zvuk, i u analognoj i u digitalnoj tehnici na engleskom jeziku naziva se "*patch*". Dakle, slika prikazuje jedan *patch* u digitalnoj tehnici: tri gornja pravokutnika predstavljaju proces koji direktno proizvodi signal i koji mora biti izvršen vrhunskom brzinom. Kontrolni signali mogu biti izvršavani puno sporije, tako da je npr. jeftinije dodati jedan niskofrekvencijski oscilator svim glasovima nago dodati još jedan generator signala.

5.1 Generiranje signala

Pod generiranjem signala podrazumijevamo stvaranje valnog oblika koji odgovara tonu određene visine - to je jedan glas. Isključivo u stupnju za generiranje signala djelujemo na promjene u visini tona, i zbog toga su u shemi ovom stupnju pridjeljeni kontrolni signali.

5.1.1 Generiranje signala pomoću tablice valnih oblika

Srce svake rutine za generiranje signala je pretraživanje tablice valnih oblika (engl. "Wavetable Lookup"). Tablica valnih oblika predio je memorije koji sadrži digitalnu reprezentaciju segmenata određenog zvuka. Ona može biti jednostavna kao period sinusnog vala (slika 5.2), ili jako kompleksna, kao snimka tona nekog klasičnog instrumenta.



Slika 5.2: Digitalizacija sinusnog valnog oblika 5-bitnom kvantizacijom

U svakom periodu uzorka (koji je recipročna vrijednost frekvencije uzorkovanja), iz tablice se uzima vrijednost i šalje na procesiranje. Ako je frekvencija prosljeđivanja uzoraka jednaka onoj korištenoj kod snimanja, visina nastalog tona bit će jednaka. U slučaju valnog oblika koji se ponavlja (sinusni, trokutni...) i kod kojeg redovito memoriramo uzorke jednog perioda, frekvencija tona bit će jednaka frekvenciji uzorkovanja podijeljenoj sa brojem uzoraka unutar tablice. Kontinuirani ton proizvodi se tako da se tablica čita od početka do kraja više puta; na ovaj način ga je jednostavno izvesti samo za osnovne valne oblike, dok kod kompleksnijih valnih oblika imamo problem sa tzv. lupiranjem (engl. *looping*). *Looping* znači vraćanje pokazivača čitanja

sa zadnjeg retka tablice na neki prethodni, nakon što je ona pročitana. Tablica se i dalje se čita u petlji - samo u sljedećim prolazima s tog mjesta do kraja. Mjesto u tablici na koje će se pokazivač vratiti moramo odabrati izuzetno pažljivo, jer se javljaju čujne promjene - pojava neugodnih viših harmonika zbog nagle promjene vrijednosti signala. Ova će problematika biti kasnije šire objašnjena u opisivanju rada *sampler*a. Uz pojam *looping*a podrazumijevamo tablice u kojima je memorirano nekoliko desetaka pa i stotina perioda osnovnog tona; kod jednostavnih valnih oblika koji su u memoriji prezentirani samo jednom periodom, nema smisla govoriti o *loopingu*.

U klasičnim digitalnim sintetizatorima koji sadrže tablice valnih oblika u ROM-u, kod svih kontinuiranih zvukova (zvukovi udaraljki npr. to nisu - njihova se tablica čita samo jednom) mjesto povratka na određeni redak tablice već je tvornički fiksno odabrano - tako da nema čujnih prijelaza; stoga nemamo mogućnost, a ni potrebu njegove promjene.

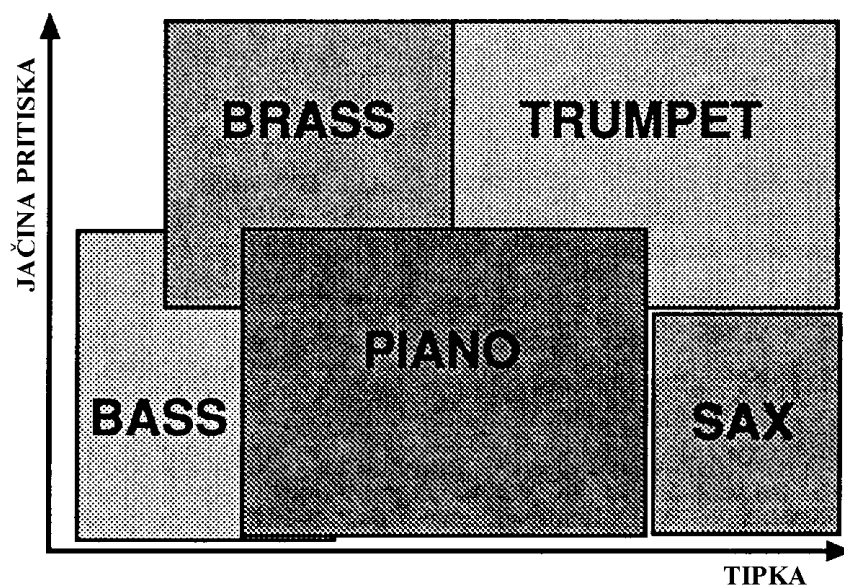
5.1.2 Transpozicija tonova

Da bi se dobile druge visine tona, vrijednosti iz tablice ne uzimaju se normalnim redosljedom: na primjer, ako uzimamo svaku drugu vrijednost (uzorak), frekvencija izlaznog tona se udvostručuje, jer je signal sada dva puta gušći na vremenskoj osi. Ako je ton kompleksan, frekvencija svih harmonika se udvostručuje - dobivamo efekt slušanja glazbene ploče dvostrukom brzinom. Da bi se dobio ton za oktavu niži, svaka vrijednost tablice trebala bi se koristiti dva puta za redom, no to bi unijelo primjetna izobličenja (više je izražena širina stepenica PAM-signala koji dobivamo nakon konverzije). Zbog toga moderni sintetizatori računaju vrijednost koja bi pala između dva retka tablice (proces interpolacije). Složene rutine za interpolaciju mogu proizvesti bilo koju visinu tona, s vrlo malim izobličenjima. Interpolacija je proces koji dodatno oduzima vrijeme procesoru, tako da je i ona zaslužna za ograničen broj tonova na pojedinom instrumentu.

5.1.3 Višeslojnost zvuka (*multilayering*) i zone (*zones*)

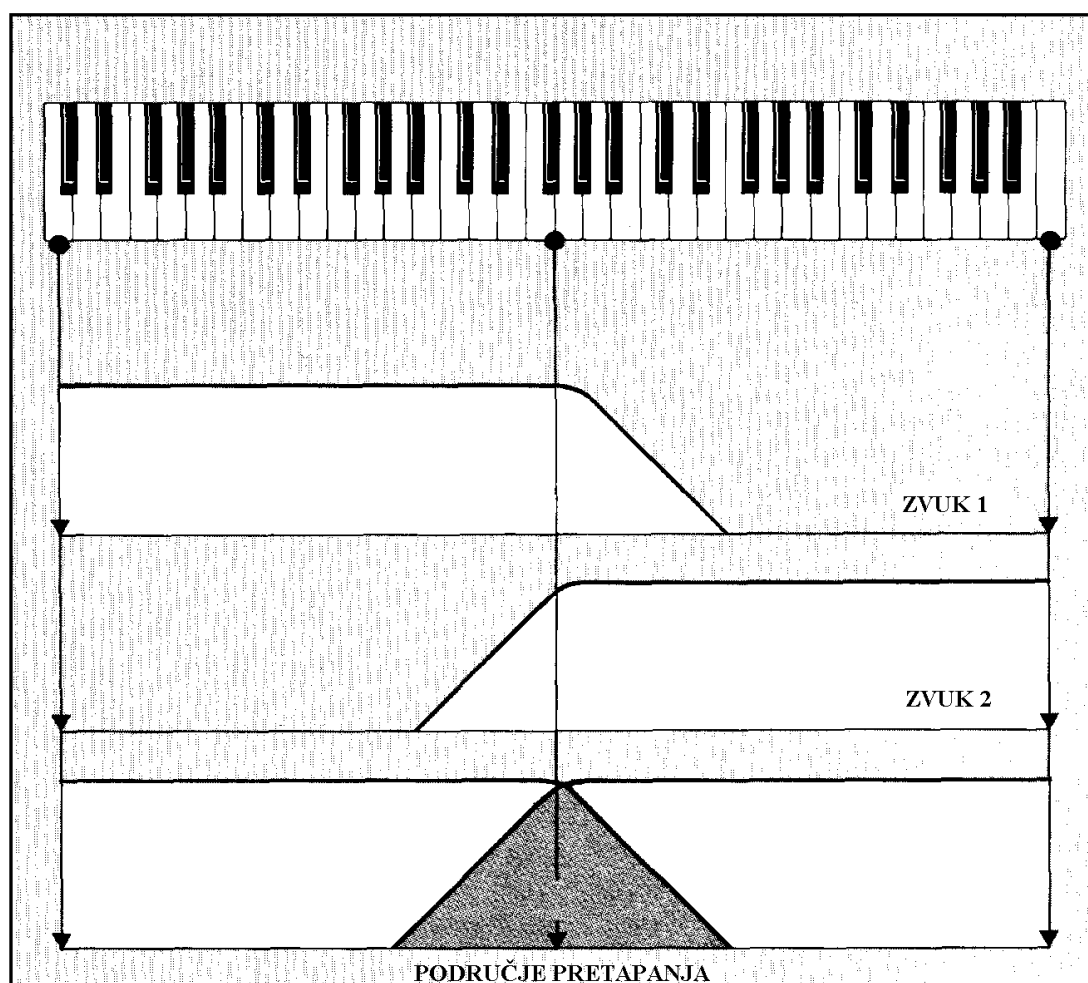
Maksimalni broj nota koje mogu biti odsvirane istovremeno na određenom instrumentu ovisi i o tome koliko je glasova korišteno za dobivanje određenog *patch*a zvuka - digitalni sintetizatori omogućuju korištenje najčešće jednog, dva ili četiri glasa za pojedini zvuk. To znači da je takav zvuk "višeslojan". Svaki sloj (engl. "*layer*") kod nekih je instrumenata zasebno procesiran, a kod nekih digitalno zbrojen s ostalima i suma prosljeđena u procesiranje. U oba slučaja, pridjeljivanje više glasova jednoj tipki klavijature smanjuje polifoniju sintetizatora: ako je ton višeslojan, i polifonija će biti toliko puta manja.

Istovremeno zvučanje različitih tonova može se učiniti uvjetovano dinamikom i visinom tona definiranjem zona. Takva situacija prikazana je dijagramom na slici 5.3 – pritisci različitih tipki različitom dinamikom pokreću zvukove različitih instrumenata.



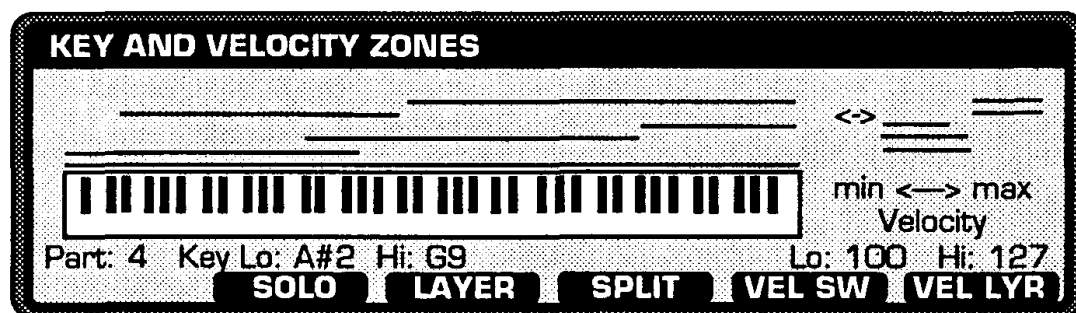
Slika 5.3: Pokretanje različitih zvukova jednom klavijaturom definiranjem njihovih notnih i amplitudnih zona

Granice između pojedinih zona ne moraju biti nagle, već se zone mogu pretapati. Slika 5.4 prikazuje situaciju u kojoj je definirano takvo pretapanje (*soft splitting*). Zone u primjeru definirane su samo različitim položajem tipki, a ne jačinom pritiska.



Slika 5.4: Pretapanje zona (*soft splitting*)

Slika 5.5 prikazuje jedno praktično grafičko rješenje definiranja zona, realizirano u sintetizatoru Korg Wavestation EX.



Slika 5.5: Zone visine tona i jačine pritiska na displayu sintetizatora Korg Wavestation EX

5.1.4 Metode poboljšanja nedostatka prirodnosti uzorkovanog zvuka

Sinteza pomoću tablice valnih oblika ima jedan vrlo ozbiljni nedostatak: vrlo statičan spektar zvuka. Većina realnih instrumenata proizvodi dinamički spektar koji se mijenja za vrijeme trajanja note i nikad se ne ponavlja na isti način; u sintetizatoru se lupirani dio petlje stalno ponavlja i zvuk je uvijek isti. Tako jednostavna tablica valnog oblika daje vrlo vjeran zvuk npr. dječjih orgulja, ali u suštini vrlo dosadan. Da se ovaj problem prevlada pronađen je čitav niz različitih načina:

Vrlo duge tablice uzoraka

Ako imamo vrlo duge tablice uzoraka, tj. uzorkovani ton traje vrlo dugo, imamo dovoljnu zalihu zvučnog materijala da željeni ton odsviramo u jednom prolazu tablica, ili barem lupiramo dovoljno dug period koji zvuči kao vibrato. Uobičajeno, digitalni sintetizatori koriste snimke klasičnih instrumenata kao sadržaj tablica valnih oblika. Ako postoji mogućnost da pojedinac snimi svoje vlastite snimke, naprava se zove *sampler*, a ako je ograničen na snimke proizvođača - *sample player* (*sample playback unit*). Tvrtka koja je prva izašla na tržište sa samplerima bila je E-mu i ima širok izbor instrumenata zasnovanih na toj tehnici, ali gotovo svaki sintetizator na današnjem tržištu ima određene snimljene sampleove.

Frekvencijska modulacija

Postupak naučen na modularnim sintetizatorima o kreiranju dinamičnih zvukova - koristeći jedan oscilator za modulaciju frekvencije drugog, u digitalnom sistemu može se realizirati s elegancijom i kontrolom. Zvukovi nisu bitno "prirodni" u smislu da zvuče kao klasični instrumenti, ali nešto od realističnog posjeduju. Za zvukove koji oponašaju instrumente s čekićem i žicama (ili pločicama), te zvukove zvona, ova tehnika je nenadmašna. Korporacija Yamaha imala je patent na FM-sintezu, koji je nedavno istekao. Sada je i ostali proizvođači počinju ugrađivati u svoje instrumente, bez obzira na vrijeme koje je prošlo od njene prve primjene, što samo pokazuje njenu popularnost. Principi i primjena FM sinteze bit će dublje analizirani u poglavlju o sintezama.

Oblikovanje valnog oblika (*Waveshaping*)

Ova tehnika dodaje namjerno "izobličenje" tabličnom generatoru valnog oblika. Preduvjet je da generator sam traži povoljno mjesto na koje će se vratiti nakon pročitane tablice. To je izvedeno tako da koristeći izlaz iz rutine koja pretražuje tablicu, nalazi onu vrijednost u tablici, na čije se mjesto povratkom dobiva neprimjetni prijelaz (minimalna izobličenja). Ako se tada izlazu iz rutine doda neka lagano promjenjiva vrijednost prije traženja mjesta za povratak, tada se i mjesta u tablici na koja se generator vraća mijenjaju i zvuk postaje vremenski promjenjiv. Tehnika je brza i jeftina.

Fizikalno modeliranje (*Physical Modeling*)

Najnovija vrsta sinteze je takozvano fizikalno modeliranje. Software za ovu tehniku dizajniran je da što vjernije oponaša stvarno ponašanje instrumenta. Na primjer, za model flaute treba dizajnirati potprogram koji rješava jednadžbe koje opisuju variranje tlaka u pisku flaute. Te jednadžbe moraju (između ostalog) biti bazirane ne jačini puhanja, kuta puhanja i povratnog tlaka iz ostatka instrumenta. Taj rezultat postaje faktor u drugom potprogramu, koji mora riješiti jednadžbu rezonancije piska, a rezultat te jednadžbe prosljeđuje se u potprograme koje uključuju ponašanje tijela flaute i istovremeno povratnom vezom vraća nazad u sljedeću iteraciju rutine za tlak u pisku flaute. Rezultati kalkulacije rezonancije tijela isto tako utječu na kalkulacije piska flaute. Na ovaj način, čitav sistem je međusobno povezan poput prave flaute.

Da se dobije zvuk ovakvog modela, specificira se kut i jačina puhanja, kao i otvorena ili zatvorena stanja svih tipki. Modeliranje zahtijeva mnogo procesorskog vremena, tako da su instrumenti koji se pojavljuju na tržištu većinom monofoni. Također su vrlo raširene kompjuterske simulacije stvarnih instrumenata dizajnirane na ovaj način. Interesantno je da neke od najprodavanijih simulacija oponašaju modele staromodnih sintetizatora - njihov prepoznatljivi zvuk ne može se u potpunosti oponašati klasičnom digitalnom sintezom. Analogni zvuk doživio je posljednjih godina veliki povratak i analogni sintetizatori su na visokoj cijeni; tako je i s njihovim virtualnim nasljednicima.

Kombinirane tehnike

Većina sintetizatora omogućava stvaranje slojeva tonova s dinamički promjenjivim miješanjem i to kreira dovoljno spektralnih varijacija. Tehnika tvrke Roland - započinjanje tona tranzijentom snimljenog instrumenta i pretapanjem u jednostavni (pilasti, pulsni) valni oblik vrlo je popularno. Većina sintetizatora omogućava da balans između dva samplea bude kontroliran jačinom udara tipke, što onemogućava točno ponavljanje istog zvuka. Kompanija Yamaha u svojim nekoliko modela (SY serija) kombinira snimljene sampleove sa FM glasovima.

5.2 Procesiranje na nivou glasa

Kao i kod analognih sintetizatora, generiranje signala tek je početak procesa. Zvuk mora biti oblikovan, i amplitudno i spektralno: to čine digitalni ekvivalenti pojačala i filtera. Stara terminologija naponom kontroliranog filtra/pojačala (VCF,VCA) u digitalnim sintetizatorima postaje - digitalno kontrolirani filter/pojačalo (DCF,DCA) i

tako dalje. Oni su kontrolirani generatorima envelope i niskofrekvencijskim oscilatorima, dobro poznatima iz analogne tehnike. Pojavljuju se i mnoge druge vrste procesora. Na pojačala, niskofrekvencijske oscilatore i envelope redovito se troši malo procesorske snage - filtri zahtijevaju mnogo više.

Analogni filtri zadržali su se u sintetizatorima dugo nakon što je sve ostalo postalo digitalno. To je zato što je digitalni filter računski kompleksan, i njegovo programiranje nije bilo dovoljno dobro izvedivo. To se promijenilo i današnji modeli imaju vrlo čiste i fleksibilne filtre u rasponu od najjednostavnijeg niskopropusnog pa sve do 14-polnog morphing-filtra sintetizatora UltraProteus. Kompleksniji filtri se često izvršavaju u drugom procesoru i zahtijevaju veći dio memorije, i tako podižu cijenu instrumenta. Ali kao i u analognim sintetizatorima, dobar filter može nadoknaditi mane generatora signala.

5.3 Procesiranje na nivou instrumenta

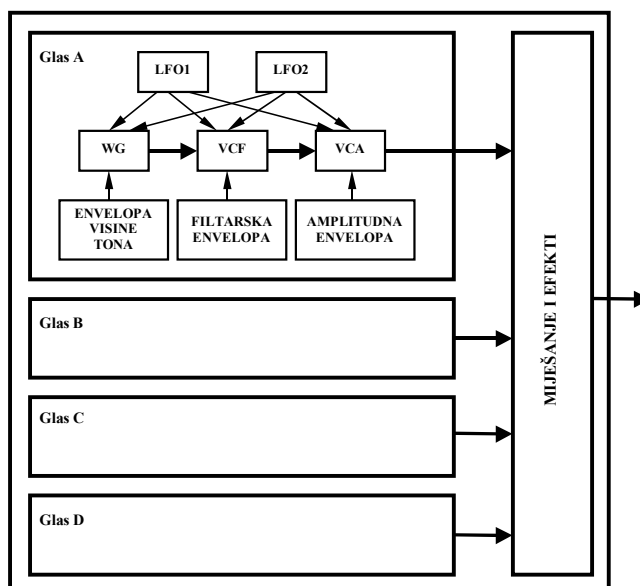
Kod procesiranja na nivou instrumenta podrazumijevamo efekt procesor koji postoji na izlazu gotovo svakog digitalnog sintetizatora, a kroz njega redovito ne prolazi signal samo jednog glasa, već suma svih glasova ili određenog broja njih. Stoga je u gornjoj slici naznačeno sumiranje s ostalim glasovima. Razlog zašto se na izlaz digitalnih sintetizatora ugrađuje efekt procesor (najčešće efekti reverba, chorusa i delaya) je jednostavno bolja prodaja instrumenta. Interni sintetizatorski efekt procesori najčešće nisu toliko kvalitetni kao vanjski profesionalni efekt procesori, ali uvelike podižu kvalitet i prirodnost izlaznog zvuka, pa tako i potražnju za tom vrstom instrumenta. Najčešće su to dvoulazni (stereo) efekt procesori, u koji se suma glasova uvodi nakon regulacije panorame, i u najvećem broju slučajeva u sintetizatoru se nalazi samo jedan efekt procesor, rjeđe dva. Ako određene glasove ne želimo propustiti kroz efekt, jednostavno ih skrenemo na neprocesirani izlaz. Stoga najčešće postoje dva stereo izlaza iz instrumenta: procesirani (s efektom) i neprocesirani (bez efekta). Postoji jedna važna prednost internih efekata: njegovi parametri zapamćeni su zajedno s određenim zvukom, što znači da jednostavnim pozivanjem određenog uprogramiranog zvuka pozivamo i njegov efekt. To je puno teže izvedivo sa vanjskim efektom, jer tada ga moramo pomoću MIDI-ja povezati sa sintetizatorom. Na kraju, nešto o terminologiji: *patch* + efekt (ili nekoliko *patches* + efekt) u sintetizatorima se naziva "performance"; to je kompletno procesiran zvuk koji izlazi iz sintetizatora (ukoliko nismo u multitimbralnom modu, koji omogućava istovremeno sviranje nekoliko *performancea*).

5.4 MIDI kontrolni signali

Svaki digitalni sintetizator prilagođen je MIDI standardu. Svi sintetizatori ne reagiraju na sve MIDI poruke, ali svi odgovaraju na note određene visine i većina ima mogućnost reagirati na dinamiku. Izvršavanje ostalih naredbi ovisi o sintetizatoru i detaljno je dokumentirano u tabeli (*MIDI implementation table*) koja se nalazi na kraju priručnika određenog sintetizatora. MIDI signali prevode se u interni jezik pojedinog sintetizatora i prosljeđuju kao parametri u glasovne module. MIDI je sistem koji radi paralelno sa 16 kanala, tako da kod multitimbralnih sintetizatora možemo u multi modu koristiti više zvukova odjednom.

5.5 Arhitektura instrumenta

Sve ovo zajedno čini neku vrstu arhitekture instrumenta. Na slici 5.6 prikazana je jedna tipična:



Slika 5.6: Tipična arhitektura digitalnog sintetizatora

Vidi se da je arhitektura fiksna i da se ne mogu mijenjati veze između osnovnih elemenata. Veze koje postoje vrlo su razumno odabrane, i ako neku od njih ne želimo, jednostavno je isključimo.

Neki instrumenti dozvoljavaju ograničene promjene toka signala - daju izbor destinacija nekih od veza ili imaju listu određenog broja unaprijed programiranih tokova signala između virtualnih modula. Takvu tehniku, nazvanu VAST (Variable Architecture Synthesis) upotrebljava kompanija Kurzweil u svom modelu K2000, a različite kombinacije veza između modula (oscilatora, filtara, pojačala...) nazivaju se algoritmi.

5.6 Osnovna terminologija digitalnih sintetizatora

Bitno je naglasiti da različiti proizvođači drugačije nazivaju termine koji se koriste u sintetizatoru, i zbog toga postoji zbrka u pojmovima. Tako npr. glas (voice) u nekim vrstama sintetizatora označava samo generator valnog oblika, a u nekima cijeli sklop generator+filtar+pojačalo. Stoga se pojmovi koje ću ovdje navesti ne moraju nužno nalaziti na istom mjestu hijerarhije određenog sintetizatora.

5.6.1 Glas

Najjednostavniji, početni dio od kojeg gradimo određeni zvuk, naziva se glasom (engl. *voice, tone*). Pod njim se podrazumijeva generator valnog oblika, digitalno upravljani filter i pojačalo, niskofrekvencijski oscilatori, envelope a katkad i drugo - uz definirane potrebne parametre, sve ovo čini jedan glas. U nekim, već spomenutim vrstama sintetizatora, kod kojih postoji mogućnost promjene redoslijeda (i veza) nekih od ovih modula, različite kombinacije zovu se algoritmi (važno: FM sinteza sastoji se od raznih kombinacija modulatora i nosioca, koji se isto tako nazivaju algoritmi, a pri tom se ne misli na prethodno spomenute). Što se tiče samog generiranja signala, on može biti generiran svim prije spomenutim metodama - od tablica valnih oblika (takav glas naziva se "wave"), pa do FM sinteze.

5.6.2 Patch

Do četiri glasa sumirana zajedno, a to sumiranje se provodi u različitim omjerima na koje se u realnom vremenu može utjecati kontrolnim signalima, naziva se *patch*. Glasovi se pritom zovu još i slojevi (engl. *layer*). Kod sintetizatora gdje se pod glasom podrazumijeva samo generator valnog oblika, pod *patchom* se podrazumijeva i procesiranje na nivou glasa (filteri, pojačanje, panorama...). Pod *patch* najčešće ulazi i definiranje dijelova klavijature (zone) koje će pokretati pojedini glas, jer kao što je rečeno - ne moraju nužno sve tipke na klavijaturi pokretati sva četiri glasa.

5.6.3 Program

Program ili **performance** najširi je pojam i podrazumijeva sve dosad navedeno zajedno sa procesiranjem na nivou instrumenta (interni efekti). I ovdje opet postoje razlike između raznih proizvođača: program je negdje samo *patch* + efekti, a negdje kombinacija nekoliko *patches*, zajedno sa njihovim zonama na klavijaturi i drugim parametrima + efekti. No, pod tim pojmom uvijek se podrazumijeva do kraja procesiran zvuk, spreman za izlazak iz sintetizatora.

Program je pohranjen u internu memoriju (ROM, RAM) sintetizatora i može biti pozvan MIDI porukom. Isto tako, programi mogu biti pohranjeni na različite vrste medija, kao što su kartica s podacima (*data card*; prije pojave kartica koristio se takozvani *memory cartridge*), audio kazeta, floppy disk itd.

5.6.4 Korisničko sučelje (*User Interface*)

Korisničko sučelje ima zadatak da omogući što bolju komunikaciju čovjeka i instrumenta; postoje sintetizatori koji imaju vrlo dobra i jasna rješenja a postoje i oni sa kojima je vrlo teško raditi. To najčešće ovisi o veličini ekrana (digitalnog displaya) kao i o logici hijerarhije menija. Posljednjih godina sintetizatori dobivaju šire displaye ispod kojih se nalazi nekoliko tipki s promjenjivim značenjem (*hot keys*), a trenutna funkcija naznačena je na samom ekranu. Većina instrumenata ima numeričku tipkovnicu za upisivanje podataka. Najnoviji sintetizatori imaju ekran osjetljiv na dodir, a neki drugi dopuštaju priključivanje tipkovnice PC standarda.

Većina sintetizatora ima nekoliko modova rada. Kad mijenjamo modove, većina tipki dobiva nova značenja. Tipični modovi rada su:

- **Sviranje jednog kanala** odjednom (MONO i POLY mod)
- **Sviranje nekoliko kanala** sa različitim zvukovima istovremeno (MULTI mod)
- **Mijenjanje parametara zvuka** (EDIT mod)
- **Editiranje različitih kanala** u Multi modu (Multi play liste)
- **Rad sa disk jedinicama** i ostalim uređajima za snimanje parametara programa i sampleova, kao i prebacivanje svih podataka između interne memorije i ostalih medija za pohranu
- **Mod za promjenu ponašanja instrumenta**, pod kojim podrazumijevamo podešavanje visine tona čitavog instrumenta (engl. "tuning"), definicije MIDI kanala, a negdje i kontrast displaya. Te vrste informacija pamte se nakon isključivanja napajanja.

5.6.5 Mijenjanje parametara (*Editing*)

U samim počecima, digitalni sintetizatori su, po uzoru na analogne, imali jedan potencijometar po parametru. U drugoj generaciji proizvođači su shvatili da, pošto korisnik najčešće mijenja samo jedan parametar odjednom, nama potrebe za tolikim brojem potencijometara. Zapravo je dovoljan zapravo samo jedan, zajedno sa digitalnim ekranom koji korisniku govori koji parametar mijenja. Ovo se ne odnosi na promjene parametara u toku sviranja, jer tada je potreban veći broj potencijometara, svaki za određeni parametar. Dakle, kod editiranja digitalnih sintetizatora, ne možemo samo okretati određene potencijometre, već moramo navigirati kroz cijeli niz kompleksnih menija, strana i podmenija, te proučavati priručnik (*manual*) da vidimo gdje se što nalazi. Kad pronađemo parametar koji želimo promijeniti, pomoću malog broja tipki (numeričke tastature, kao i tipki ispod ekrana čije je značenje promjenjivo i prikazano na ekranu) namjestimo novu vrijednost. Da bi promijenjena vrijednost ostala zapamćena nakon promjene programa, moramo je memorirati SAVE naredbom; kod operacija snimanja najčešće dobivamo pitanje da li smo sigurni, što je zaštita od nenamjernog brisanja, a na njega odgovaramo tipkama YES/NO.

5.6.6 Snimanje parametara (*Saving*)

Većina instrumenata radi na način sličan kompjuterskim aplikacijama, gdje se poziva određeni dokument i načine promjene, ali one neće ostati zapamćene dok nisu snimljene. Sintetizatorski programi ne snimaju se na disk (ukoliko to ne želimo), već u memoriju sintetizatora koja je napajana baterijom. Pošto starije vrste instrumenata imaju jako malo mjesta u memoriji, najčešće za 64 ili 128 programa, nužno je snimanje na disk. Neki sintetizatori imaju svoju vlastitu disk-jedinicu, a kod drugih pomoću MIDI protokola programe prebacujemo u računalo i snimamo na njegovu disk-jedinicu. Podaci ne moraju biti snimani i učitavani fiksnim redoslijedom, već imamo eleganciju izabiranja izvora i destinacije.

6. Vrste glazbenih sintetizatora

U ovom poglavlju bit će obrađene vrste sintetizatora, što nema veze s vrstom njihove sinteze, ili polifonijom. Vrste se međusobno razlikuju po tehničkim rješenjima - realizaciji promjene toka signala, memoriranja programiranog zvuka, te mogućnosti njegova ponovnog pozivanja. Tipovi različitih sintetizatora zapravo su posljedica tehnološkog razvitka. Svi oni mogu biti monofoni ili polifoni, i u načelu većina različitih sinteza, osim nekih koje su ostvarive samo digitalnom tehnikom (kao npr. rad sa *sampleovima*), mogu biti ostvarene na njima.

Sintetizatori koji su do danas proizvedeni, dijele se na sljedeće vrste:

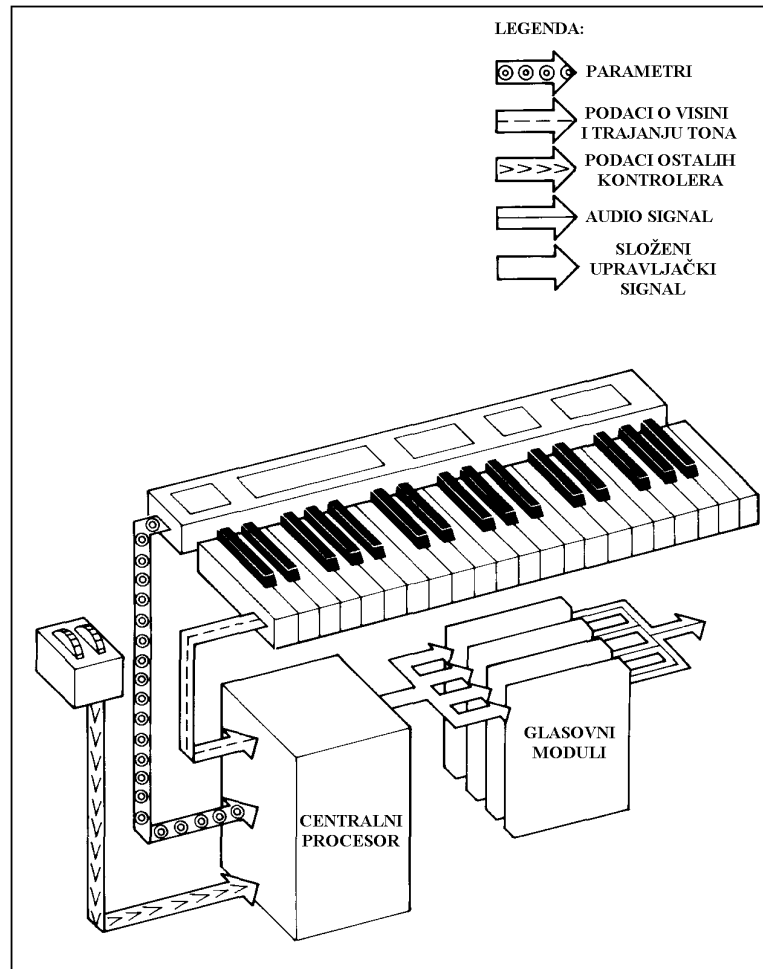
1. **Modularni (*Modulars*)**
2. **Potpuno varijabilni (*Fully Variables*)**
3. **Pretprogramirani (*Presets*)**
4. **Programabilni (*Programmables*)**
5. **Hibridni (*Hybrids*)**
6. **Sampleri (*Samplers*)**
7. **Sistemi računalno-sintetizator (*Dedicated Computers*)**
8. **Glazbeni programi i simulacije sintetizatora na računalu**

6.1 Sastavni blokovi sintetizatora

U ovom trenu nije nam bitno kako svaki od osnovnih dijelova sintetizatora radi, ali za razumijevanje razlike između različitih grupa, potrebno je definirati složene dijelove koji čine sintetizator. Stoga je najbolje razmatrati sintetizator u obliku sastavnih blokova i tada vidjeti kako se razne vrste sintetizatora koriste tim blokovima. Sastavni blokovi su:

- a) **Centralni procesor**
- b) **Glavni kontroler (klavijatura, ili neki drugi)**
- c) **Ostali kontroleri (performance controls)**
- d) **Korisničko sučelje**
- e) **Glasovni modul(i)**

Tipični sistemski dijagram prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 6.1: Tipičan sistemski dijagram glazbenog sintetizatora

a) Centralni procesor

Srce sintetizatora je centralni procesor - to je serija elektronskih krugova koji primaju informaciju koja im je poslana, procesiraju je i šalju namijenjenim krugovima. Na slici je prikazano da centralni procesor prima podatke iz korisničkog sučelja, klavijature i ostalih kontrolera (na slici: kotačići za modulaciju i visinu tona) i šalje ih u glasovne module.

b) Glavni kontroler:

Dio instrumenta s kojim glazbenik dolazi u kontakt kada svira zove se glavni kontroler. Uobičajena vrsta kontrolera je klavijatura, ali sintetizatori mogu biti pokretani mnogim drugim uređajima. Električne gitare su vrlo popularne kao kontrolni medij. Postoje također duhački kontroleri, perkusionistički itd. Glavni kontroler šalje informaciju koje note su odsvirane, kada i koliko dugo.

c) Ostali kontroleri

Kod sviranja gitare, gitarist unosi dodatni osjećaj u sviranje - npr. micanjem prsta na žici unosi vibrato. I violinist također unosi vibrato u svoje sviranje - to je moguće učiniti i sa sintetizatorom, ali je potreban posebni kontrolni mehanizam

da unese ovu informaciju u zvuk. Pošto je sintetizator instrument koji omogućava konstruiranje zvuka pomoću tri osnovna elementa - visine i boje tona te glasnoće, dodatni kontroleri omogućavaju variranje ovih parametara u realnom vremenu. Najčešći dodatni kontroleri su kotačić za promjenu visine tona i kotačić za modulaciju, koji primarno utječu na promjenu visine tona. Još jedan kontroler je onaj za dinamiku (promjene u glasnoći) - nalazi se u svim novijim sintetizatorima. Radi na principu dvije sklopke koje su ugrađene u svaku tipku: u trenutku pritiska na tipku, prva sklopka se otvori, a druga se zatvori kad tipka dođe do kraja gibanja prema dolje. Vrijeme između ta dva događaja kraće je što je veća jačina udarca, i na taj način je jačina udarca na spretan način pretočena u podatak. Čest kontroler je i takozvani "aftertouch". Radi se o kontroleru koji reagira na dodatni, jači pritisak na klavijaturu, nakon što je nota odsvirana. Taj kontroler najčešće služi za unošenje vibrata u melodiju, a koristan je jer glazbenik ne mora podizati ruke s klavijature.

d) Korisničko sučelje

Ako želimo kreirati vlastite zvukove, ili barem izabirati tvorničke, moramo imati tipke koje ćemo pritiskati i potenciometre koje ćemo okretati. To je funkcija korisničkog sučelja. Kao što omogućava izvođačevim informacijama da budu interpretirane na različite načine, korisničko sučelje omogućava nam da programiramo određeni zvuk i variramo osnovne elemente zvuka. U počecima sintetizatora, prije nego su mikroprocesori počeli biti ugrađivani u gotovo sve instrumente, kontrole koje su zapravo određivale vrijednost različitih parametara zvuka, bile su zapravo dio električkih krugova glasovnih modula. Danas, korisničko sučelje je samo niz tipki i potencijometara bez fizičkog dodira s krugovima sinteze. Centralni procesor provjerava njihov položaj mnogo puta u sekundi i pomoću tih podataka šalje potrebne podatke u glasovne module.

e) Glasovni modul(i)

Svaki sintetizator mora imati barem jedan glasovni modul, ili glas, da bi proizveo zvuk. Glasovni modul svrha je sveg prethodno spomenutog. U njemu završavaju svi podaci iz kontrolera i korisničkog sučelja i pretvaraju u zvučni signal. Svaki glasovni modul je u načelu sposoban proizvesti samo jedan zvuk istovremeno, tako da prirodno slijedi da sintetizator koji može odsvirati N nota mora imati najmanje N glasovnih modula. To su dakle osnovni blokovi koji čine sintetizator. Sve zapravo i nije tako jednostavno, pošto postoje i drugi aspekti razmatranja, kao što su uvođenje vanjskih signala itd. Sada se možemo vratiti klasifikaciji sintetizatora po vrstama:

6.2 Podjela sintetizatora po načinu rada

6.2.1 Modularni sintetizatori

Modularni sintetizatori ili modularni sistemi sklop su različitih modula, koji se audio kablovima povezuju zajedno i tako stvaraju konfiguraciju koja omogućava postizanje željenog zvuka. Spomenutim kablovima ne mora ići isključivo audio informacija - to mogu biti kontrolni signali kao i sinkronizacijski impulsi. Naponi korišteni u sva tri slučaja za prijenos informacije, takvi su da nema nikakve opasnosti od oštećivanja

modula krivim spajanjem - sve kombinacije su dozvoljene (npr. oscilator može služiti kao izvor valnog oblika, niskofrekvencijski modulator ili sinkronizator). Neke od tih kombinacija, naravno, neće dati nikakav zvuk (osnovni moduli modularnih sintetizatora, kao i bitni principi objašnjeni su u poglavlju o analognim sintetizatorima). Modularni se sintetizator može sastojati od npr. 6 modula oscilatora, nekoliko različitih filter modula, generatora envelope, pojačala i niskofrekvencijskih oscilatora. Klavijatura kao kontroler koristi se da generira podatke o visini tona (*controller data*) i ostale podatke: modulaciju, promjenu visine tona i dr. (*performance data*). Ljepota modularnog sistema je u njegovoj fleksibilnosti. Tako na primjer, sistem se može tako postaviti da klavijatura upravlja visinom tona svih oscilatora, polovica njih da ide u filtre, a drugi u neku vrstu jedinice za reverberaciju, a tada da se svi u jedinici za miješanje sumiraju zajedno. Nakon toga može taj signal biti opet filtriran, a zatim oblikovan jedinicom za stvaranje envelope. Postoji neograničen broj mogućnosti. Modularni sistem u načelu se koristi monofonim kontrolerom, ali pošto je primarno studijska naprava, to ne predstavlja nikakav problem: složeni zvukovi mogu biti realizirani snimanjem na više kanala. Prednosti modularnih sistema su, kao što je već rečeno, velik broj mogućnosti, a mane što su skupi i programiranje zvuka je vrlo sporo.

Predstavnici: Moog Series III, Roland 100M System, Serge Modular.

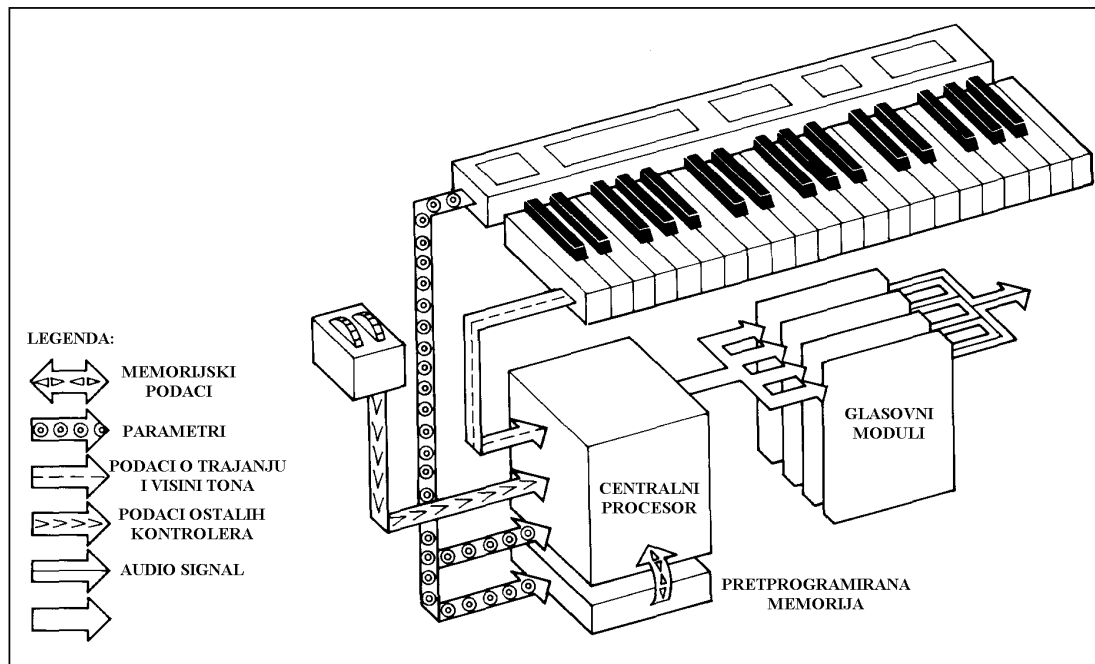
6.2.2 Potpuno varijabilni sintetizatori

Potpuno varijabilni bili su prvi komercijalni tipovi sintetizatora; slika pokazuje njihovu konfiguraciju. Ti sintetizatori su najčešće monofoni, ali ima i polifonih. Razlikovna osobina koja ga svrstava na njegovo mjesto je ta da su različiti elementi koji određuju zvuk definirani fizički s korisničkog sučelja - potencijometri koje okrećemo nalaze se u električkim krugovima glasovnog modula. Osnovna mana ove vrste instrumenta je, kao i kod modularnih sistema, nemogućnost brzog i lakog prijelaza od zvuka do zvuka; potrebno je vrijeme za promjenu svih parametara u svrhu kreiranja novog zvuka. U počecima sintetizatora, glazbenici su zbog te nemogućnosti brze promjene zvuka, morali imati nekoliko potpuno varijabilnih sintetizatora za sviranje u živo.

Predstavnici: Minimoog, Moog Rogue, Roland SH-101, Yamaha CS-01, Roland Juno-6

6.2.3 Pretprogramirani sintetizatori

Pretprogramirani sintetizatori pojavili su se kao direktan rezultat nedostataka potpuno varijabilnih; glazbenici nisu željeli trošiti vrijeme za postavljanje parametara novog zvuka, željeli su jednostavnim pritiskom na tipku dobiti, npr. zvuk oboe. Tako su se razvili pretprogramirani instrumenti; najčešće ova vrsta instrumenta nudi širok pojas imitativnih zvukova (uglavnom kopije akustičnih instrumenata), i gotovo uvijek sadrži jedan ili dva apstraktna zvuka. Glavno tržište pretprogramiranih sintetizatora bilo je u izvođačima u živo, te kao dodatak kućnim orguljama. Kao rezultat, mnogi pretprogramirani sintetizatori dizajnirani su da stoje na vrhu kućnih orgulja, s kontrolama smještenim na prednjoj strani, ispod klavijature, da olakšaju pristup glazbeniku u sjedećem položaju.



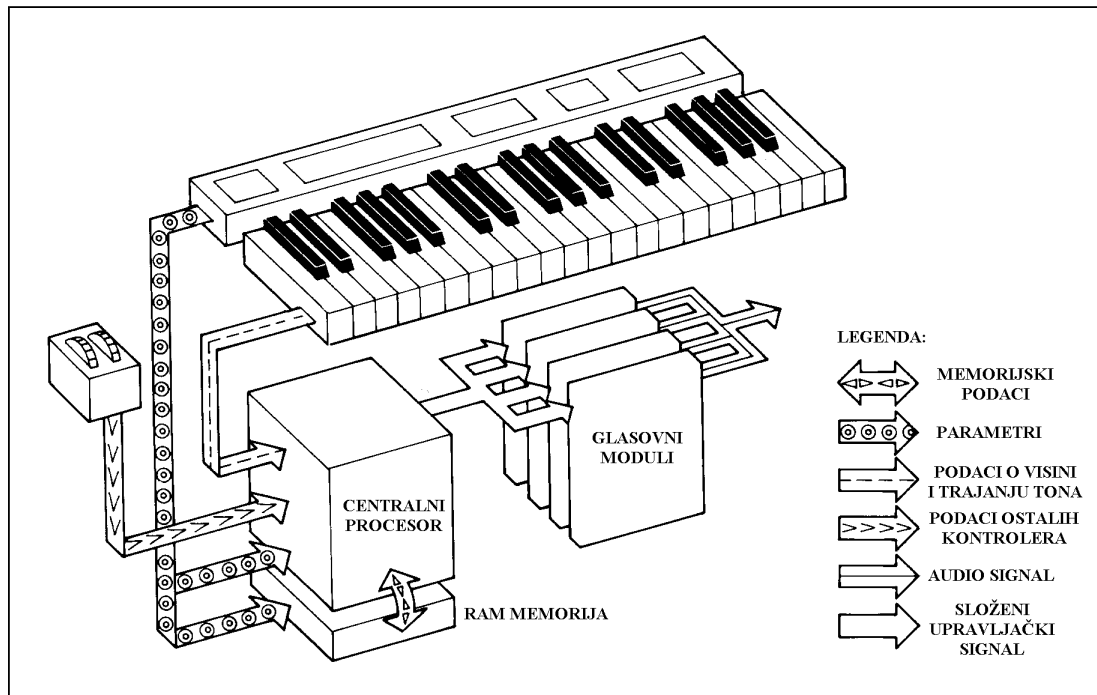
Slika 6.2: Sistemska dijagram preprogramiranog sintetizatora

Ipak, povećavanjem mogućnosti trenutnog pristupa pojedinom zvuku, smanjila se fleksibilnost instrumenta kao takvog. Slika prikazuje blok dijagram preprogramiranog sintetizatora. Osnovna razlika je sekcija centralnog procesora, koji mora pozvati podatke iz memorije nakon što interpretira informaciju iz korisničkog sučelja. Ako, na primjer, izaberemo program oboe, centralni procesor vidi da je pritisnuta tipka na korisničkom sučelju, i šalje informaciju glasovnim modulima, kako bi se postavili da proizvedu željen zvuk. Ta informacija je pohranjena u preprogramiranoj memoriji (*preset memory bank*).

Predstavnici: Roland Promars, Kawai 100-P, Korg Sigma

6.2.4 Programabilni sintetizatori

Prirodni korak, koji je ujedinio mogućnost uređivanja zvuka potpuno varijabilnih sintetizatora i brzinu preprogramiranih, bio je u dizajniranju sintetizatora kojim korisnik može konstruirati svoje vlastite zvukove i memorirati ih. S napretkom digitalne tehnologije to je postalo ostvarivo; prvi programabilni sintetizatori bili su polifoni, a pojavili su se oko 1970.



Slika 6.3: Sistemska dijagram programabilnog sintetizatora

Slika pokazuje sličnosti između pretprogramiranih i programirajućih sintetizatora. Ovdje, umjesto neizbrisive memorije iz koje se samo pozivaju podaci, memorija je promjenjiva; tok podataka je u oba smjera - u i iz memorije. K tome je korisničko sučelje mnogo zaposlenije, pošto kombinira sve tipke i potencijometre potpuno varijabilnih s tipkama za biranje programa pretprogramiranih instrumenata.

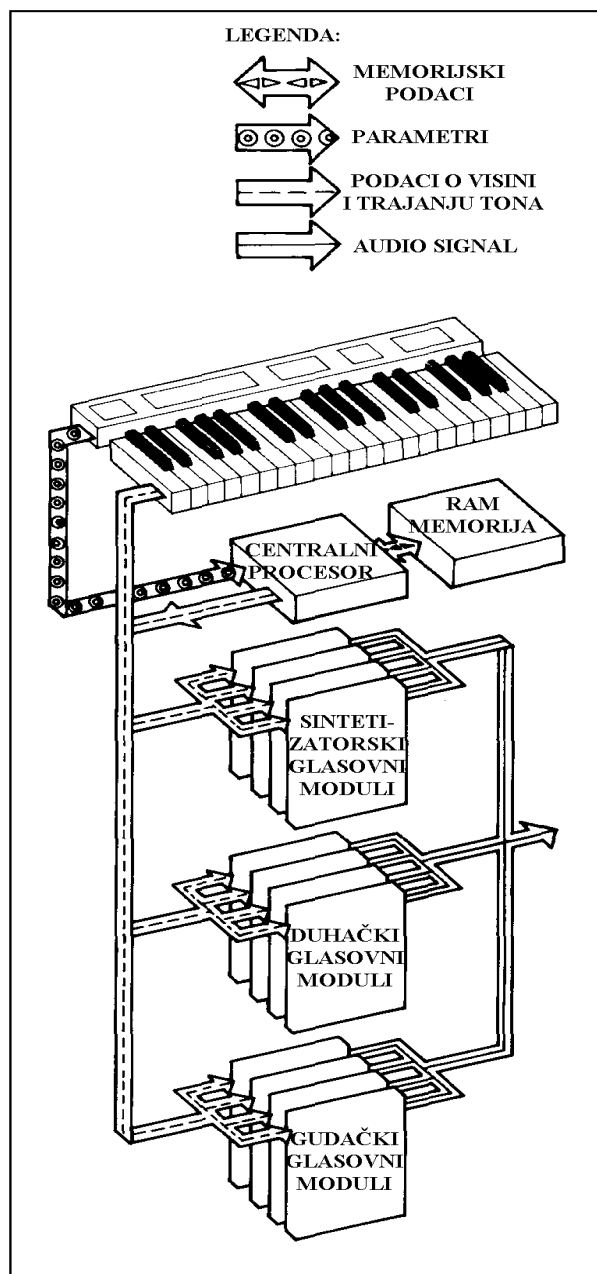
Kada se kreira vlastiti zvuk, potencijometri na korisničkom sučelju postavljeni su da postignu željeni efekt. Procesor tada "skenira" sve kontrole i pohranjuje parametre u memoriju. Nakon pozivanja programa iz memorije pomoću numeričke tipkovnice, procesor šalje tu informaciju glasovnim modulima, a ne parametre postavljene potencijometrima na korisničkom sučelju.

Programabilni sintetizatori bili su u osamdesetima najistaknutiji i najmnogobrojniji od svih sintetizatora. Gotovo su jednako prikladni za sviranje u živo i za rad u studiju.

Predstavnici: Roland Juno-106, Sequential Circuits Prophet 5, OSCar, PPG Wave 2.3, (Yamaha DX-5, DX-7, DX-21 - digitalna sinteza)

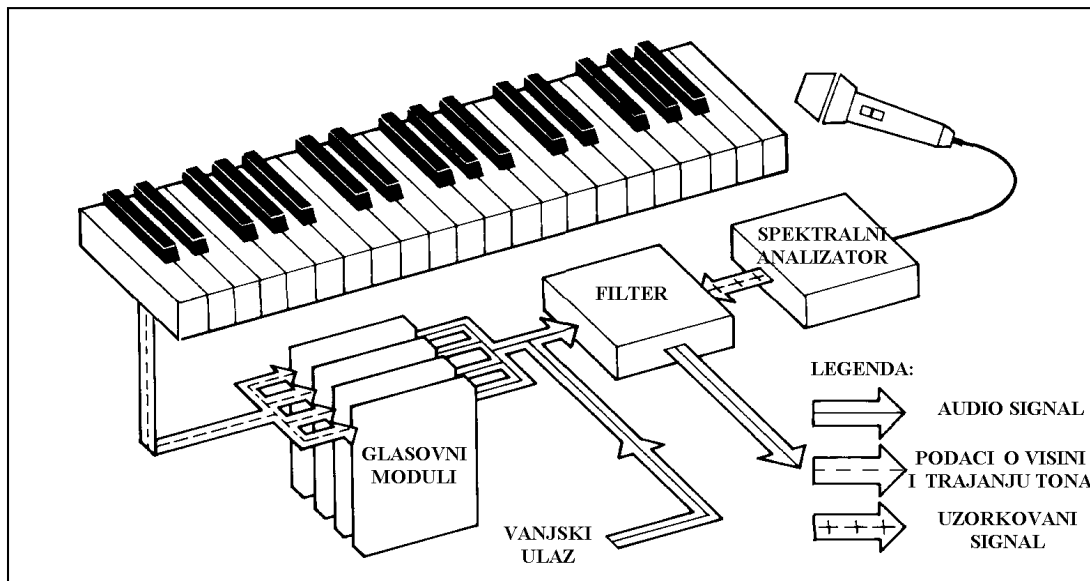
6.2.5 Hibridni sintetizatori

Postoji nekoliko različitih vrsta hibridnih sintetizatora, a najpopularnija se zove takozvani sendvič-sintetizator (*sandwich synthesizer*). Točno govoreći, to nije pravi sintetizator; najčešće posjeduje više tehnologije orgulja nego sintetizatorskih tehnika. Najčešće se sastoji od nekoliko sekcija: sekcije električnih orgulja, sekcije sintetskih gudača i pseudo-polifone sintetizatorske sekcije.

Slika 6.4: Sistemski dijagram hibridnog (*sandwich*) sintetizatora

Kada se pritisne tipka na klavijaturi, različite sekcije su sve pokrenute sa strane centralnog procesora. U području kreiranja višeslojnih zvukova, sendvič-sintetizator se ističe, ali za istinsku, kreativnu sintezu, ovaj tip instrumenta nije naročito prikladan. Svi sendvič-sintetizatori su polifoni.

Druga vrsta hibridnog sintetizatora je vokoder (engl. vocoder), koji se razvio iz tehnika šifriranja ljudskog glasa korištenih u drugom svjetskom ratu. To je naprava koja daje karakteristike jednog zvuka drugom. Ako, na primjer, uzmemo zvuk vodopada, možemo mu dati karakteristike ljudskog glasa i postići da vodopad "govori".



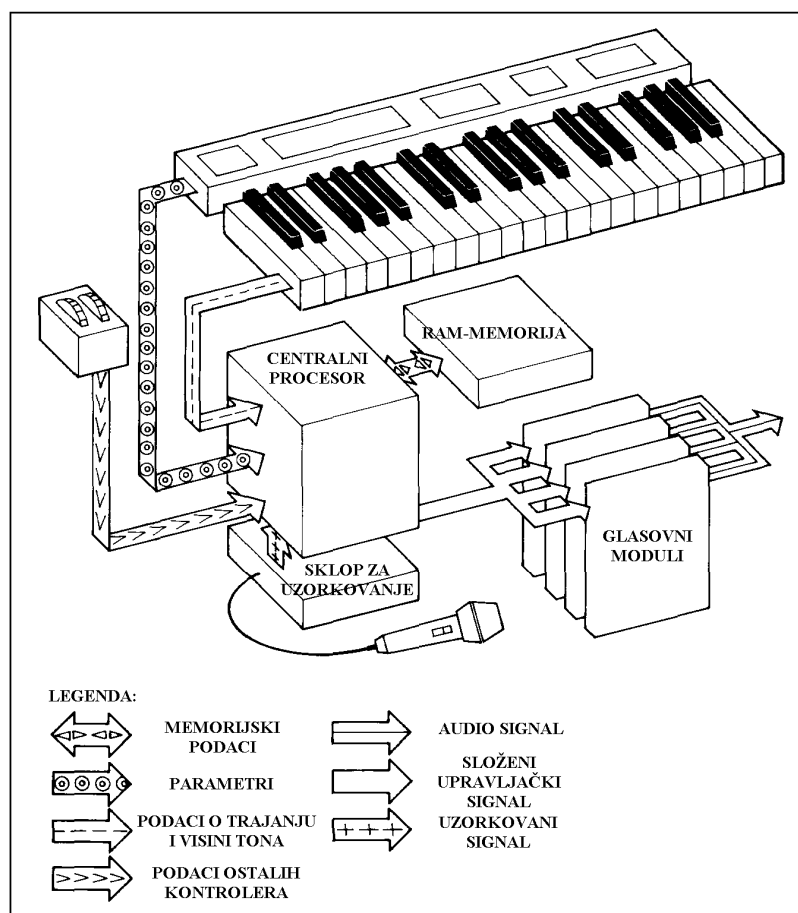
Slika 6.5: Sistemska dijagram vocodera

Predstavnici: Korg Trident (sandwich), Roland VP-330 (vocoder), Moog OPUS 3

6.2.6 Sampleri

Najlogičniji način da se dobije zvuk nekog instrumenta jest da se zapravo načini snimka stvarnog zvuka, i zatim njegovom manipulacijom omogući promjena visine tona. Taj proces snimanja stvarnog zvuka i njegovog pohranjivanja u memoriju zove se uzorkovanje ili *sampliranje*. Bitno je naglasiti da engleska riječ "sample" u digitalnoj tehnici označava samo jedan uzorak, tj. jednu vrijednost signala - u određenom trenutku, dok u terminologiji sintetizatora riječ *sample* znači cijeli skup uzoraka, zapravo digitalni reprezentant zvuka u memoriji.

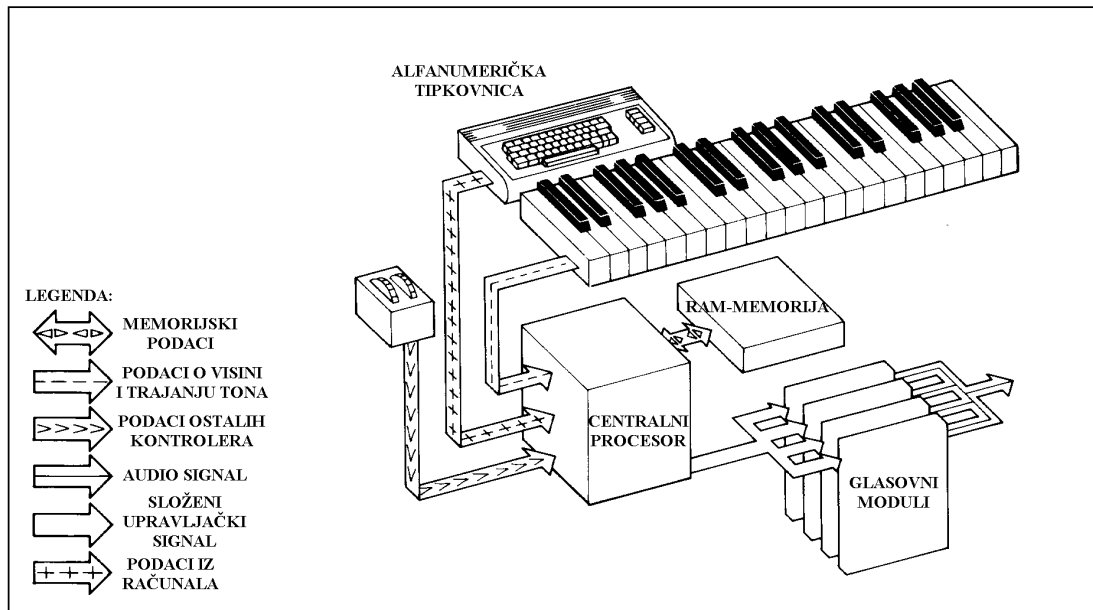
Sampliranjem dobivamo snimke bilo kojeg zvuka, koji pohranjujemo u memoriji i šaljem u sampling-sintetizator, koji rekonstruira taj isti zvuk, ali željene visine.

Slika 6.6: Sistemski dijagram *samplera*

Predstavnici: Emulator II, Simmons SDS-EPB, Ensoniq Mirage, Akai S-1000

6.2.7 Sistemi računalno-sintetizator

Većina elektronskih glazbenih sintetizatora sadrži neku vrstu mikroprocesorskog sistema, tj. malo interno računalo koje brine o procesiranju podataka. Ali postoje i specijalna računala dizajnirana isključivo za glazbene svrhe. Ona su u načelu bazirana na klasičnim računalima koja su modificirana kako bi mogla procesirati velike količine podataka koje takav način korištenja zahtijeva.



Slika 6.7: Sistemska dijagram sistema računalno-sintetizator

Jedan od najkorisnijih aspekata ove vrste instrumenata je mogućnost vizualnog prikaza svih zvučnih kreacija na monitoru računala. Kao što se može vidjeti na slici, osnovna konfiguracija ovog sistema ne razlikuje se mnogo od one konvencionalnog programabilnog sintetizatora. Međutim, stvarne izvođačke karakteristike su značajno poboljšane. Ovaj tip sintetizatora je vrlo kreativan i relativno jednostavan za korištenje, pogodan za rad u studiju, a naročito za rad na filmu i televiziji. Važno je istaknuti da se ovdje računalno ne koristi kao sekvencer (poput MIDI sistema), već kao procesor zvukova.

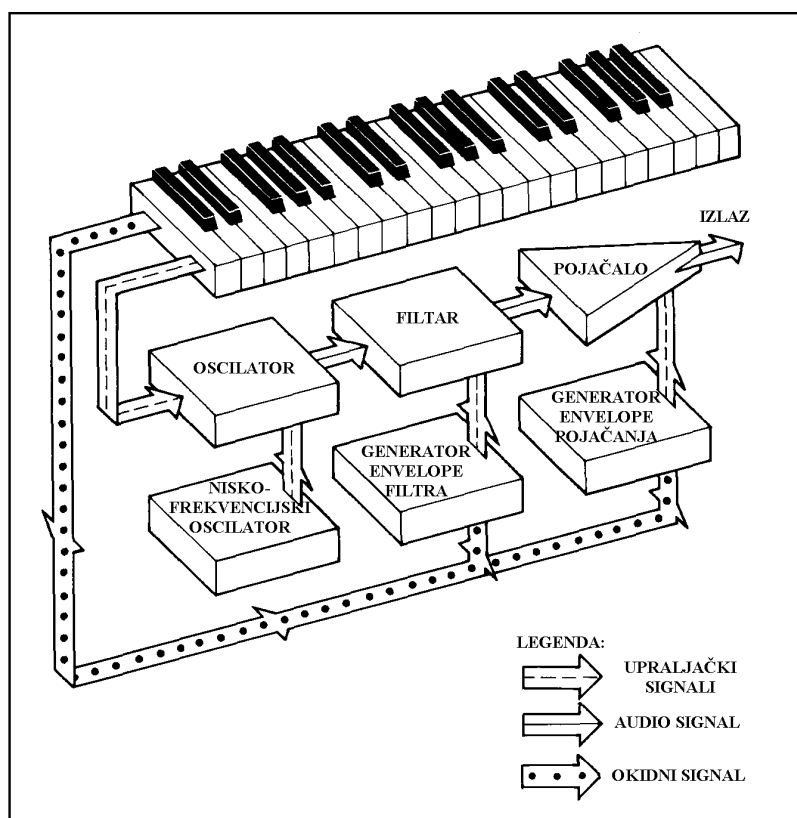
Predstavnici: Fairlight CMI, Synclavier II

6.2.8 Programi i simulacije na računalu

Razvojem kućnih računala, osobito drugom polovicom 80-tih godina, računala su postala sposobna da proizvode kvalitetan i prihvatljiv zvuk. Zvuk je najčešće bio sintetiziran (tzv. "iz čipa"), a s razvojem memorija (računala Commodore 64, Atari ST, Amiga) uzorkovan i memoriran kao tablica valnog oblika. Posljednja navedena računala imala su mogućnost rad na 3-4 zasebna audio kanala. Glazba iz računala postala je time vrlo popularna i neizbježan dio igara na računalu. Razvojem PC računala razvijaju se i zvučne kartice, tako da su današnja računala sposobna raditi s ogromnim brojem digitalnih audio kanala (karakteristika CD-a); određene kartice posjeduju visokokvalitetne D/A konvertere. Pojava direktnog snimanja na tvrdi disk, tzv. *hard disk recording*, u posljednje dvije godine napravila je revoluciju u snimanju zvuka. Sigurnim koracima izbacuje konvencionalne načine snimanja iz upotrebe, zbog svoje jednostavnosti, fleksibilnosti, preglednosti, brzine i procesorskih karakteristika. To definitivno učvršćuje računalno na tronu elektronske glazbe. Simulacije određenih instrumenata (bilo sintetizatorskih, bilo klasičnih), također su vrlo popularne; to su zapravo programi sinteze fizikalnog modeliranja. Ono je objašnjeno u posebnom poglavlju kao vrsta sinteze.

7. Osnovni sklopovi analognih sintetizatora - osnovni pojmovi sinteze

U ovom poglavlju bit će obrađen princip i primjena osnovnih sklopova analognih sintetizatora. Pošto su se pojmovi analogne tehnologije zadržali u upotrebi i kod digitalnih sintetizatora, ovo poglavlje je zapravo kompletan pregled pojmova vezanih za sintetizatore. Ono što je u analognoj tehnici realizirano električnim sklopovima i može se prikazati električnom shemom, u digitalnoj tehnici ostvareno je potprogramom unutar glavnog programa sinteze. Sheme analognih sklopova sintetizatora nisu obuhvaćene ovim diplomskim radom. Osnovni razlog tome je to što su one najčešće tvorničke tajne proizvođača. No, osnovne konfiguracije tih sklopova (oscilatori, filtri, generatori envelope) vrlo su poznate: oni se ne razlikuju drastično od istoimenih sklopova u svim drugim područjima elektronike. Tok signala kroz spomenute sklopove najčešće je vrlo poznat tok oscilator-filtar-pojačalo, prikazan na slici 7.1.



Slika 7.1: Osnovni glasovni modul tipičnog sintetizatora subtraktivne sinteze

7.1 Oscilatori

Bilo u analognim, bilo digitalnim sintetizatorima, oscilator valnog oblika prvi je stupanj procesiranja signala. Pošto je visina tona određena frekvencijom oscilatora, potrebno je imati oscilator koji reagira na kontrolne parametre za visinu tona, a koji dolaze iz raznih upravljačkih jedinica:

1. **Klavijatura:** Iz klavijature stižu podaci o visini tona u polutonovima.
2. **Korisničko sučelje:** Podaci koji određuju globalne parametre, kao što su transpozicija frekvencije cjelokupnog instrumenta i drugi.
3. **Niskofrekvencijski oscilator** (dio glasovnog modula), za moguću modulaciju, s zadanom frekvencijom i načinom utjecaja, kao i **generator envelope**.
4. **Ostali kontroleri** (kotačići za modulaciju, *aftertouch* itd.)
5. **Mogući vanjski izvori** za efekte sekvenci itd.

Svi ovi kontrolni utjecaji (bio to napon ili digitalni signal) sumirani su zajedno i proslijeđeni u oscilator.

7.1.1 Naponom kontrolirani oscilator (*Voltage Controlled Oscillator*)

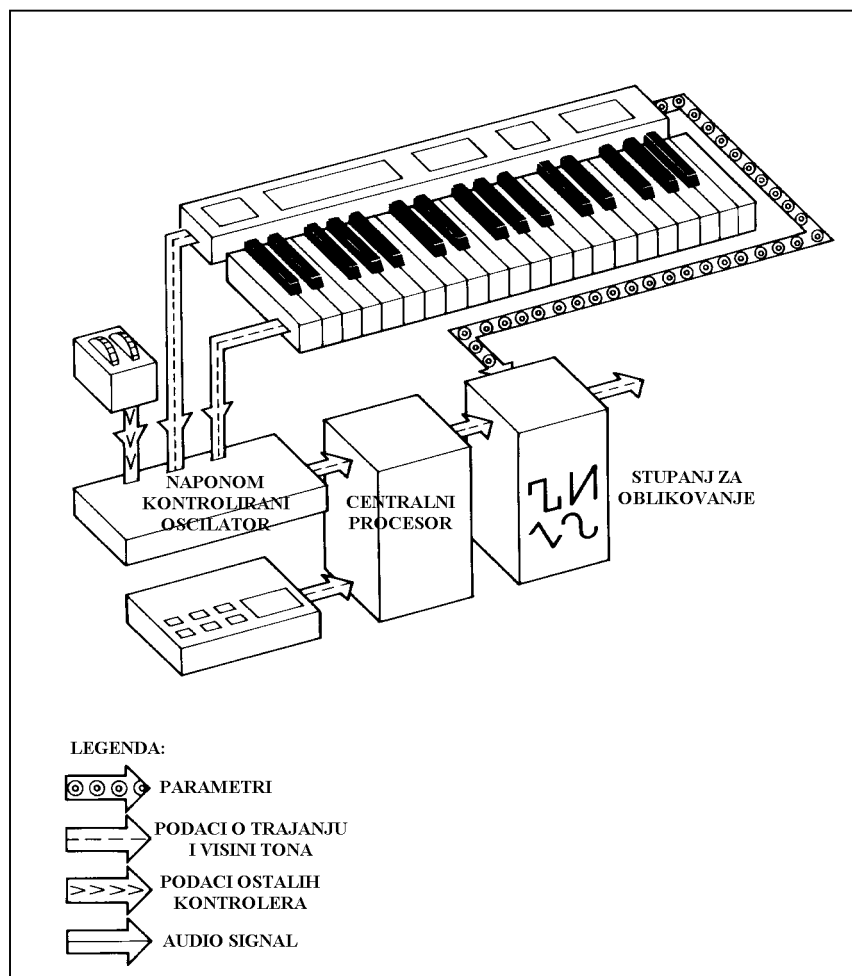
Upravljački signal kod prvih generacija analognih sintetizatora bio je napon. Stoga se ti oscilatori nazivaju naponom kontroliranim (VCO - Voltage Controlled Oscillator). To su klasični oscilatori subtraktivne sinteze. Njihovi valni oblici su pilasti i pravokutni valni oblik; za dobivanje ostalih valnih oblika - trokutnog, pulsnog i sinusnog potreban je izlazni stupanj za oblikovanje (tzv. *waveshaper*).

Kao pojačivački element u prvim oscilatorima koristile su se elektronske cijevi, a naponski signal za visinu tona dovodio se na element za reguliranje frekvencije titranja (naponom promjenjivi kapacitet). Isto tako korišteni su multivibrator koji na izlazu direktno daju pravokutni valni oblik.

Nestabilnost klasičnih analognih oscilatora dovela je do njihovog napuštanja.

7.1.2 Digitalno kontrolirani oscilator (*Digitally Controlled Oscillator*)

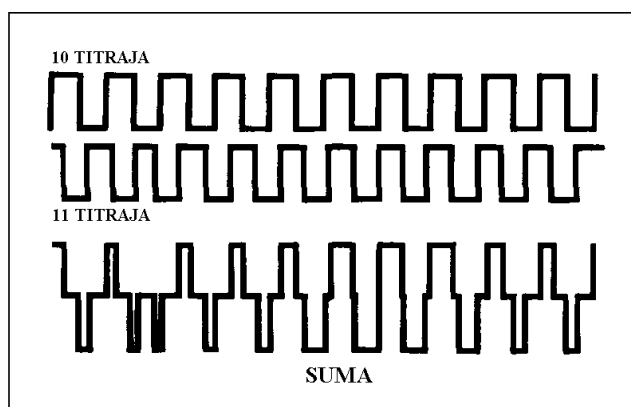
Ova vrsta oscilatora razvila se kao zbog prethodno spomenute nestabilnosti analognih, tako i zbog toga što se visina tona može kontrolirati centralnim procesorom. Osim naziva DCO – *Digitally Controlled Oscillator*, uobičajen je i naziv *Wave Generator* (WG). Podaci s korisničkog sučelja određuju početnu visinu oscilatora, a kontroleri određuju trenutnu visinu određene note. Svi podaci proslijeđeni su u centralni procesor, koji na izlazu daje niz pulseva frekvencije koja odgovara željenoj visini tona. već prije spomenuti stupanj za oblikovanje (*waveshaper*) prima te pulseve i stvara valne oblike koji odgovaraju njihovoj frekvenciji (slika 7.2). Na ovaj način problem nestabilnosti oscilatora kao i podešavanja visine tona (*tuning*) definitivno je prevaziđen.



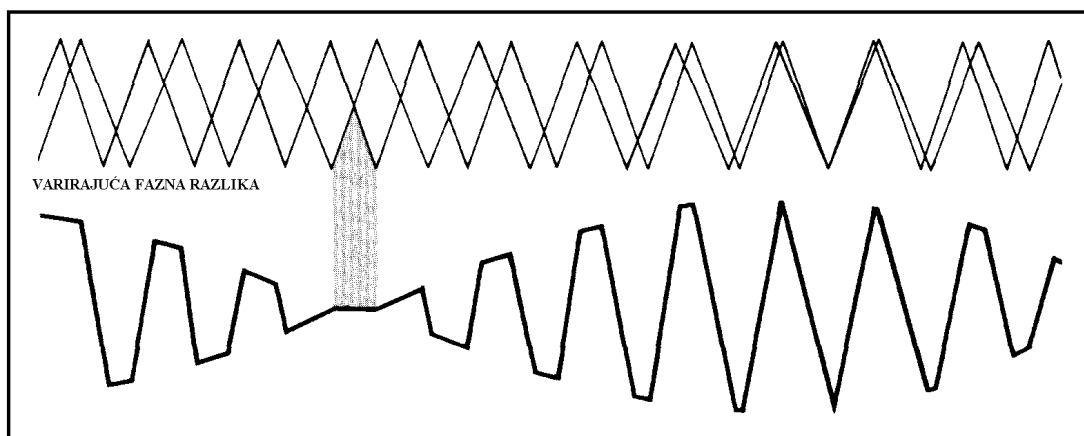
Slika 7.2: Sistem generiranja različitih signala stupnjem za oblikovanje

7.1.3 Dva razgođena oscilatora s malom razlikom u frekvencijama

Kada se signali dva razgođena oscilatora sumiraju zajedno, rezultat je također suma valnih oblika, samo sada oni nisu sinkronizirani. Slika 7.3 prikazuje sumiranje dva razgođena pravokutna valna oblika, a slika 7.4 dva trokutna.



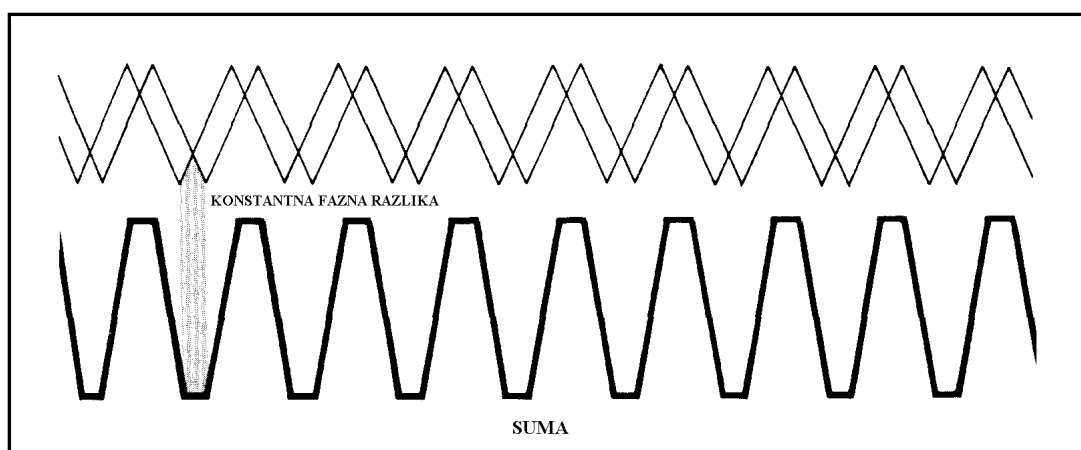
Slika 7.3: Suma signala dva razgođena generatora pravokutnog valnog oblika



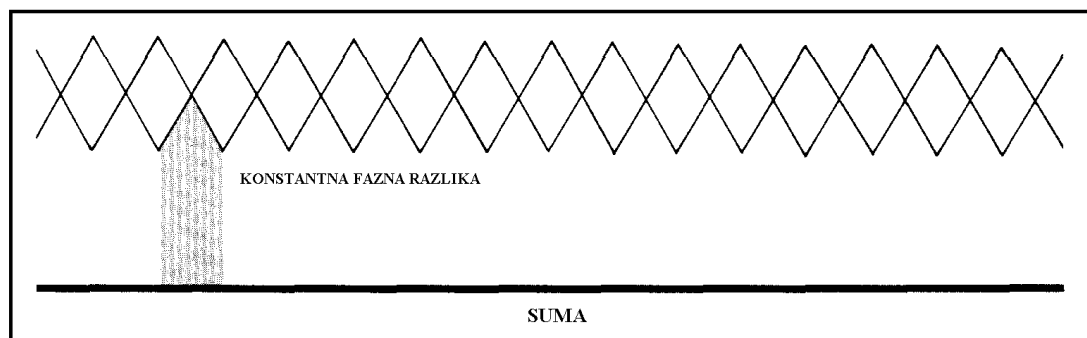
Slika 7.4: Suma signala dva razgođena generatora trokutnog valnog oblika

Rezultantni valni oblik dinamički se mijenja s vremenom - to daje osjećaj periodičke promjene boje tona. Proces se događa zbog razlika u fazi oscilatora: njihovi signali su ponekad u fazi (tj. oba rastu ili padaju), a nekad u protufazi (jedan raste a drugi pada). Općenito, kad su signali u fazi, rezultatna amplituda je visoka i ton je glasan, a rezultanta signala u protufazi je male amplitude, tj. ton je tih (to se dobro vidi na primjeru sume pilastih valnih oblika, dok je kod sumiranja pravokutnih izlazna amplituda konstantna, ali se širine pulseva mijenjaju: kada promatramo spektralni sadržaj nižih harmonika, događa se ista stvar). Stoga se javlja efekt tremola, ili titraja amplitude (što je veće razgođenje, veća je frekvencija titraja). Efekt tremola može biti smanjen tako da je jedan oscilator glasniji od drugog.

Valja još istaknuti efekt dva usklađena oscilatora čiji signali sumiranjem mogu dati novi valni oblik (slika 7.5) ili se poništiti (slika 7.6).



Slika 7.5: Dva trokutna signala istih frekvencija zbrajanjem daju treći signal



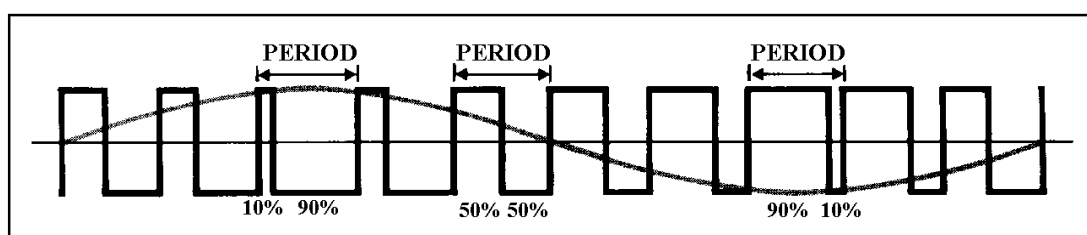
Slika 7.6: Dva protufazna trokutna signala poništavaju se

7.1.4 Sub-oktavni oscilator

Kod analognih sintetizatora sa digitalno kontroliranim oscilatorima, jednostavnim digitalnim dijeljenjem frekvencije sa 2 dobiva se za oktavu niži ton, koji je uobičajeno pravokutnog valnog oblika. On se tada miješa sa osnovnim signalom i dobiva se signal sa jače izraženim nižim harmonicima. Ovo je vrlo korisna stvar, a iznenađujuće jeftina za realizaciju; stoga je na raspolaganju u velikom broju instrumenata. Bitno je primijetiti da se i osnovni i suboktavni valni oblik dobivaju od iste takt frekvencije, stoga među njima nema faznih razlika.

7.1.5 Modulacija širine pulsnog valnog oblika (PWM - *Pulse Width Modulation*)

Ovo je vrlo važan fenomen: efekt PWM-a daje jednom oscilatoru zvuk vrlo sličan sumi dva razgođena oscilatora. Dobiva se tako da se dodatnim niskofrekvencijskim oscilatorom modulira odnos trajanja pozitivnog i negativnog perioda pulsnog valnog oblika. Na slici 7.3 prikazana je takva modulacija, u ovom slučaju sinusnim signalom niskofrekvencijskog oscilatora.



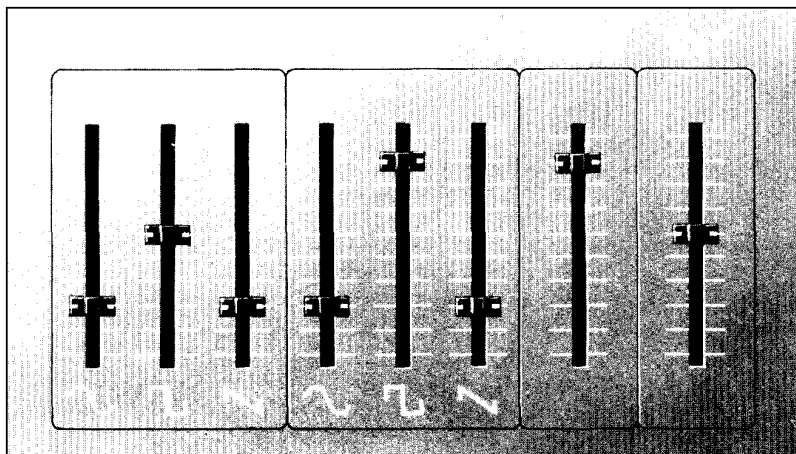
Slika 7.7: Modulacija širine pulsnog valnog oblika sinusnim valnim oblikom

7.1.6 Generator šuma (*Noise Generator*)

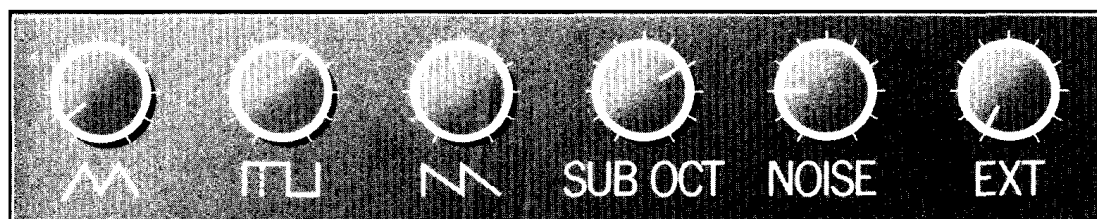
Generator šuma je sklop koji proizvodi šum željenog spektralnog sadržaja (bijeli šum sa konstantnom raspodjelom amplituda duž spektra, ružičasti šum sa konstantnom oktavnom raspodjelom snage itd.).

7.1.7 Miješalo valnih oblika (*Audio Mixer*)

Velik broj analognih sintetizatora ima prije spomenutu mogućnost potencijometarskog miješanja osnovnih valnih oblika i šuma. Miješanje je realizirano jednostavnim sumatorom (npr. operacijskim pojačalom). Potencijometri na kontrolnom sučelju su klizni kao na slici 7.8, ili rotacioni poput onih na slici 7.9.



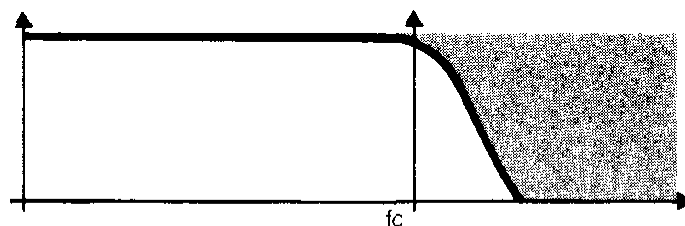
Slika 7.8: Miješalo valnih oblika s kliznim potencijometrima



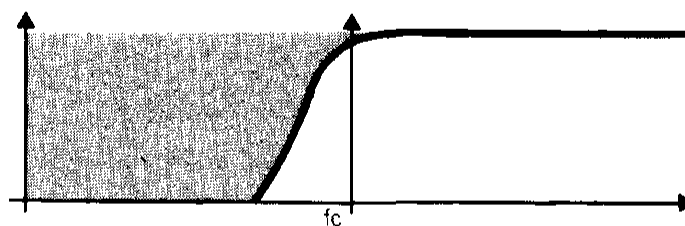
Slika 7.9: Miješalo valnih oblika s rotacionim potencijometrima

7.2 Naponom kontrolirani filtri

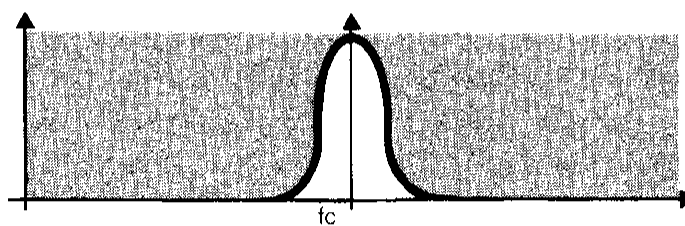
Filtarska sekcija u sintetizatorima označava se sa VCF (*Voltage Controlled Filter*) ili DCF (*Digitally Controlled Filter*). Čest je naziv i *Time Variant Filter* (TVF). Filter služi za odstranjivanje određenih frekvencija iz valnog oblika, a time promjenu spektralnog sadržaja. Slika 7.10 prikazuje tipične odzivne karakteristike niskopropusnog, visokopropusnog, pojasnopropusnog filtra, kao i pojasne brane. Pod riječju "kontrola" podrazumijeva se kontrola nad parametrom granične frekvencije filtra koja se mijenja sinkrono s frekvencijom oscilatora valnog oblika, a informacije o frekvenciji stižu iz klavijature. Isto tako, ostalim kontrolerima (modulacijskim kotačićima, generatorima envelope ili MIDI signalima) moguće je mijenjati ostale parametre filtra.



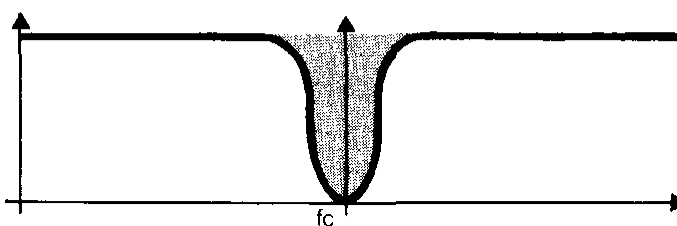
1. Niskopropusni filter (LPF-Low Pass Filter)



2. Visokopropusni filter (HPF- High Pass Filter)



3. Pojasni propust (BPF - Band Pass Filter)



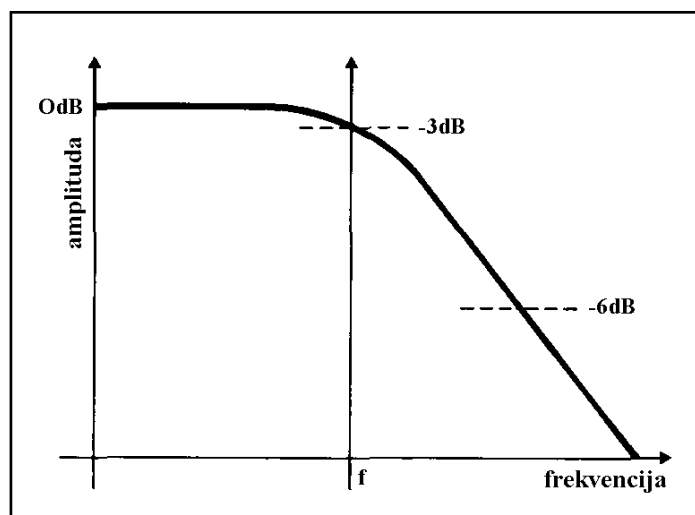
4. Pojasna brana (BRF - Band Reject Filter ili Notch Filter)

Slika 7.10: Odzivi niskopropusnog, visokopropusnog, pojasnopropusnog filtra i pojasne brane

7.2.1 Niskopropusni filter

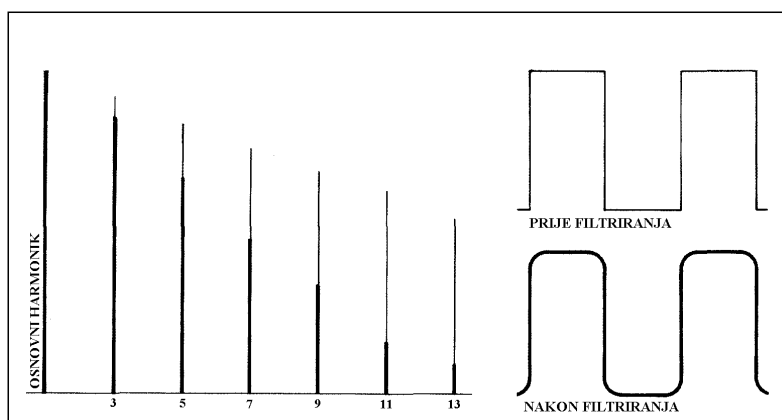
Granična frekvencija filtra:

Niskopropusni filter najviše je korišten filter subtraktivne sinteze. Parametar granične (rezonantne) frekvencije (*Cut-Off Frequency*, *Cut-Off* ili *Frequency*), određuje frekvenciju iznad koje filter počinje gušiti; na graničnoj frekvenciji gušenje je 3 dB.



Slika 7.11: Odziv niskopropusnog filtra

Ako je granična frekvencija namještena na visoku vrijednost, zvuk će biti svijetao; za nisku vrijednost ovog parametra zvuk će imati prigušene više harmonike. Slika 7.12 prikazuje originalni i filtrirani izgled i spektar pravokutnog valnog oblika.



Slika 7.12: Pravokutni valni oblik prije i nakon filtriranja niskopropusnim filtrom

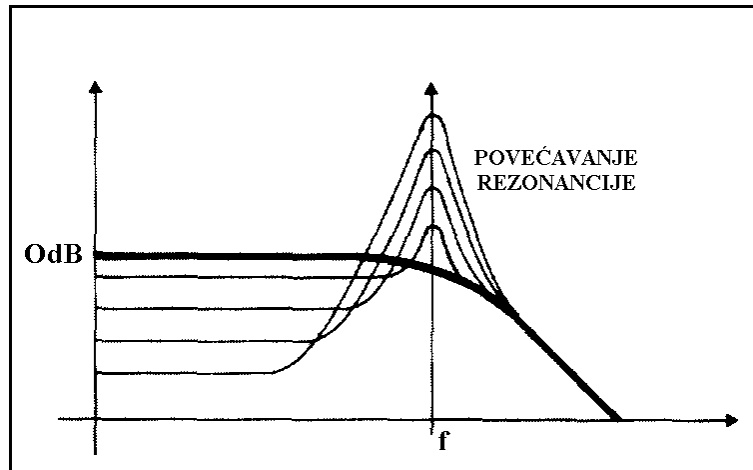
Odziv filtra:

Dijagram odziva filtra nema nagli pad iznad granične frekvencije, već je on kontinuiran (time i prirodniji). Najčešće se koriste se dvopolni filtri s padom 12 dB po oktavi, kao i četveropolni filtri s padom 24 dB po oktavi. 4-polni filter stoga bolje filtrira frekvencije iznad granične od 2-polnog.

Rezonancija:

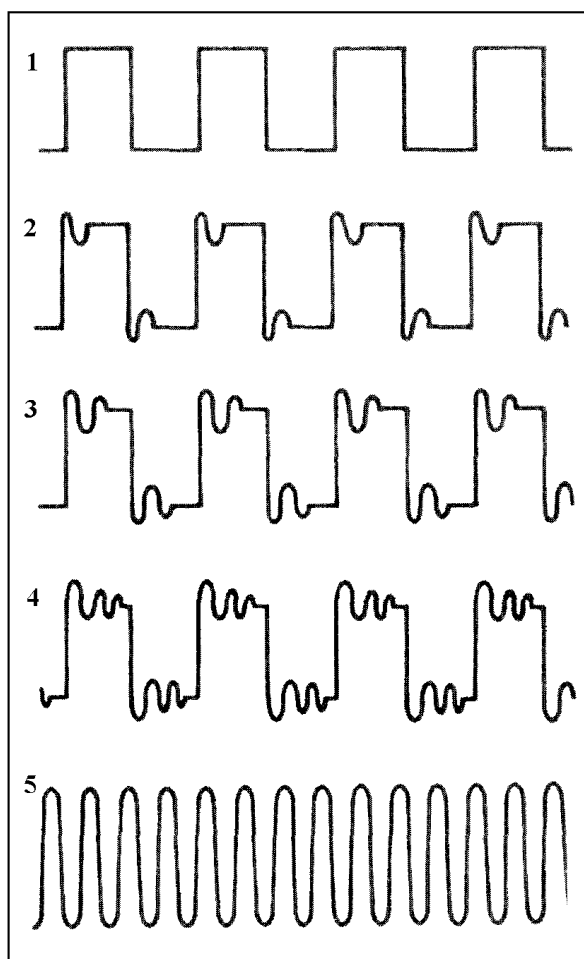
Rezonancija (*resonance*) je parametar koji određuje koliko će amplitude oko granične frekvencije biti pojačane ili utišane. Što je rezonancija veća, uz pojačanje amplituda oko granične frekvencije javlja se i smanjenje onih ispod nje (slika 7.13). Kada je primjenjena prevelika rezonancija, frekvencije oko granične su toliko naglašene, da

filtar počinje oscilirati i sam se pretvara u oscilator (ali ugođeni, pošto je rezonantna frekvencija filtra kontrolirana klavijaturom, sinkrono sa frekvencijom oscilatora valnog oblika). Sada na izlazu iz filtra imamo sinusoidni valni oblik, puno izraženiji od ostalih, mnogo tiših frekvencija. Slika 7.13 prikazuje odziv filtra za nekoliko različitih parametara rezonancije.



Slika 7.13: Odziv niskopropusnog filtra uz povećanje rezonancije

Sljedeća slika prikazuje efekt povećavanja rezonancije na izgled pravokutnog valnog oblika:



Slika 7.14: Izgled pravokutnog valnog oblika uz povećavanje rezonancije niskopropusnog filtra

Objašnjenje slike 7.14:

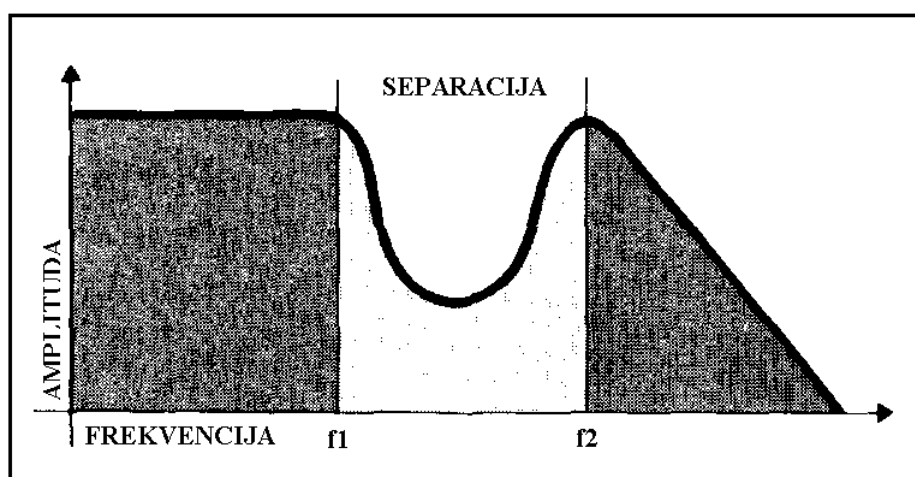
1. Osnovni pravokutni valni oblik
2. U filtru je aktivirana povratna veza s izlaza na ulaz u maloj količini. Javlja se istitravanje rubova.
3. Povećanje rezonancije uzrokuje povećanje istitravanja kod promjena stanja.
4. Ovdje je povratna veza toliko jaka da pravokutni valni oblik počinje sličiti sinusnom.
5. Filter je prooscilirao, i totalno nadjačao pravokutni valni oblik. Frekvencija sinusnog signala jednaka je rezonantnoj frekvenciji filtra. (Efekt povećavanja rezonancije na izgled pravokutnog valnog oblika)

7.2.2 Ostali filtri

Viskopropusni filterar je još jedan uobičajeni (ali manje korišten) filterar u subtraktivnoj sintezi. Pojasni popust i pojasna brana također se rjeđe koriste.

7.2.3. Hibridni naponom kontrolirani filtri

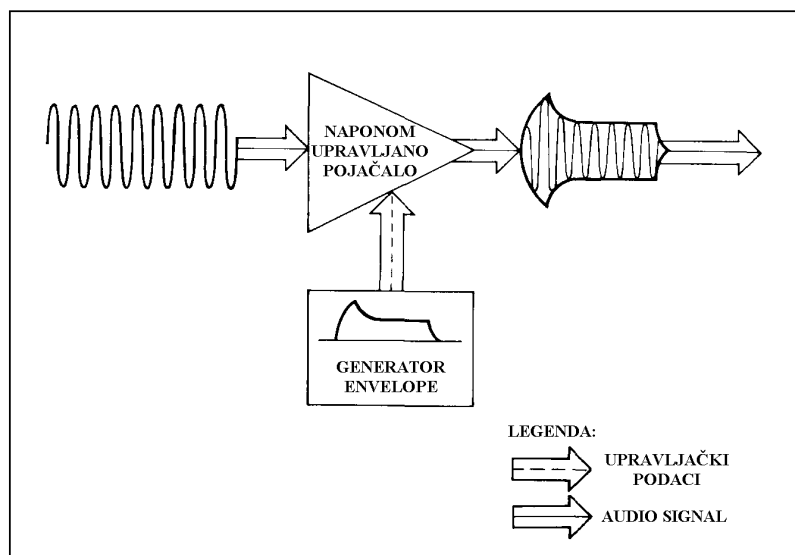
Ovo je vrsta filtera koja je nastala u kasnijim generacijama sintetizatora i vrlo je rijetka. Radi se zapravo o dva filtra u tandemu, koji ističu dvije rezonantne frekvencije, a odvojeni su (separirani) područjem zvanim *separation*. Udaljenost rezonantnih frekvencija filtera je konstantna, tako da jednim kontrolnim parametrom mijenjamo položaj obje rezonantne frekvencije, u tandemu. Kao što je poznato, ljudski vokalni trakt ima dvije rezonantne frekvencije, tako da je očito da su sintetizatori koji posjeduju filtre s dvije rezonantne frekvencije vrlo pogodni za oponašanje ljudskog glasa.



Slika 7.15: Filter dvostruke rezonancije sa separacijom (*Dual Resonance Filter With Separation*)

7.3 Naponom kontrolirano pojačalo (VCA – *Voltage Controlled Amplifier*)

Tzv. VCA (*Voltage Controlled Amplifier*), a u digitalnim sintetizatorima DCA (*Digitally Controlled Amplifier*) ili TVA (*Time Variant Amplifier*) je sklop koji na ulazu prima audio signal, pojačava ga ili prigušuje proporcionalno kontrolnog signala koji je primijenjen. U načelu, ovaj signal je kontinuirano promjenjiv kontrolni napon ili digitalna informacija iz generatora envelope. Slika 7.16 prikazuje sinusni valni oblik koji je moduliran envelopom u naponom kontroliranom pojačalu. Izlazni signal je simetričan: naponom promjenjivo pojačalo ne utječe na njegov oblik, već samo na proporcije.



Slika 7.16: Modulacija sinusnog signala envelopom pojačanja

7.4 Generator envelope (EG - *Envelope Generator*)

U sastavu svakog glasovnog modula mora postojati najmanje jedan generator envelope; većina sintetizatora ima ih veći broj po glasu. Izlaz iz generatora envelope prosljeđuje se redovito u naponom kontrolirano pojačalo, kako bi se definirala envelope glasnoće za vrijeme trajanja tona. Izlaz iz ostalih generatora prosljeđuje se u generator valnog oblika, kako bi se parametrima envelope mijenjala visina tona, kao i u filtarsku sekciju, gdje se manipulira najčešće parametrom granične frekvencije i tako mijenja boja tona. U mnogim uređajima postoje i mnogi drugi blokovi koji koriste izlaz iz generatora envelope, kao što je regulator panorame.

Envelope je zapravo dijagram u koordinatnom sustavu sastavljen od pravaca. Apscisna os prikazuje vrijeme, a ordinatna željeni parametar koji mijenjamo - glasnoću, graničnu frekvenciju filtra, visinu tona itd. Postoji mnogo različitih vrsta generatora envelope. Oni se razlikuju u broju parametara koji se pamte, tj. prijelomnih točaka pravaca od kojih je envelope sastavljena.

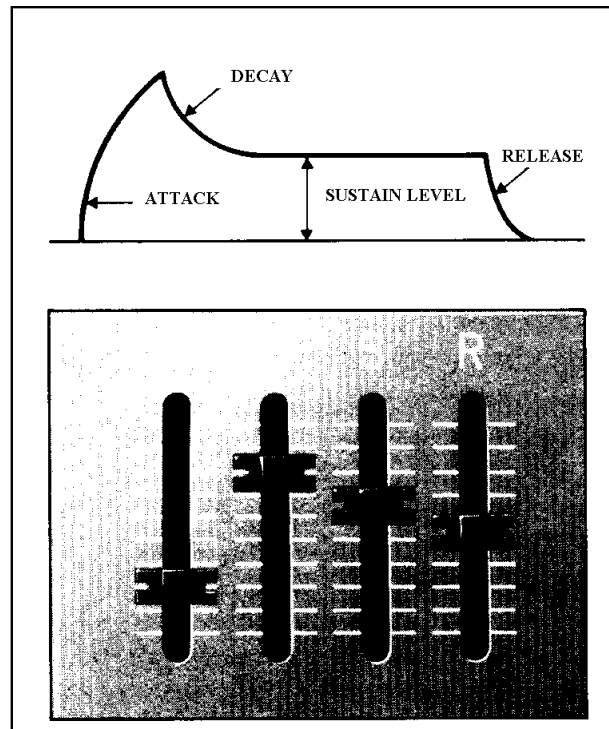
7.4.1. ADSR envelope

Ova vrsta envelope koristi se gotovo u svim analognim sintetizatorima. Ima samo četiri parametra: *attack*, *decay*, *sustain* i *release* po čijim početnim slovima je i nazvana:

- ***Attack*** je vrijeme porasta u kojem envelope krenuvši od nule dosiže maksimalnu vrijednost.
- ***Decay*** je vrijeme pada u kojem envelope od spomenute maksimalne vrijednosti padne na vrijednost definiranu *sustainom*.
- ***Sustain*** ili nivo trajanja je ordinatna vrijednost koja se najčešće izražava postocima od maksimalne vrijednosti envelope. Za vrijeme dok je tipka pritisnuta

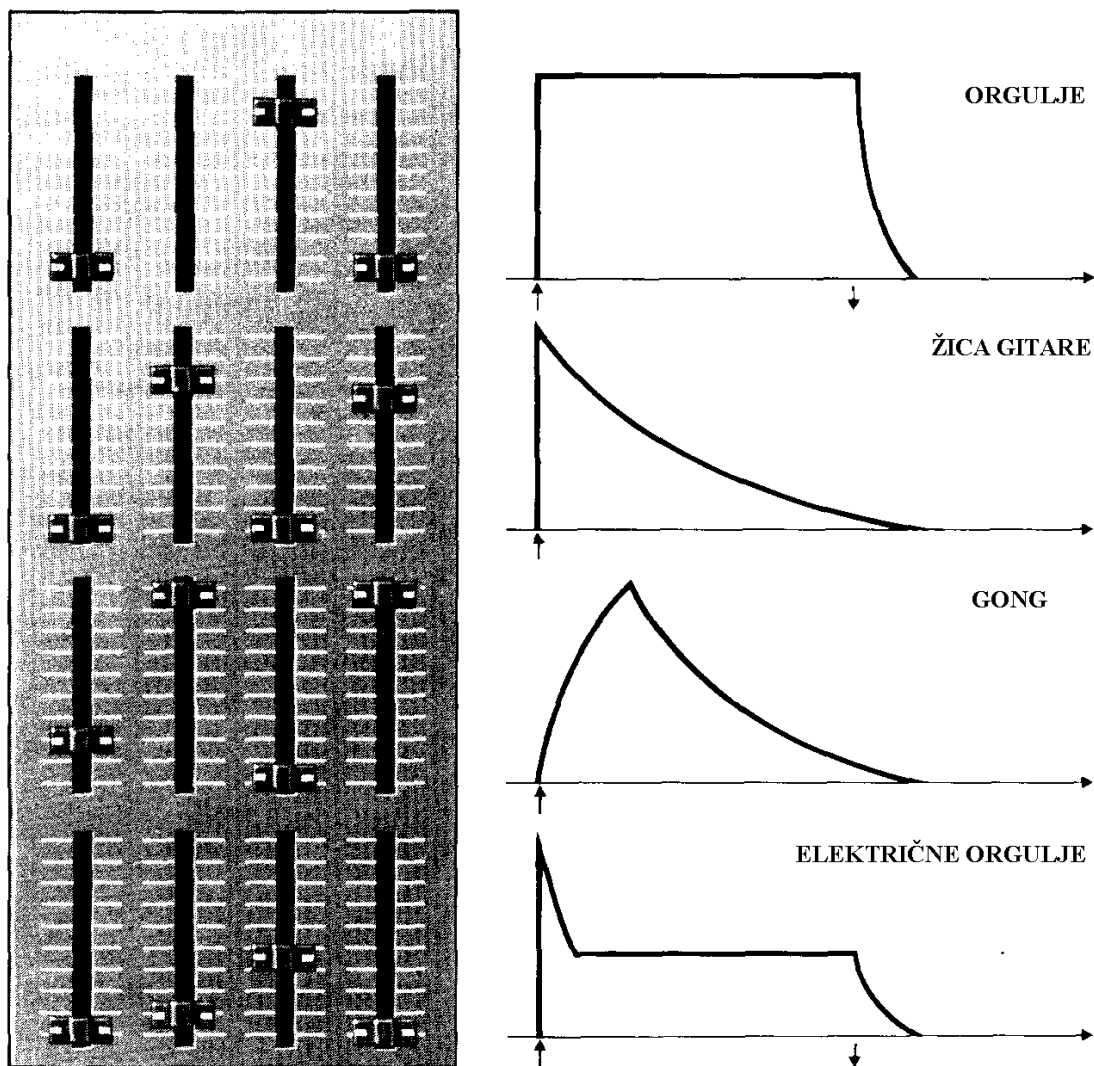
(a periodi *attacka* i *decaya* su završeni), vrijednost envelope je konstantna i jednaka vrijednosti *sustaina*.

- **Release** je vrijeme otpuštanja u kojem vrijednost envelope padne s nivoa Sustaina na nulu, nakon što je tipka puštena.



Slika 7.17: ADSR envelopea i pripadajući položaj potencijometara generatora envelope

Na slici 7.18 prikazani su primjeri korištenja ADSR generatora envelope za zvukove orgulja, žice gitare, gonga i elektronskih orgulja sa "klikom" na početku tona.



Slika 7.18: Četiri ADSR envelope

U najstarijim sintetizatorima postoji nekoliko varijacija ovih envelopea: AD, AR, ili ADS envelope, koje su manje fleksibilne od ADSR envelopea:

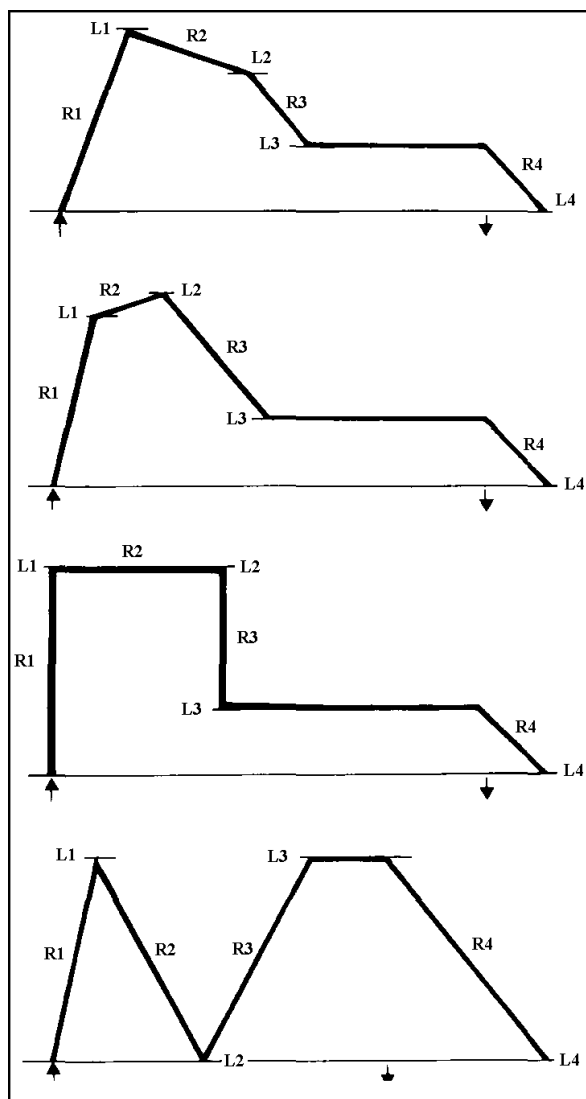
- **AD (Attack-Decay)** envelope: Envelope koja ima definirana vremena samo ova dva parametra. Nakon što dođe do maksimalne vrijednosti, envelope ponovno pada na nulu i tu njeno trajanje završava.
- **AR (Attack-Release)** envelope: Vrijednost envelope penje se do maksimuma za vrijeme *attacka*, na njemu se zadržava sve dok tipka nije puštena, i tada za vrijeme *releasea* pada na nulu.
- **ADSD (Attack-Decay-Sustain-Decay)** envelope funkcionira vrlo slično poput ADSR envelope, samo što vrijeme *releasea* ima potpuno iste karakteristika kao i vrijeme *decaya*, i isto podešavanje kontrola koristi se za oba parametra.

Postoje i neki hibridi ovih generatora envelope koji nude malo više od osnovnih ADSR envelopea. Tako je npr. sa **DADSR** envelopom, koja ima definirano vrijeme kašnjenja između pritiska tipke i početka attack-a.

7.4.2. RL (Rate-Level) envelope

Ovakvi generatori envelope nalaze se u digitalnim sintetizatorima. Fleksibilnije su od ADSR envelope - nude više mogućnosti. Pamte veći broj prijelomnih točaka, tj. njihove glasnoće (*level*) i vrijeme potrebno od jedne do druge (*rate*).

Na slici 7.19 prikazano je nekoliko Rate-Level envelope.



Slika 7.19: Četiri Rate-Level envelope

7.4.3. Utjecaj envelope (*Env. Amount*)

Env. Amount (*Envelope Amount*) je parametar koji određuje kolik utjecaj envelope ima na parametar koji mijenja. Ako je vrijednost *Env. Amounta* niska, envelope slabo utječe na njega, a ako je visoka, tada drastično mijenja vrijednost dotičnog parametra. Npr. ako envelopom mijenjamo pojačanje naponom kontroliranog pojačala, za male vrijednosti *Amounta* glasnoća će biti gotovo konstantna, bez obzira na oblik envelope, a za veće vrijednosti početak će se ravnati prema envelope.

7.5 Niskofrekvencijski oscilator (LFO - Low Frequency Oscillator)

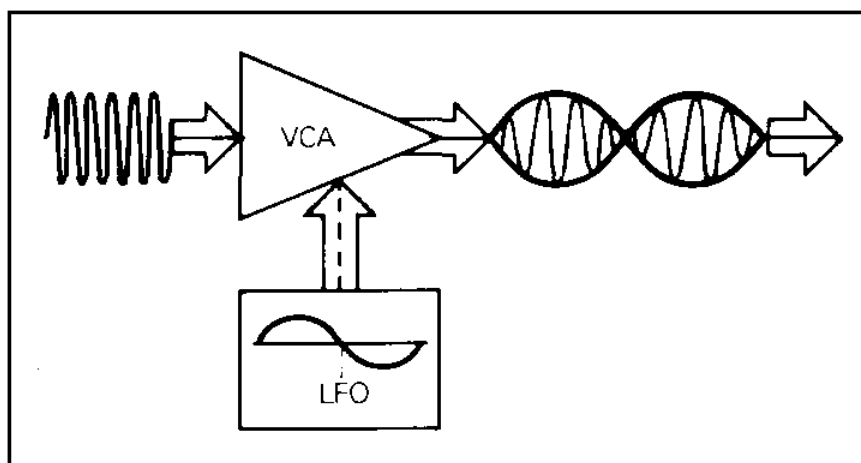
Pod pojmom niskofrekvencijskog oscilatora podrazumijevamo oscilator koji oscilira frekvencijom nižom od čujnih (najčešće od 0.1 do 10 Hz). Koristimo ga kao izvor modulacijskog signala, poput generatora envelope. Kod analognih sintetizatora fizički niskofrekvencijski oscilator generira kontrolne napone sinusoidalnog, trokutnog i drugih oblika, dok se kod digitalnih isti proces odvija u digitalnoj domeni. Najčešće se koristi kao izvor modulacije oscilatora valnog oblika (vibrato) i pojačala (tremolo).

Tipični niskofrekvencijski oscilator ima tri parametra:

- **Wave:** Valni oblik (Triangle, Square, Saw, Sine)
- **Rate:** Brzinu oscilacije (frekvencija)
- **Delay:** Vremensko kašnjenje početka oscilacije za početkom zvuka.

Moderniji oscilatori imaju i takozvani *Fade-in* parametar, koji definira vrijeme u kojem oscilator pojačava amplitudu titranja od nulte do maksimalne, jer je zvuk na taj način puno prirodniji.

Slika 7.20 prikazuje princip modulacije amplitude (glasnoće) niskofrekvencijskim oscilatorom (u primjeru na slici utjecaj modulacije oscilatorom je maksimalan – 100%). Kod manjih vrijednosti parametra utjecaja oscilatora na signal, amplituda ne varira tako drastično.

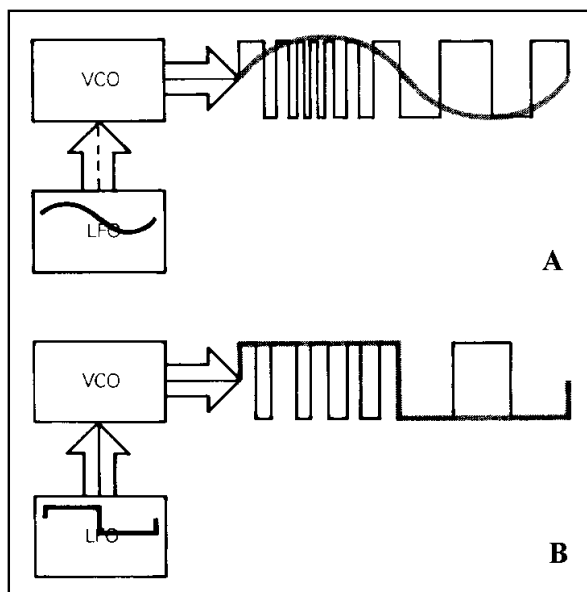


Slika 7.20: Modulacija amplitude signala niskofrekvencijskim oscilatorom

Tri najkorištenije kombinacije, od kojih su dvije već spomenute, imaju i svoje engleske nazive :

- **LFO-mod-Osc.Pitch:** Koristeći sinusoidalni signal za modulaciju frekvencije osnovnih oscilatora, dakle visine tona, dobivamo efekt vibrata. Slično je sa trokutnim signalom. Pravokutnim signalom dobivamo nagle promjene u visini

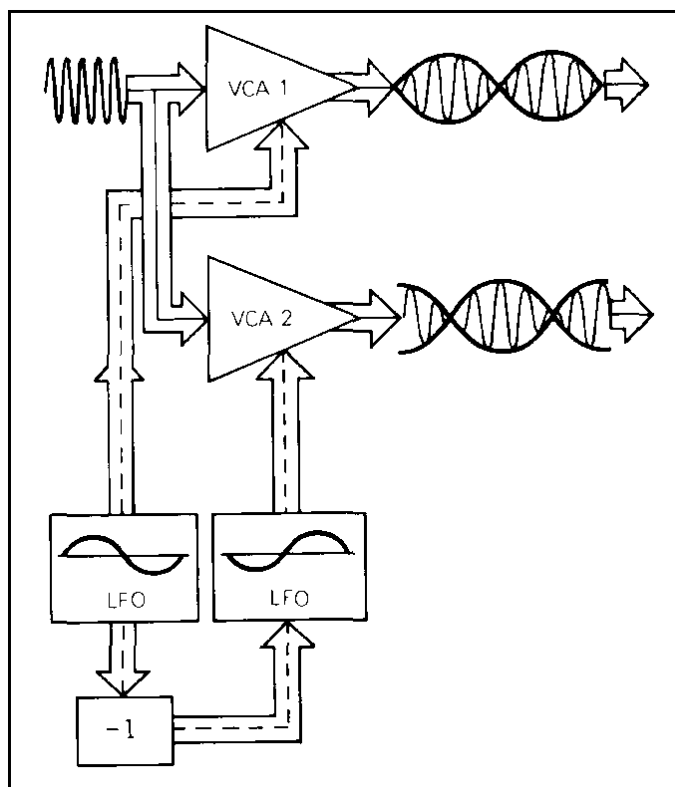
tona– tzv. *thrill* (kao da naizmjenice sviramo dva tona), a uzlaznim pilastim signalom efekt alarmne sirene.



Slika 7.21: Modulacija frekvencije oscilatora pravokutnog signala niskofrekvencijskim oscilatorom: A:vibrato i B:*thrill*

- **LFO-mod-Filter Cut-Off:** Modulirajući parametar rezonantne frekvencije filtra niskofrekvencijskim oscilatorom, dobivamo u pozitivnim periodima svjetliju, a u negativnim tamniju boju tona. Ekstremno jakom modulacijom dobivamo zvuk poput "Wah-wah" efekta.
- **LFO-mod-Amplifier:** Koristeći LFO za moduliranje naponom ili digitalno kontroliranog pojačala, dobivamo glasnoću koja varira s oscilacijom. Koristeći sinusoidalni ili trokutni signal dobivamo tremolo, dok pravokutnim signalom dobivamo nagle promjene u glasnoći (glasno, tiho, glasno...).

Postoji još mnogo načina upotrebe niskofrekventnog oscilatora. Jedan od njih je periodička promjena panorame instrumenta, prikazana na slici 7.22. Isti audio signal dovodi se na dva naponom upravljana pojačala, koje moduliraju dva niskofrekvencijska oscilatora u protufazi.



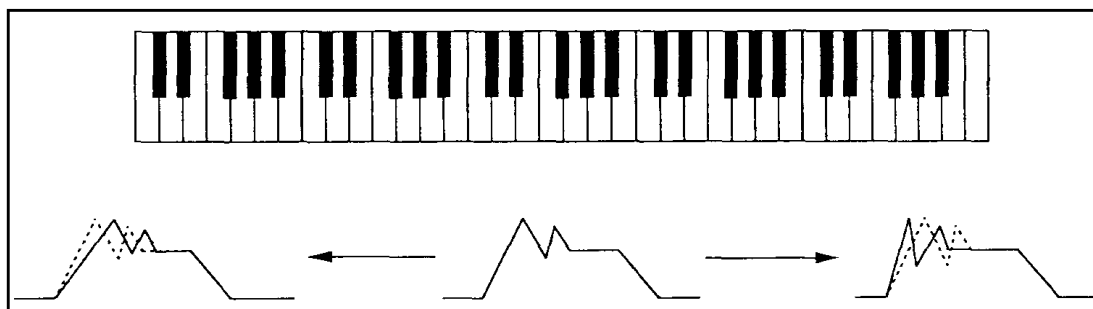
Slika 7.22: Princip periodičke promjene panorame

7.6. Keyboard Tracking

Klavijatura ne mora samo kontrolirati visinu tona, već može biti korištena kao modulator. *Keyboard Tracking* je parametar koji govori kako će određeni parametar (npr. filtra) ovisiti o poziciji odsvirane tipke. Nekad se naziva i *Key Follow* ili *Keyboard Scalling*. Vrijednosti ovog parametra mogu biti i pozitivne i negativne (tada će se zadani parametar smanjivati s povećanjem visine tona). Najčešće korištene kombinacije su sljedeće:

- ***Kybd.Trk.-mod-Amp.Env:*** Visina tipke na klavijature modulira utjecaj envelope glasnoće (*Env.Amount*). Za pozitivne vrijednosti, više note bit će glasnije, a niže tiše. Za negativne vrijednosti, više note bit će tiše.
- ***Kybd.Trk.-mod-Filter Cut-Off:*** Klavijatura modulira rezonantnu frekvenciju filtra. Za pozitivne vrijednosti, više note imat će svjetliji zvuk, a niže tamniji.
- ***Kybd.Trk.-mod-Osc.Pitch:*** Klavijatura je redoviti modulator generatora valnog oblika (jer transponira tonove). Stoga je ova vrijednost kod normalnih ljestvica 100%. Kod vrijednosti 0% sve tipke dat će istu visinu tona, dok će vrijednost od 50% dati arapsku četvrt-tonsku ljestvicu. Kod bilo kojih drugih podešavanja (koja mogu biti i iznad 100%), dobit ćemo transpoziciju koja ne odgovara glazbenim pravilima.

- **Kybd. Trk.-mod-Amp.Env.Attack Time:** Vrlo često postoji mogućnost da pozicijom tipke na klavijaturi moduliramo trajanje određenih dijelova envelope (najčešće *attack* i *release*). Slika 7.23 prikazuje takvu modulaciju *attack*-a.



Slika 7.23: Modulacija vremena *attack*-a položajem tipke na klavijaturi

7.7. Jačina pritiska tipke (*Velocity*)

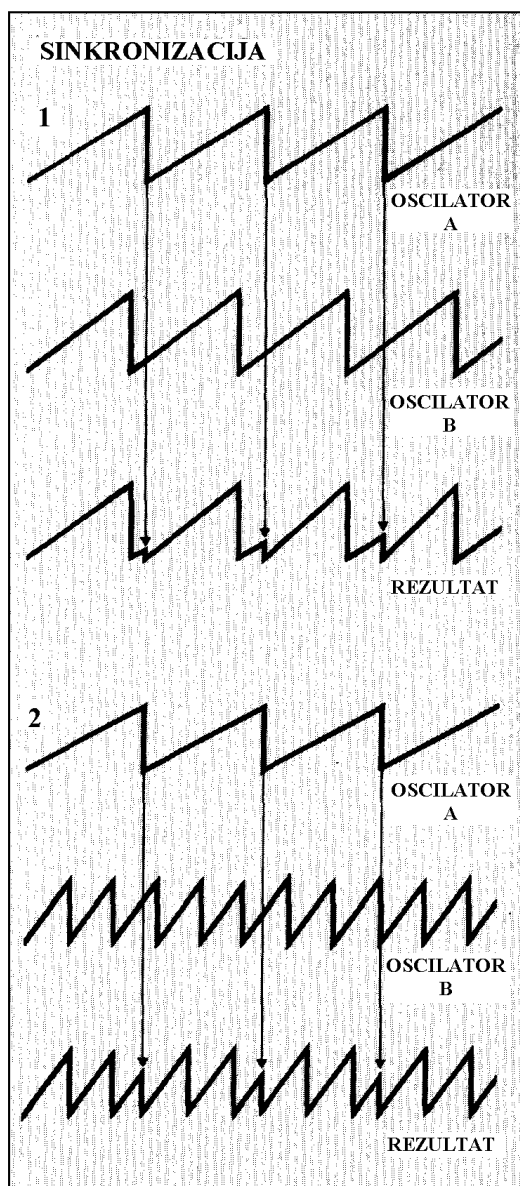
Svi današnji sintetizatori reagiraju na različite jačine pritiska tipke. Ta informacija (katkad se naziva i *velocity sensitivity*) može se koristiti na razne načine:

- **Vel.-mod-Amp.Env:** Ako se jačina pritiska tipke koristi za modulaciju pojačanja pojačala, jače pritisnuta tipka rezultirat će glasnijim tonom (tj. glasnijom envelopom). Ovo je najuobičajenije postavljanje tog parametra.
- **Vel.-mod-Amp.Env.Attack Time:** Jačinom pritiska tipke vrlo često se modulira i *attack time* - vrijeme uzlaznog dijela envelope. Na taj način postizemo da jačim pritiskom tipke dobivamo brže vrijeme uzlaznog dijela.
- **Vel.-mod-Filter Cut-Off:** Modulirajući jačinom pritiska tipke rezonantnu frekvenciju filtra, postizemo da jače pritisnuti tonovi budu svjetliji (kod pozitivnog podešavanja).
- **Vel.-mod-Filter Cut-Off Env.:** Jačinom pritiska tipke moduliramo utjecaj (izraženost) envelope na promjenu rezonantne frekvencije. Za veće vrijednosti ovog parametra, rezonantna frekvencija će se i dalje kretati po načinu koji envelope nalaže, ali će promjene biti veće.

7.8. Sinkronizacija Oscilatora (*Sinc, Hard Sinc*)

Sinkronizacija jednog oscilatora (*slave*) vrši se drugim (*master*). Princip je prikazan na slici 7.24, sa dva oscilatora pilastog valnog oblika. Kod analognih oscilatora, nakon jednog perioda oscilatora A (*master*), vrijednost napona oscilatora B (*slave*) pada na nulu i raste sve dok originalni signal oscilatora B raste. Radi se dakle o promjeni istosmjerne vrijednosti oscilatora B. Na taj način dobivamo kompleksni valni oblik oscilatora B, visine tona kao oscilatora A, a s vremenskom promjenom boje tona, pošto su oscilatori A i B razgođeni i okidanje se vrši u trenucima kad je oscilator B na

različitim razinama napona. Drugi dio slike prikazuje valni oblik koji se dobiva ako se frekvencija oscilatora B poveća.



Slika 7.24: Sinkronizacija dva razgođena oscilatora pilastog signala

U digitalnim sintetizatorima spomenuto resetiranje valnog oblika B postiže se ekvivalentnim digitalnim oduzimanjem duž cijelog perioda - vrijednosti oscilatora B u trenutku okidanja. Razina okidanja slave oscilatora master oscilatorom ne mora biti trenutak kad je master na najnižoj vrijednosti, već u nekoj drugoj (pozitivni prolaz kroz nulu).

7.9. Cross Modulation

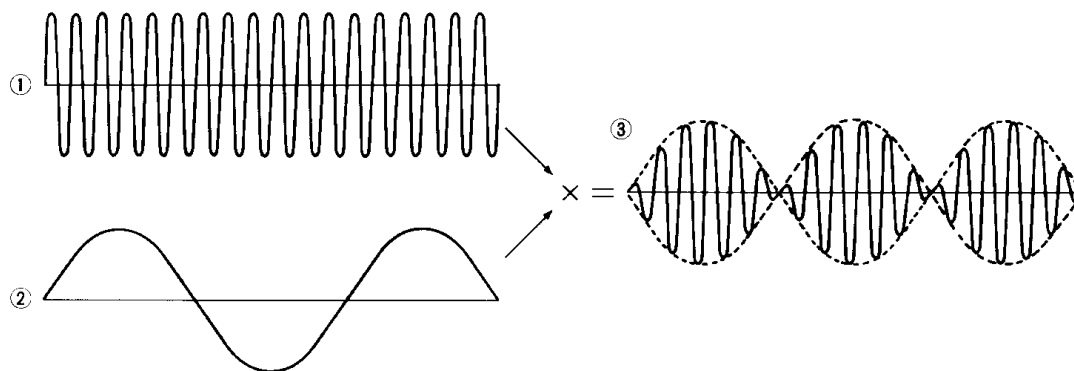
Radi se o modulaciji frekvencije jednog oscilatora drugim, a oba su čujnih frekvencija. Ova modulacija poznatija je kao FM (frekvencijska modulacija), i pobliže je objašnjena u poglavlju o sintezi frekvencijskom modulacijom.

7.10. Cross Filter Modulation

Ovo je vrsta modulacije rezonantne frekvencije filtra, vrlo rijetke kod sintetizatora, a njena bitna karakteristika je da je modulacijski oscilator čujne frekvencije i kontroliran klavijaturom.

7.11. Balansna modulacija (*Ring Modulation*)

Balansni modulatori električki su krugovi koji na izlazu daju frekvencijsku sumu i razliku dva ulazna signala. Tako npr. ako su ulazni signali sinusni, frekvencija 440 i 420 Hz, na izlazu ćemo dobiti signale od 860 Hz (suma) i 20 Hz (razlika). Ovisno o harmoničkom sadržaju ulaznih signala, izlaz može biti vrlo kompleksan. Takvi zvukovi vrlo su metalnog karaktera i najčešće se koriste za početne tranzijente udaraljki (LA sinteza). Slika 7.25 prikazuje rezultat balansne modulacije dva sinusna (čujna) signala.



Slika 7.25: Balansna modulacija dva sinusna signala

8. Vrste sinteze

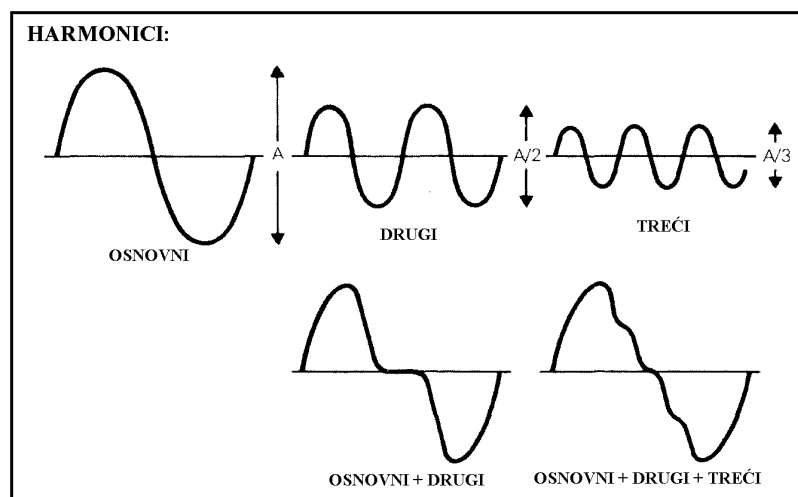
Ovo poglavlje objašnjava problematiku rada glasovnih modula, dakle problematiku nastajanja zvuka. Postoje razne metode sinteze i ovisno o zvuku koji želimo dobiti, svaka ima svoje prednosti i svoje nedostatke. Najbolja podloga za programiranje sintetizatora je znati kako su se vrste sinteze razvijale tokom godina; to je važno iz razloga što predstavljaju razne načine pristupa zvuku. Mnogi zvukovi mogu biti dobiveni pomoću gotovo svake od metoda, ali svaka od njih ima svoje slabe strane i svaka zahtijeva svoj način razmišljanja, pa i sviranja. Do sada korištene sinteze u glazbenim sintetizatorima su:

- **Aditivna sinteza (harmonička, Fourierova)**
- **Subtraktivna sinteza**
- **Frekvencijska modulacija (FM, AFM)**
- **Fazna distorzija (PD) i interaktivna fazna distorzija (iPD)**
- **Sample Playback - sinteza pomoću tablica valnih oblika (PCM, AWM, AWM2, AI, ...)**
- **Oblikovanje valnog oblika (Waveshaping) (*Objašnjeno u poglavlju 5.1.4*)**
- **Linearno-aritmetička sinteza (LA Syntesis)**
- **Vektorska sinteza**
- **Sinteza sekvenci valnih oblika (Wave Sequencing)**
- **Granularna sinteza**
- **Fizikalno modeliranje (PM)**
- **Karplus-Strong sinteza**

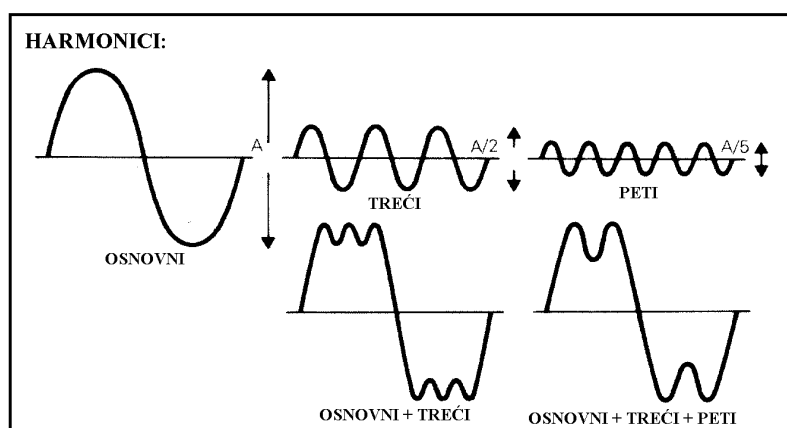
8.1 Aditivna sinteza (*Additive Synthesis*)

Svaki zvuk, ma koliko kompleksan bio, može se rastaviti na neki broj sinusnih valnih komponenti s različitim fazama i amplitudama. To su dijelovi zvuka, koji se zovu harmonici - ako je njihova frekvencija cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije.

Metoda generiranja kompleksnog zvučnog spektra kao sume mnogo sinusnih valnih oblika zove se Fourierova sinteza - po Jean Baptiste Joseph de Fourieru, koji je pronašao njenu matematičku osnovu. Mnogo širi pojam aditivne sinteze koristi se također, ako valni oblici nisu isključivo sinusni. Slike 8.1 i 8.2 prikazuju generiranje pilastog i pravokutnog signala sumiranjem sinusnih signala onih frekvencija i amplituda koje odgovaraju potrebnim harmonicima (što je veći broj elementarnih sinusnih signala i što je ispravnija faza sumiranja, dobiva se ispravniji izlazni valni oblik).



Slika 8.1: Aditivna sinteza pilastog signala



Slika 8.2: Aditivna sinteza pravokutnog signala

Idealno, za Fourierovu sintezu potreban je velik broj sinusnih oscilatora. Koliko velik, ovisi o željenoj širini spektra i svjetlini tona (svjetlina znači prisutnost viših harmonika): svjetlija bas nota ("slap" način sviranja) može ih trebati više od stotine, dok će ih harmonički zvuk visoke osnovne frekvencije vjerojatno trebati samo nekoliko (ostali harmonici padaju u nečujne frekvencije više od 20 kHz).

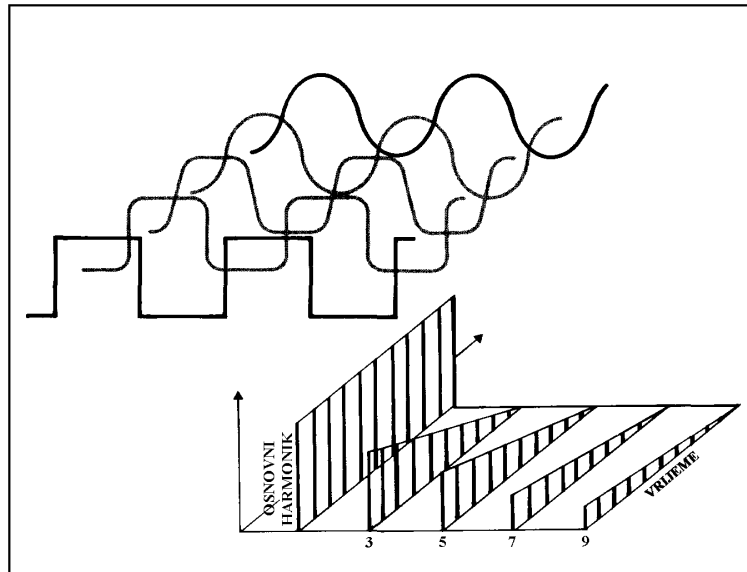
Za dobivanje dinamičnih zvukova i ekspresivno sviranje jednog aditivnog sintetizatora, potrebno je mnogo parametara: idealno bi svaki morao imati svoju amplitudnu envelopu, envelopu visine tona, osjetljivost na jačinu sviranja i zasebnu modulaciju (niskofrekvencijskim oscilatorom).

Iako izgleda da je hardware limitirajući faktor, ipak je to korisnost. Većina mnoštva parametara ima samo mali utjecaj na zvuk i u načelu je ekstremno teško procijeniti kako spektar željenog zvuka izgleda. Stoga simulacija akustičnih instrumenata aditivnom sintezom izgleda nemoguće bez potrebnog hardwarea i softwarea za analizu.

Tržište je vrlo siromašno instrumentima ove vrste: postoje samo dva uređaja pristupačnih cijena: Kawai K5 i Kurzweil K150FS. Neki sintetizatori nude mogućnost generiranja valnih oblika crtanjem njihovog oblika ili specificiranjem amplituda

harmonika. Takve sintetizatore nema osobitog smisla zvati aditivnima, pošto ne nude nikakvu kontrolu aditivnih parametara u realnom vremenu i tako sviranje tih aditivnih valnih oblika nije nimalo drugačije od sviranja *sampleova*.

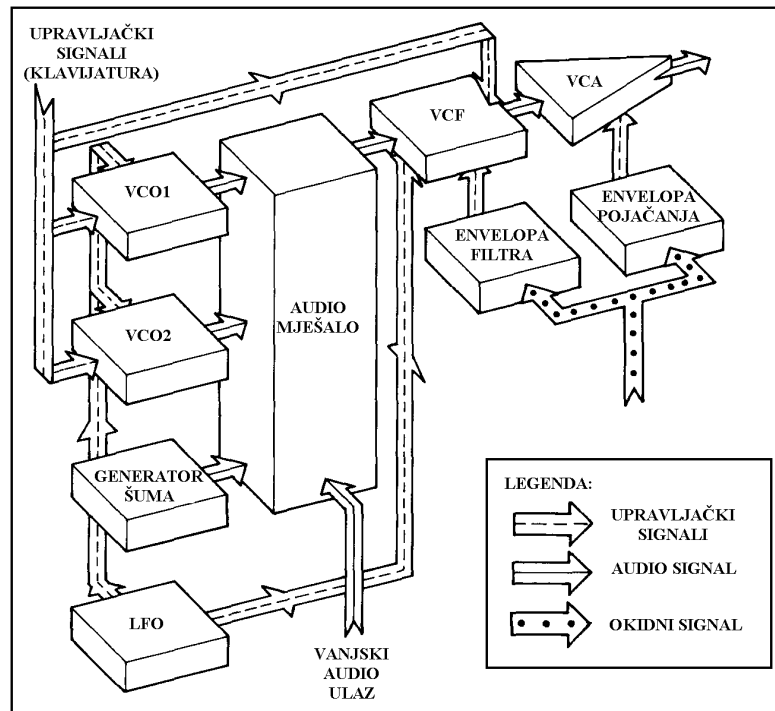
Ono što je karakteristično za aditivnu sintezu je činjenica da svaki harmonik željenog zvuka možemo kontrolirati posebnim parametrima. Na taj način možemo dobiti čitav niz valnih oblika koji se pretapaju jedan u drugi, na način da manipuliramo pojedinim harmonicima. Slika 8.3 prikazuje vremensku promjenu harmoničkog sadržaja pravokutnog valnog oblika koji se pretapa u sinusni.



Slika 8.3: Pretapanje pravokutnog valnog oblika u sinusni oblik vremenski kontinuiranom promjenom amplituda pojedinih harmonika

8.2 Subtraktivna sinteza (*Subtractive Synthesis*)

Ovo je klasična metoda sinteze korištena u većini analognih sintetizatora, *sample playback* sintetizatora i *samplera*. Subtraktivna sinteza znači da se kreće od zvuka (za koji je poželjno da bude spektralno bogat, kao što su to spektar pilastog ili pravokutnog/pulsnog valnog oblika, ili samplirana snimka klasičnog klavira), koji se propušta kroz modulacijski filter i pojačalo da bi mu se promijenila boja tona (harmonički sadržaj). Na ovaj način mi reduciramo ili "oduzimamo od" razine nekih dijelova originalnog spektra; odatle termin "subtraktivan". Terminologija je malo zbunjujuća, pošto gotovo svaki sintetizator koristi filtre. Načelno korištenje termina odnosi se na klasičnu "oscilator-filtar-pojačalo" trijadu. Na slici 8.4 prikazana je principijelna shema glasovnog modula subtraktivne sinteze.



Slika 8.4: Glasovni modul subtraktivne sinteze

Biranjem valnog oblika oscilatora ili *samplea*, osnovna boja tona vrlo dobro definirana, a uobičajeni parametri filtra i pojačala dopuštaju da ih učinimo svjetlijima, tamnijima, perkusivnijima itd.

Osnovni problem u subtraktivnoj sintezi je to što su oruđa vrlo nezgrapna. Valni oblici glavnog oscilatora ili sampleovi imaju poseban karakter koji je teško prevladati i uobičajeni filtri ne dozvoljavaju vrlo suptilne promjene. S razlogom unaprjeđivanja subtraktivne sinteze, razvijeno je mnogo proširenja osnovnoj subtraktivnoj shemi: kompleksni filtri (Emu Morpheus i UltraProteus), oblikovanje valnog oblika, prstenasta modulacija i mnoga druga.

8.3 Frekvencijska modulacija (*Frequency Modulation* - FM, AFM)

Frekvencijska modulacija uobičajeno se označava sa FM ili AFM (Advanced FM - unaprijeđena frekvencijska modulacija). Ovo je grupa metoda sinteze koja je donijela proboj komercijalnim digitalnim instrumentima osamdesetih. Princip FM sinteze je taj da kontroliramo frekvenciju jednog audio oscilatora drugim audio oscilatorom. Interesantno je da se na ovaj način može generirati široka različitost spektra, kao i mnoge tranzijentne zvučne karakteristike (a ne samo beskonačne, vrlo poznate varijacije električnih klavira i zvana). FM je izmislio prof. John M. Crowning u Stanfordu, a bila je korištena na akademskim kompjuterima davno prije nego ju je Yamaha izbacila na tržište. Ona je reducirala neke stvari, a isto tako neke unaprijedila (npr. uvela je povratnu vezu u svoje algoritme).

Frekvencijska modulacija postoji u mnogo različitih oblika: neki analogni sintetizatori kao i neki digitalni/analogni hibridi sposobni su za najjednostavniju FM. Ali snaga frekvencijske modulacije leži najviše o frekvencijskim omjerima korištenih oscilatora i stoga zahtijeva vrlo visoku stabilnost frekvencije. Također, FM postaje snažna sintetizatorska tehnika samo ako postoji velik broj oscilatora sa velikim brojem envelope za kontrolu njihovih amplituda, što rezultira velikim brojem komponenata (modula) potrebnih u analognoj tehnici. To je razlog zašto nikad nije bila popularna u analognim sintetizatorima. Drugi važan razlog je vjerojatno to što bi bilo vrlo teško ostvariti FM kao u popularnim Yamaha sintetizatorima s analognom elektronikom, pošto bi to zahtijevalo frekvencijsku modulaciju oscilatora "kroz nulu"- tj. sposobnost izvođenja valnog oblika unatrag da bi se postigla negativna frekvencija; isto tako i nezavisno kontroliran fazni parametar za frekvencijski moduliran izlaz.

Yamahine digitalne FM izvedbe koriste mikročipove, koji snižavaju cijenu. Snaga i broj različitih mogućnosti digitalne frekvencijske modulacije ovisi o broju oscilatora po glasu (minimum je 2, većina sintetizatora koristi 4 ili 6, a neke Yamahine orgulje čak 10), bilo da postoji stvarna envelope po oscilatoru (neki vrlo jednostavni Yamahini zvučni čipovi poput onih korištenih u starim Atari ST računalima imaju ih manjak) i naravno, koliko su varijabilne veze između oscilatora (broj "algoritama", modulacijskih i povratnih veza).

Postoji u načelu 3 tipa frekvencijske modulacije izvedenih u Yamahinim sintetizatorima. 6-operatorska FM (Yamaha DX7), neke 4-operatorske FM varijante, i unaprijeđen oblik 6-operatorske FM u sintetizatorima SY77, TG// i SY99. Yamaha naziva sintetizatorsku metodu ovih novijih 6-operatorskih FM sintetizatora AFM (*Advanced Frequency Modulation*).

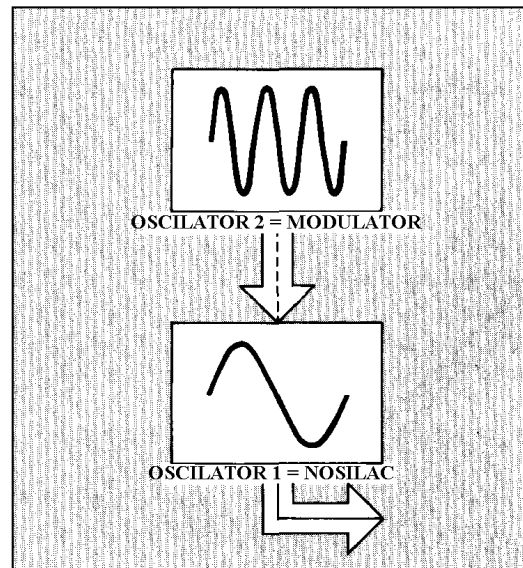
8.3.1 Princip FM sinteze

FM sinteza je varijacija principa frekvencijske modulacije koja se koristi u odašiljanju radio programa: i ovdje imamo nosilac (*carrier*) i modulator, samo što su njihove frekvencije u čujnom području. Ako se frekvencijski modulira jedan audio ton drugim - s različitom visinom i amplitudom, dobiva se totalno novi zvuk s vrlo malo sličnosti s prva dva. Potrebno je znati što, modulirano čime, što daje. FM sinteza nije nimalo jednostavna - to je razlog zbog kojeg su proizvođači FM sintetizatora uvijek osiguravali da u njihovim instrumentima postoje preprogramirani zvukovi, kako bi oni s manje avanturističkog duha isto tako mogli dobiti mnogo od ovih instrumenata.

Modulacija sinusnog valnog oblika drugim sinusnim valom proizvodi bočne pojaseve, tj. bočne frekvencije iznad i ispod frekvencije nosioca. Ovi bočni pojasevi stvoreni su na račun nosioca, koji je "izobličen" modulatorom. razlika frekvencije bočnog pojasa i frekvencije nosioca naziva se devijacija frekvencije. Ovi bočni pojasevi ponašaju se kao novi harmonici originalnog tona i razlog su drastične promjene originalnog sinusnog vala na izlazu.

8.3.2 Osnovna konfiguracija FM-a

Na slici 8.5 prikazana je jedna od osnovnih FM konfiguracija, s dva sinusna oscilatora koji osciliraju čujnom frekvencijom. Donji oscilator nazvat ćemo nosiocem, a gornji modulatorom.



Slika 8.5: Dva oscilatora - nosilac i modulator

Kada slušamo nosilac, postoje dva parametra koji dramatično utječu na izlazni signal oscilatora, a time i na dobiveni zvuk:

1. Odnos između frekvencija nosioca i modulatora (engl. *ratio*)
2. Količina modulacijskog signala korištenog za moduliranje nosioca (engl. *amount*)

Promjenom jednog od ta dva parametra mijenja se zvuk po naizgled neshvatljivim pravilima. Za objašnjenje što se zapravo događa, potrebno je primijeniti matematičku analizu.

8.3.3 Matematička teorija frekvencijske modulacije

U ovom poglavlju prikazat ću osnove teorije frekvencijske modulacije sinusnog nosioca sinusnim signalom modulatora. To je zapravo osnovna forma FM sinteze: klasični par nosilac-modulator.

Svaki oscilator titra svojom frekvencijom. Donji oscilator ima modulacijski ulaz u koji ulazi signal gornjeg oscilatora i tako mu mijenja frekvenciju. Pošto je signal modulatora sinusoidalni, i promjene frekvencije nosioca su sinusoidalne. Najveća promjena frekvencije (devijacija frekvencije) bit će tada proporcionalna amplitudi modulacijskog signala. Frekvenciju nosioca u slobodnom titranju označit ćemo sa f_c (*carrier*), a frekvenciju modulatora sa f_m . Odgovarajuće kutne brzine tada su $\omega_c = 2\pi f_c$ i $\omega_m = 2\pi f_m$, pošto je frekvencija promjena kuta s vremenom. Frekvenciju tada možemo i napisati kao derivaciju faznog kuta:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

Pošto je modulacijski signal ima oblik $m \cos \omega_m t$, fazni kut će se mijenjati po pravilu:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_c + \Delta\omega \cdot m \cos \omega_m t \quad (1)$$

Pri tome je $\Delta\omega$ frekvencijska devijacija pri punoj modulaciji ($m = 1$). Integracija izraza (1) po vremenu daje kut:

$$\alpha = \omega_c t + \frac{m\Delta\omega}{\omega_m} \sin \omega_m t + konst. \quad (2)$$

Zanemarivanjem konstante integracije (početne faze) dobivamo formulu moduliranog nosioca:

$$y = A \sin(\omega_c t + \frac{m\Delta\omega}{\omega_m} \sin \omega_m t)$$

Veličinu $\frac{m\Delta\omega}{\omega_m} = I$ nazivamo indeksom modulacije, dok je $\frac{\Delta\omega}{\omega_m} = D$ omjer devijacije.

Pretpostavit ćemo da je $m = 1$, pa je tada $I = D = \frac{m\Delta\omega}{\omega_m}$

Tada je:

$$y = A \sin(\omega_c t + I \sin \omega_m t) \quad (3)$$

Upotrebom trigonometrijske formule za transformaciju sinusa zbroja dobivamo:

$$y = A [\sin \omega_c t \cos(I \sin \omega_m t) + \cos \omega_c t \sin(I \sin \omega_m t)] \quad (4)$$

Dijelove te jednadžbe možemo, kao što je poznato, razviti kao:

$$\begin{aligned} \sin(I \sin \omega_m t) &= 2J_1(I) \sin \omega_m t + 2J_3(I) \sin 3\omega_m t + 2J_5(I) \sin 5\omega_m t + \dots \\ &\dots + 2J_{2n+1}(I) \sin(2n+1)\omega_m t + \dots \end{aligned}$$

Odnosno:

$$\begin{aligned} \cos(I \sin \omega_m t) &= J_0(I) + 2J_2(I) \cos 2\omega_m t + 2J_4(I) \cos 4\omega_m t + \dots \\ &\dots + 2J_{2n}(I) \cos 2n\omega_m t + \dots \end{aligned}$$

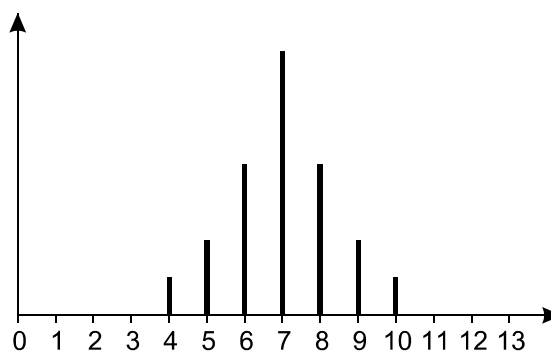
U razvoju se pojavljuju Besselove funkcije (J_n) različitih redova od argumenta I . Uvrsti li se to u jednadžbu (4), dobivamo:

$$\begin{aligned}
y = A[& J_0(I) \sin \omega_c t + \\
& + 2J_1(I) \cos \omega_c t \sin \omega_m t + \\
& + 2J_2(I) \sin \omega_c t \sin 2\omega_m t + \\
& + 2J_3(I) \cos \omega_c t \sin 3\omega_m t + \\
& + \dots + \\
& + 2J_{2n}(I) \sin \omega_c t \cos 2n\omega_m t + \\
& + 2J_{2n+1}(I) \cos \omega_c t \sin(2n+1)\omega_m t + \\
& + \dots] \quad (5)
\end{aligned}$$

Nakon transformacije produkata sinusa i kosinusa u sumu (razliku) dobivamo završnu formulu iz koje se jasno vidi spektralni sastav frekvencijski moduliranog vala:

$$\begin{aligned}
y = A\{ & J_0(I) \sin \omega_c t + \\
& + J_1(I) [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t] + \\
& + J_2(I) [\sin(\omega_c + 2\omega_m)t + \sin(\omega_c - 2\omega_m)t] + \\
& + J_3(I) [\sin(\omega_c + 3\omega_m)t - \sin(\omega_c - 3\omega_m)t] + \\
& + J_4(I) [\sin(\omega_c + 4\omega_m)t + \sin(\omega_c - 4\omega_m)t] + \\
& + \dots + \\
& + J_{2n}(I) [\sin(\omega_c + 2n\omega_m)t + \sin(\omega_c - 2n\omega_m)t] + \\
& + J_{2n+1}(I) [\sin(\omega_c + (2n+1)\omega_m)t - \sin(\omega_c - (2n+1)\omega_m)t] + \\
& + \dots \}
\end{aligned}$$

Prvi član je val nosilac. Svaki od idućih članova čini par bočnih pojaseva, simetričnih oko nosioca, i razmaknutih oko njega za $\omega_m, 2\omega_m, 3\omega_m, \dots, 2n\omega_m, (2n+1)\omega_m, \dots$. Na slici 8.6 prikazan je spektar za odnos frekvencija modulatora i nosioca 1:7 (npr. $f_m = 1\text{kHz}$ i $f_c = 7\text{kHz}$).

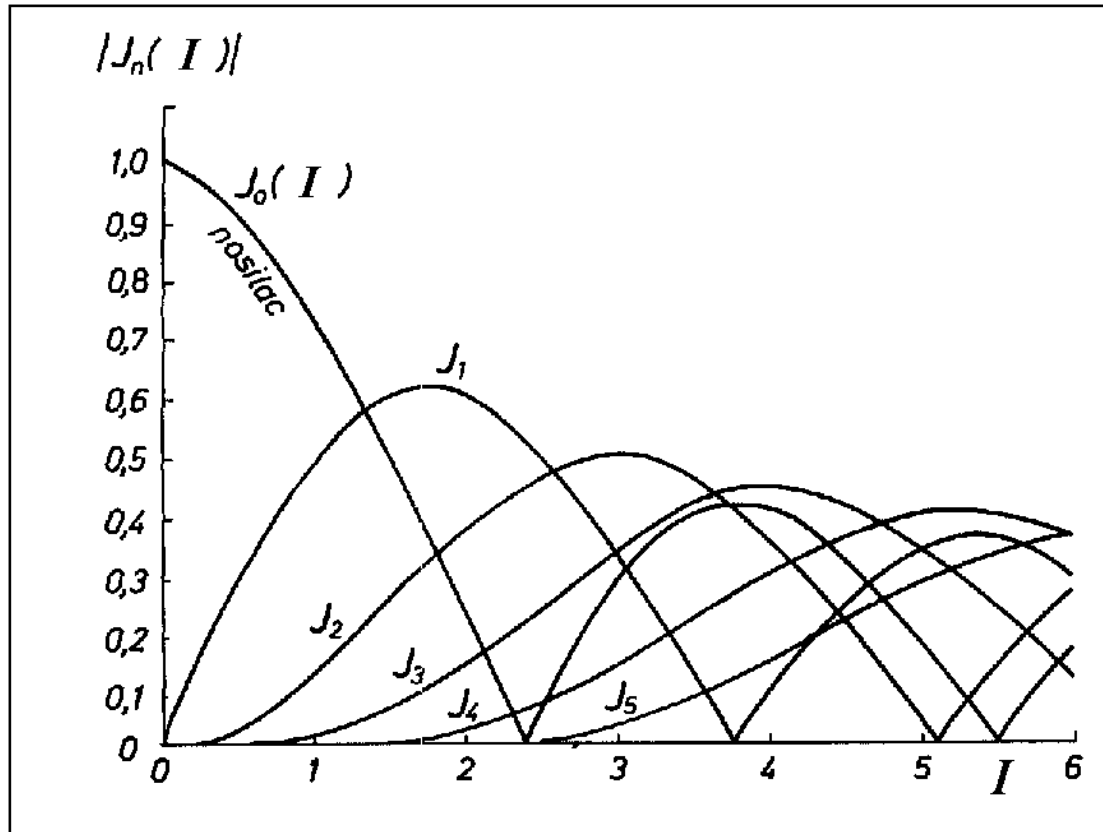


Slika 8.6: Spektar frekvencijski moduliranog signala za odnos frekvencija modulatora i nosioca 1:7

Dakle, spektar sinusnim signalom moduliranog sinusnog vala sastoji se od simetričnih linija oko nosioca (frekvencije ω_c), a razmaci među linijama jednaki su ω_m . Funkcija

$J_n(I)$ brzo opada za $n > I$ (ako je $I = D = \frac{\Delta m}{\Delta \omega_m} > 1$).

Dijagram Beselovih funkcija prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 8.7: Besselove funkcije od argumenta $I = \frac{\Delta \omega}{\omega_m}$

Iz dijagrama se vidi da se povećanjem indeksa modulacije amplitude parova bočnih komponenti bližih nosiocu smanjuju na račun povećanja amplituda udaljenijih komponenti (to smanjivanje nije monotono, kao što se vidi, već ima svoje uspone i padove).

Pošto je indeks modulacije I kvocijent devijacije frekvencije nosioca (koja ovisi o amplitudi signala modulatora) i modulacijske frekvencije, znači da ga povećavamo pojačavanjem izlaza modulatora ili smanjivanjem njegove frekvencije. Tada se spektralna energija pomiče sve više prema komponentama udaljenijim od nosioca. To se jasno primjećuje kad na konkretnom modulatoru povećavamo amplitudu modulacijskog signala. Smanjivanjem frekvencije modulacije ne dobivamo očekivane rezultate. Razlika je u tome što povećavanje indeksa modulacije na prvi način (pojačanjem izlaza modulatora, tj. $\Delta \omega$), utječe samo na argument Besselovih funkcija, tj. na amplitude komponenti koji ovom promjenom ostaju na svojim mjestima. Smanjivanje modulacijske frekvencije uz to što utječe na argumente Besselovih

funkcija, utječe i na pozicije komponenti, koji su kao što znamo, na pozicijama $\omega_c + \omega_m, \omega_c - \omega_m, \omega_c + 2\omega_m, \omega_c - 2\omega_m$ itd.

Spektar FM signala je teoretski beskonačno širok, jer se vrijednosti Besselovih funkcija smanjuju prema komponentama udaljenijima od nosioca, a vrijednosti nula poprimaju samo u diskretnim točkama. No, vrlo visoke linije spektra ne čujemo iz razloga što im je amplituda jako mala, kao i zbog gornje granice čujnosti od 20 kHz.

Bitno je naglasiti da se spektralne linije koji kao produkt FM-a završe ispod frekvencije 0 Hz na frekvencijskoj skali, zrcalno preslikavaju oko amplitudne osi u pozitivne frekvencije. Primjer: uz $f_c = 1000$ Hz i $f_m = 1200$ Hz, dobivamo spektralnu liniju na -200 Hz: **ona se čuje kao 200 Hz.**

Ako se reflektirane komponente preslikavaju u pozitivne komponente koje već postoje od gornjeg bočnog pojasa spektar se zove koincidentnim, jer komponente koincidiraju (poklapaju se).

Još jedna važna spoznaja je to da ako imamo npr. koincidentni spektar FM modulacije, čak i malom promjenom frekvencije nosioca ili modulatora tu koincidenciju kvarimo. Primjer: Ako je frekvencija i modulatora i nosioca 1000 Hz, dobivamo harmonike na pozicijama 1000, 2000, 3000, 4000 Hz itd. Ako sada povećamo frekvenciju nosioca na 1001 Hz nereflektirane (desne) spektralne linije bit će na 2001, 3001, 4001 Hz itd., a reflektirane komponente na 999, 1999, 2999, 3999 Hz itd. tako da više ne koincidiraju i dobivamo neharmonijski spektar.

8.3.4 Primjena matematičkih spoznaja o frekvencijskoj modulaciji

U prethodnom izlaganju namjerno nisam za spektralne komponente dobivene modulacijom koristio riječ harmonici, zbog toga što oni u odnosu na nosilac nisu u harmoničkom odnosu (nisu njegovi višekratnici). Zvuk koji se najčešće čuje je neugodan i disharmoničan. Da bi dobiveni zvuk imao određenu visinu tona, uvjet je da spektralne komponente padnu u frekvencije koje su višekratnik frekvencije nosioca. To se događa samo ako je modulacijska frekvencija i sama višekratnik frekvencije nosioca. U praksi se to postiže na sljedeći način: u sintetizatoru DX7 frekvencija svakog oscilatora može se definirati na jedan od dva načina:

1. **FIXED** - Fiksiranjem frekvencije na fiksnu vrijednost koja se ne mijenja pritiskom na različite tipke klavijature. Frekvencija se može namjestiti od 10Hz do 10 kHz u vrlo finim koracima.
2. **RATIO** - Odnosom prema osnovnoj frekvenciji pritisnutog tona. Vrijednosti koje taj odnos može poprimiti kreću se od 0.5 do 62.

Drugi način zadavanja frekvencije je posebno zanimljiv za dobivanje zvukova s definiranom visinom tona. Primjer: Ako pritisnemo tipku A1 na klavijaturi (pod tonom A1 podrazumijeva se ton osnovnog harmonika 440 Hz) i *ratio* vrijednost nosioca postavimo na 1.00 čut će se sinusni ton od 440 Hz. Za vrijednost od 0.50 dobiva se ton od 220 Hz, za 2.00 ton od 880 Hz itd. Ako sviramo duž klavijature, frekvencija nosioca bit će uvijek u definiranom odnosu prema frekvenciji tona koja je umemorirana u sintetizatoru za određenu tipku. Uključimo sada u razmatranje i

modulator: već smo došli do zaključka da ako želimo harmonički odnos spektralnih komponenti FM signala prema nosiocu, frekvencija modulacije mora biti cjelobrojni višekratnik frekvencije nosioca. To se postiže stavljanjem frekvencije i nosioca i modulatora u *ratio* mod, i postavljanjem u takav odnos, da budu višekratnici. Jedna od mogućnosti je 1.00 za nosioc i 1.00 za modulator - postoji i mnogo drugih: 1.00/2.00, 1.00/3.00, 1.00/10.00, 0.5/1.00 itd. Za sve te odnose dobit ćemo kao izlazni signal ton definirane visine; neki od njih bit će manje, a neki više ugodni, zavisno od dobivenog spektra.

8.3.5 Konstrukcija osnovnih valnih oblika frekvencijskom modulacijom

Prvi sintetizatori FM sinteze (Yamaha DX/TX serija) kao valne oblike oscilatora imaju samo sinusni signal (kasnije generacije instrumenata imaju i druge valne oblike). Stoga je kao najbolji primjer FM sinteze pogodno konstruiranje pilastog ili pravokutnog valnog oblika pomoću modulacije sinusnog signala drugim sinusnim signalom.

Pravilo je:

Spektri stvarnog pilastog/pravokutnog signala i onog koji ćemo dobiti modulacijom moraju biti slični. Pod sličnosti podrazumijevamo podjednake vrijednosti amplituda, dok pozicije harmonika moraju biti iste.

Konstrukcija pilastog valnog oblika

Iz izlaganja o osnovnim valnim oblicima znamo da je spektar pilastog signala bogat i parnim i neparnim harmonicima osnovne frekvencije, i da polako opadaju prema većim frekvencijama. Za odnos frekvencije nosioca 1.00 i frekvencije modulatora 1.00 dobivamo spektar FM-a koji je sličan spektru pile, jer se sve druge komponente nalaze na razmaku od 1.00 i padaju u cjelobrojne višekratnike frekvencije nosioca. Prva bočna lijeva komponenta pada u 0 Hz, a sve ostale negativne preslikavaju se u cjelobrojne pozitivne. Spektar originalnog pilastog valnog oblika kojem je ovaj amplitudno sličan prikazan je u drugom poglavlju na slici 2.8.

Potrebno je još podesiti amplitudu na izlazu iz modulatora na vrijednost za koju će spektar biti najbliži pilastom po veličini harmonika: povećanjem amplitude modulatora, kao što je rečeno, povećavamo devijaciju frekvencije nosioca, kao i indeks modulacije koji je argument Besselovih funkcija a time i njihov rezultat koji mijenja amplitude harmonika.

Opaska: amplituda izlaza određenih oscilatora (operatora) kod DX7 sintetizatora ima raspon vrijednosti od 0 do 99, a kod sintetizatora SY serije od 0 do 127. Stoga je za prebacivanje određenog zvuka sa DX na SY seriju i obratno potrebno preračunati jedne vrijednosti u druge (ovisnost nije linearna) pomoću tablica - to rade programi za konverziju na računalu.

Konstrukcija pravokutnog i trokutnog valnog oblika

Pravokutni i trokutni valni oblik sadrže samo parne harmonike, stoga je jedno od mogućnosti dobivanja ovih valnih oblika sljedeći:

Frekvencija nosioca = 1.0, frekvencija modulatora = 2.0.

Uz nosilac na frekvenciji 1.0 dobivamo spektralne komponente na 3.0, 5.0, 7.0 itd. One su nastale od desnih bočnih pojaseva, kao i od lijevih koji zrcaljeni oko ishodišta padaju u iste frekvencije.

Visoke vrijednosti amplitude modulirajućeg signala daju valni oblik sličan pravokutnim, a niske sličan trokutnom.

8.3.6 Ostali zvukovi FM sinteze

Na sličan se način kao i ovih nekoliko dobivaju i mnogi drugi zvukovi: mogućnosti su beskrajne i neistražene. Moguće je dobivanje zvukova koji se ne mogu dobiti subtraktivnom sintezom: npr. za odnos modulator-nosioc 3 : 1 dobivamo harmonike na (2),4,(5),7,(8),10,(11),13,(14) itd. (reflektirani harmonici negativnih frekvencija su u zagradama).

Raznim vrijednostima *fixed* i *ratio* parametara dobivamo cijeli niz harmonijskih i neharmonijskih zvukova. Kod onih neharmonijskih, koji zvuče metalno i pomalo neugodno, služeći se kratkim envelopama glasnoće (tj. envelopama amplitude nosioca) dobivamo razne perkusionističke zvukove, metalnih i drvenih udaraljki. Oni su korisni kao tranzijenti zvukova električnih klavira i zvona (zbog kojih su FM sintetizatori najpopularniji); ostatak tona dobiva se pomoću drugih oscilatora sa harmonijskim valnim oblikom.

8.3.7 Pregled pozicija harmonika u spektru FM-a za različite odnose modulator: nosilac

Slijede dvije tablice: u prvoj su prikazani razni odnosi frekvencija modulatora i nosioca. U njoj se nalazi naziv spektralne serije koju generira određeni odnos (pošto više različitih odnosa može dati istu seriju harmonika po poziciji - ne nužno i istih amplituda). Tada se u drugoj tablici pronađe spektralni sastav te serije. Određene serije imaju znakove $\times 2$ i $\times 3$ - radi se o tome da je to ista serija samo su pozicije harmonika transponirane za navedenu vrijednost. Na primjer, odnos M:C=3:3 ima harmonike na vrijednostima 3.00, 6.00, 9.00, 12.00..., što su zapravo pozicije harmonika odnosa M:C=1:1 (1.00, 2.00, 3.00, 4.00...), samo frekvencija pomnoženih sa 3.

Tablica 1:

Serije generirane različitim odnosima modulator(m) -nosioč(C)

C\M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1:12:1	3:1	4:1	5:1	6:1	7:1	8:1	9:1	10:1	11:1	12:1	13:1	14:1	15:1	16:1	
2	1:11:1 x2	3:1	2:1 x2	5:2	3:1 x2	7:2	4:1 x2	9:2	5:1 x2	11:2	6:1 x2	13:2	7:1 x2	15:2	8:1 x2	
3	1:12:1	1:1 x3	4:1	5:2	2:1 x3	7:3	8:3	3:1 x3	10:3	11:3	4:1 x3	13:3	14:3	5:1 x3	16:3	
4	1:11:1 x2	3:1	1:1 x4	5:1	3:1 x2	7:3	2:1 x4	9:4	5:2 x2	11:4	3:1 x4	13:4	7:2 x2	15:4	4:1 x4	
5	1:12:1	3:1	4:1	1:1 x5	6:1	7:2	8:3	9:4	2:1 x5	11:5	12:5	13:5	14:5	3:1 x5	16:5	
6	1:11:1 x2	1:1 x3	2:1 x2	5:1	1:1 x6	7:1	4:1 x2	3:1 x3	5:2 x2	11:5	2:1 x6	13:6	7:3 x2	5:2 x3	8:3 x2	
7	1:12:1	3:1	4:1	5:2	6:1	1:1 x7	8:1	9:2	10:3	11:4	12:5	13:6	2:1 x7	15:7	16:7	
8	1:11:1 x2	3:1	1:1 x4	5:2	3:1 x2	7:1	1:1 x8	9:1	5:1 x2	11:3	3:1 x4	13:5	7:3 x2	15:7	2:1 x8	
9	1:12:1	1:1 x3	4:1	5:1	2:1 x3	7:2	8:1	1:1 x9	10:1	11:2	4:1 x3	13:4	14:5	5:2 x3	16:7	
10	1:11:1 x2	3:1	2:1 x2	1:1 x5	3:1 x2	7:3	4:1 x2	9:1	1:1 x10	11:1	6:1 x2	13:3	7:2 x2	3:1 x5	8:3 x2	
11	1:12:1	3:1	4:1	5:1	6:1	7:3	8:3	9:2	10:1	1:1 x11	12:1	13:2	14:3	15:4	16:5	
12	1:11:1 x2	1:1 x3	1:1 x4	5:2	1:1 x6	7:2	2:1 x4	3:1 x3	5:1 x2	11:1	1:1 x12	13:1	7:1 x2	5:1 x3	4:1 x4	
13	1:12:1	3:1	4:1	5:2	6:1	7:1	8:3	9:4	10:3	11:2	12:1	1:1 x13	14:1	15:2	16:3	
14	1:11:1 x2	3:1	2:1 x2	5:1	3:1 x2	1:1 x7	4:1 x2	9:4	5:2 x2	11:3	6:1 x2	13:1	1:1 x14	15:1	8:1 x2	
15	1:12:1	1:1 x3	4:1	1:1 x5	2:1 x3	7:1	8:1	3:1 x3	2:1 x5	11:4	4:1 x3	13:2	14:1	1:1 x15	16:1	
16	1:11:1 x2	3:1	1:1 x4	5:1	3:1 x2	7:2	1:1 x8	9:2	5:2 x2	11:5	3:1 x4	13:3	7:1 x2	15:1	1:1 x16	

Tablica 2:
Serijske generiranih harmonika

Legenda:

] i [označavaju nekoincidentne spektralne linije.

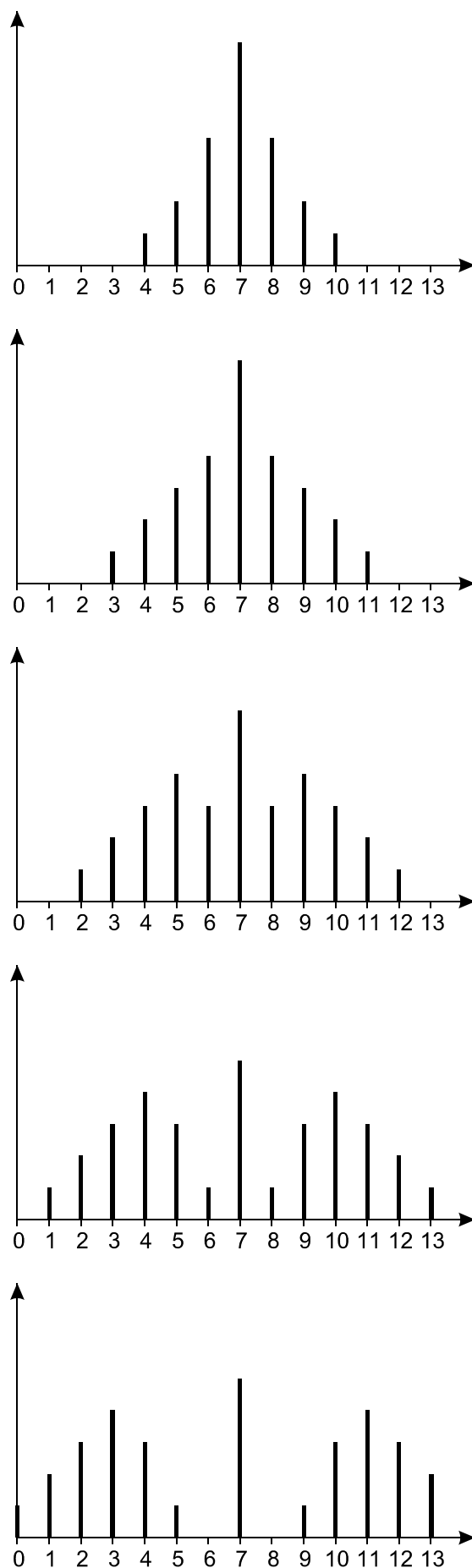
] je oznaka za nereflektiranu, a [za reflektiranu spektralnu komponentu

I su oznake za koincidentne spektralne linije.

Serijske	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
1:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
2:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
3:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
4:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
5:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
6:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
7:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
8:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
9:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
10:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
11:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
12:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
14:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
15:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
16:1]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
Serijske	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
5:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
7:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
9:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
11:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
15:2]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
7:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
8:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
10:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
11:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
14:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
16:3]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
Serijske	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
9:4]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
11:4]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:4]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
15:4]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
11:5]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
12:5]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:5]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
14:5]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
16:5]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
13:6]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
15:7]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]
16:7]	[]	[]	[]]	[]	[]]	[]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]	[]]

8.3.8 Promjena spektralnog sadržaja promjenom jačine modulacije (Modulation Amount)

Utjecaj jačine modulacije na spektar dobivenog zvuka prikazan je na slici 8.8.

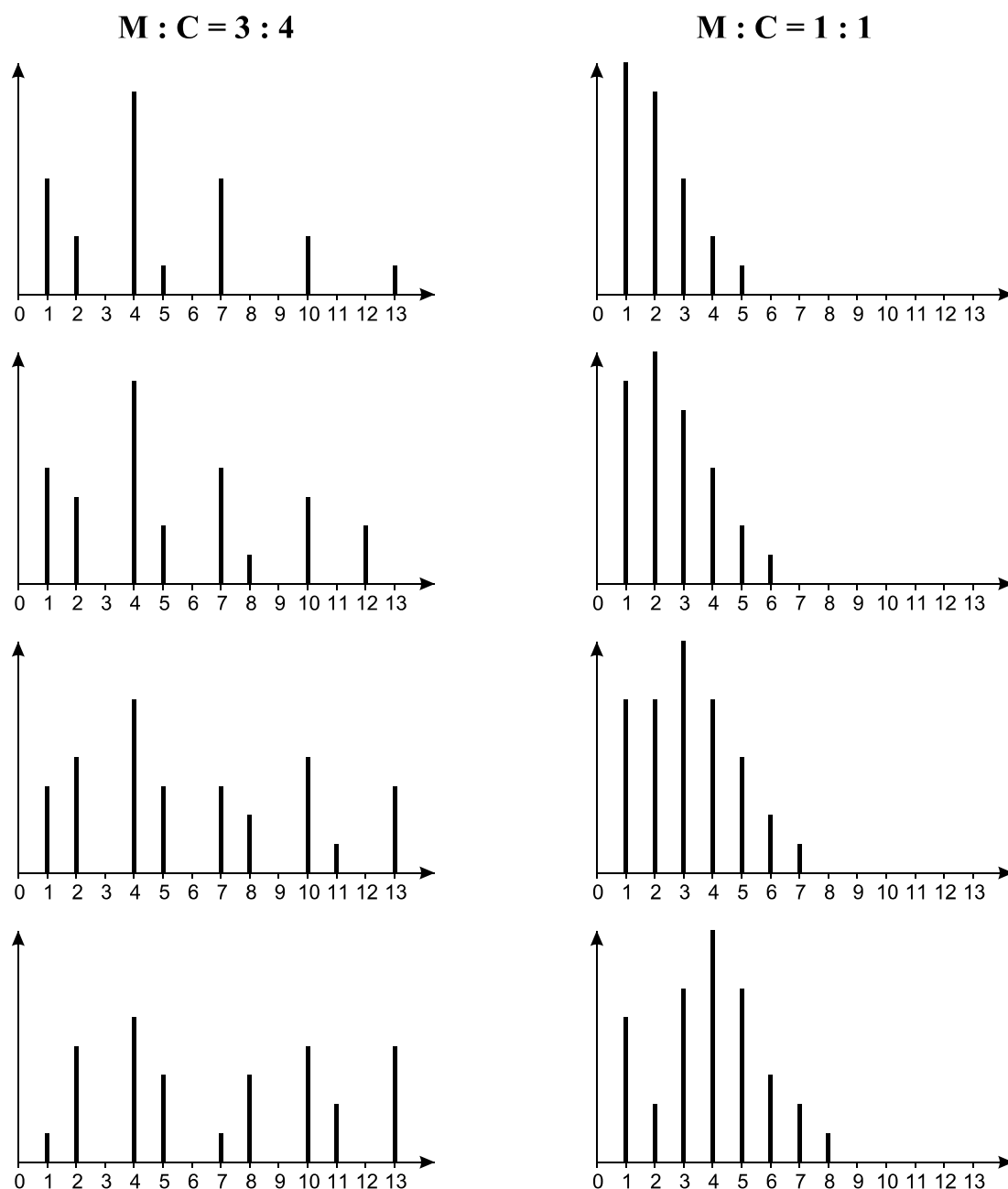


Slika 8.8: Utjecaj jačine modulacije na spektar dobivenog zvuka
 Danko Kozar: *Glazbeni sintetizatori*

Povećavanjem ovog parametra (indeksa modulacije I) dešavaju se promjene prikazane na slici:

1. Kad nema modulacije, postoji samo nosioc.
2. Kod malih nivoa modulacije, javljaju se bočne spektralne komponente, i spektar ima oblik "šatora".
3. Kod dovoljno visokih nivoa modulacije spektar poprima oblik zvona.
4. Od ove točke mala povećanja modulacije proširuju oblik zvona.
5. Kod vrlo visokih modulacijskih nivoa, distribucija spektra počinje sličiti na dva zvona koja se udaljavaju od nosioca.

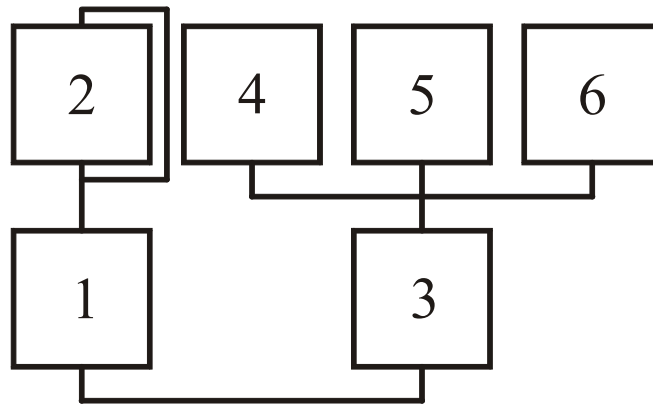
Slika 8.7 prikazivala je odnos modulator-nosioc 1:7, tako da praktički nema reflektiranih komponenti. Za neke druge omjere, povećanje količine modulacije rezultira pomicanjem dijela spektra u negativno frekvencijsko područje, i njegovim već objašnjenim preslikavanjem u pozitivni dio spektra. Na slici 8.9 prikazano je što se događa kod omjera 3:4 i 1:1.



Slika 8.9: Utjecaj jačine modulacije na spektar kod omjera modulator:nosilac 3:4 i 1:1

8.3.9 Realizacija FM sinteze digitalnom tehnologijom

Za snagu koju nudi FM sinteza, zahtjevi na hardware začuđujuće su jednostavni. Poput aditivne sinteze, FM se cijela oslanja na sinusne valne oblike i generatore envelope, ali umjesto "horizontalnog rada", tj. miješanja zajedno signala različitih frekvencija i amplituda, FM se najviše oslanja na ono što se događa kada su oscilatori postavljeni "vertikalno". Pojmove horizontalnog i vertikalnog lako je shvatiti pogledom na slike algoritama FM sinteze. Nosioči su ucrtani u najdonji red slike pojedinog algoritma, iznad njih su modulatori koji ih moduliraju, a ponekad iznad modulatora i drugi modulatori koji moduliraju ove prve. Svaki od kvadratića na dijagramima algoritama predstavlja jedan imaginarni oscilator sa svojim kontrolama koji se naziva operator.



Slika 8.10: Algoritam

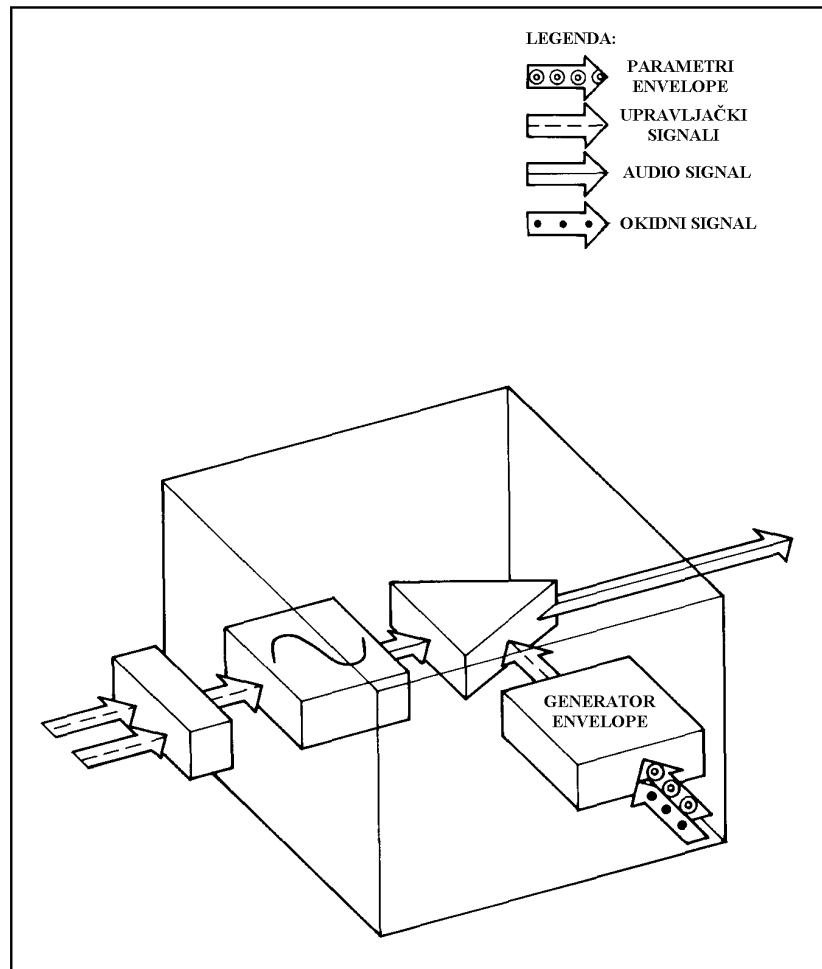
8.3.10 Operator

Do sada je bilo riječi samo o statičnoj situaciji, ali kao što znamo, sintetizator mora biti sposoban proizvoditi tonove s:

- vremenski promjenjivim amplitudama
- vremenski promjenjivom bojom tona

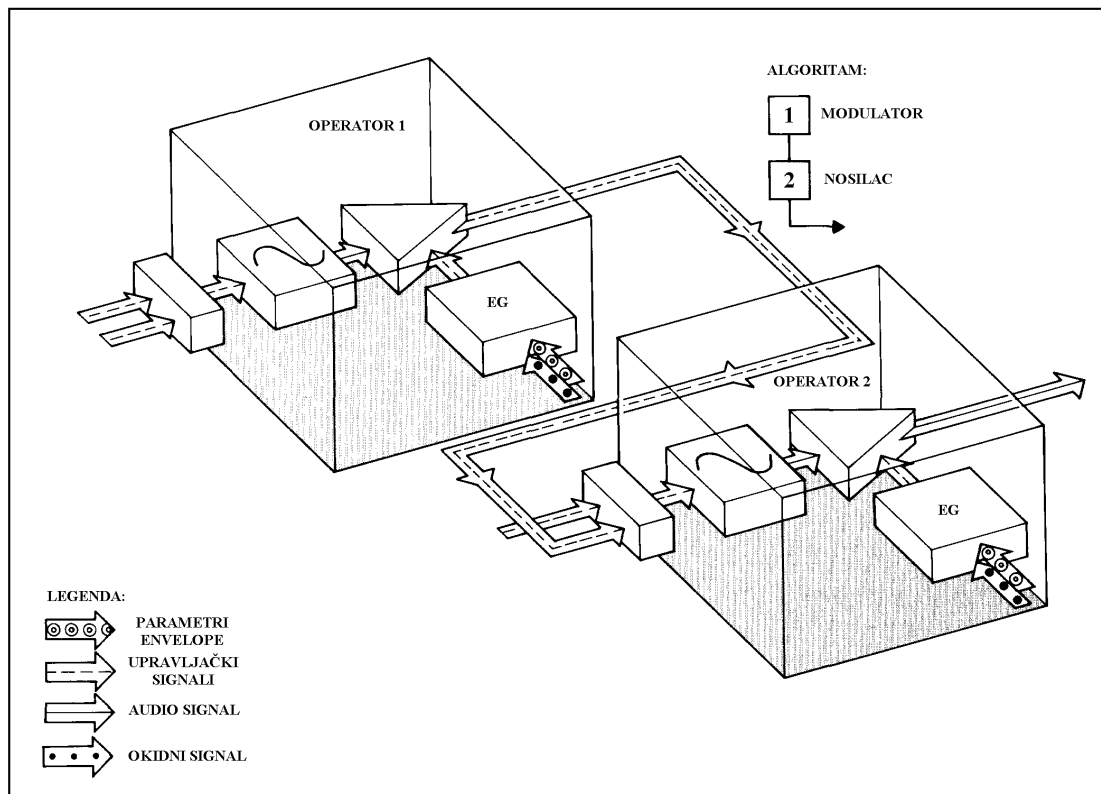
Da bi postavljene zahtjeve ispunili, potrebno je imati dodatne generatore envelope. Glasnoću nosioca mijenjamo jednim generatorom envelope - poput jednostavnog stupnja za pojačanje. Za promjenu boje tona možemo se odlučiti na variranje parametara 1. ili 2. prije spomenutih; jednostavnom kontrolom nad izlaznim amplitudom modulatora koristeći generator envelope, možemo postići željeni efekt i promjene boje tona slijedit će oblik envelope. Kako ona raste, tako raste i izlaz iz modulatora, a kao posljedica je i nosioc jače moduliran.

Ovi zaključci navode nas na očitu konstrukciju teoretskog električnog kruga poznatog kao operator. Slika prikazuje jedan operator, koji se sastoji od generatora sinusnog valnog oblika varijabilne frekvencije, varijabilnog pojačala i generatora envelope:



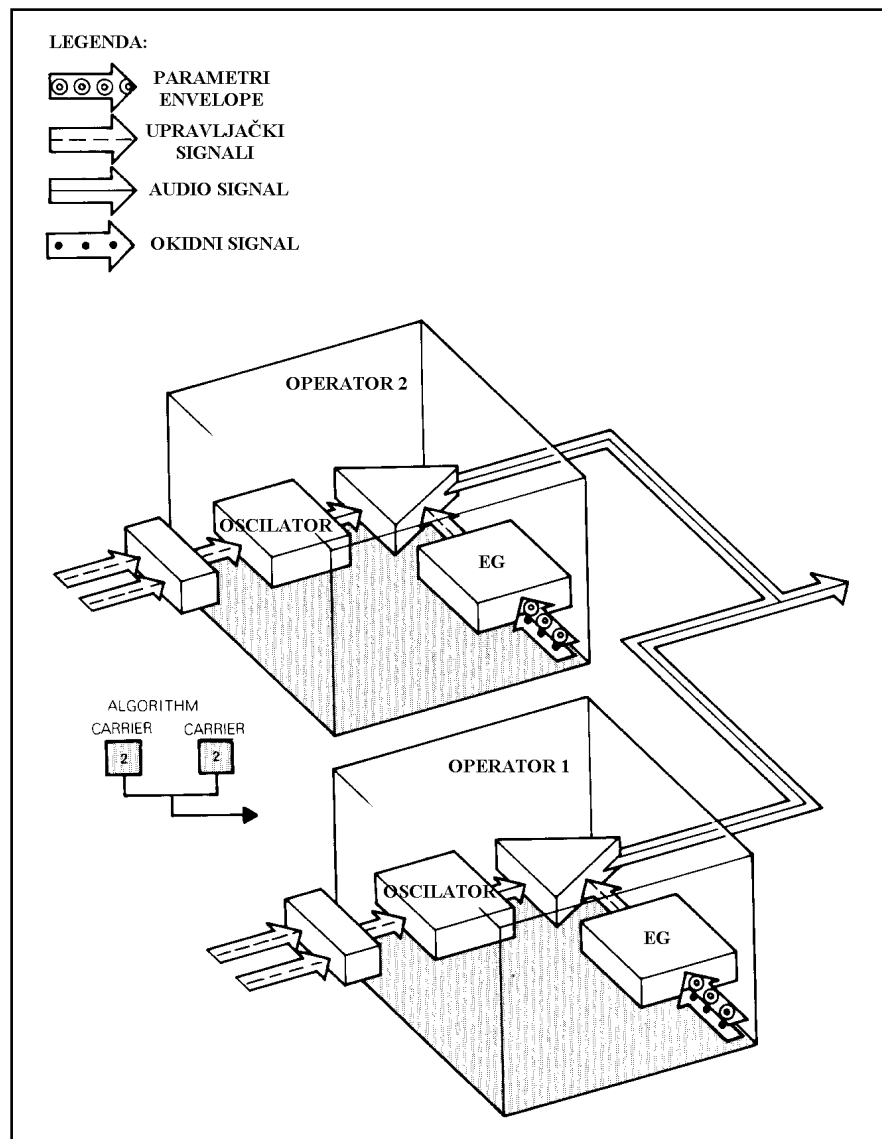
Slika 8.11: Operator FM sinteze

Postoje tri vrste ulaznih podataka na koje operator mora reagirati: podaci o visini tona (frekvenciji), modulacijski podaci i podaci o parametrima envelope. Iz ove tri vrste podataka operator će proizvesti sinusni val amplitude proporcionalne parametrima envelope, i frekvencije odgovarajuće podacima o visini tona. Ali s uključivanjem modulacijskih podataka, oblik sinusnog vala može biti izobličen i potpuno neprepoznatljiv.



Slika 8.12: Dva serijski vezana operatora

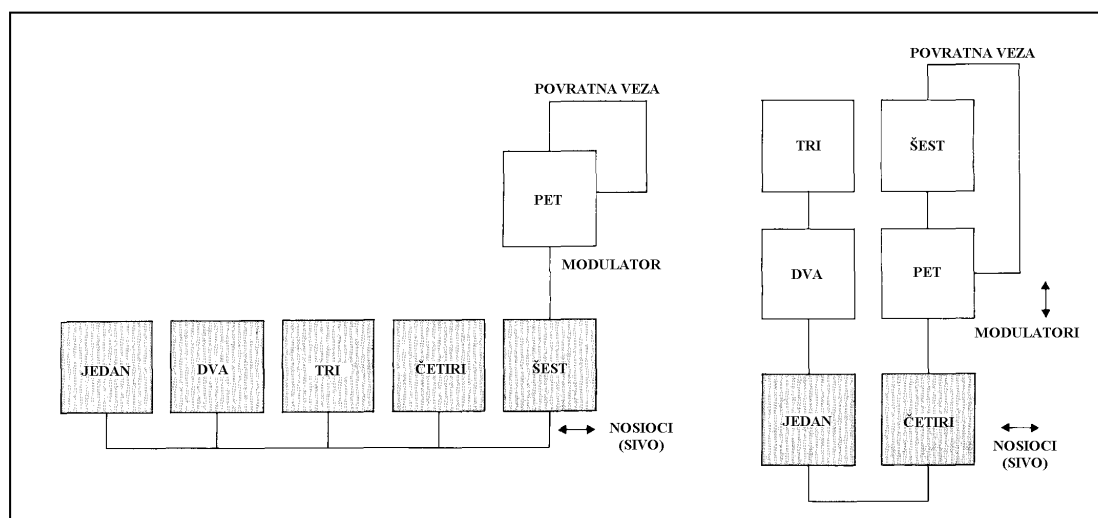
Slika 8.12 prikazuje jednostavnu konfiguraciju od dva operatora, gdje operator 2 proslijeđuje svoj kontinuirano promjenjiv sinusni izlaz u modulacijski ulaz operatora 1. U ovom slučaju, koji je potpuno analogan prijašnjim razmatranjima s oscilatorima, jedan operator postavljen je povrh drugog, tj. moduliramo operator 1 operatorom 2. Ovo je još poznato kao serijsko povezivanje operatora. Kada bi jednostavno koristili oba operatora jedan do drugog kao nosioce (slika 8.13), tj. miješali zajedno njihova dva sinusna valna oblika, imali bi ono što je poznato kao paralelno povezivanje. Ovaj posljednji oblik identičan je sistemu korištenom u osnovnoj aditivnoj sintezi gdje zbrajamo zajedno sinusne valove različitih amplituda i frekvencija.



Slika 8.13: Dva paralelno vezana operatora

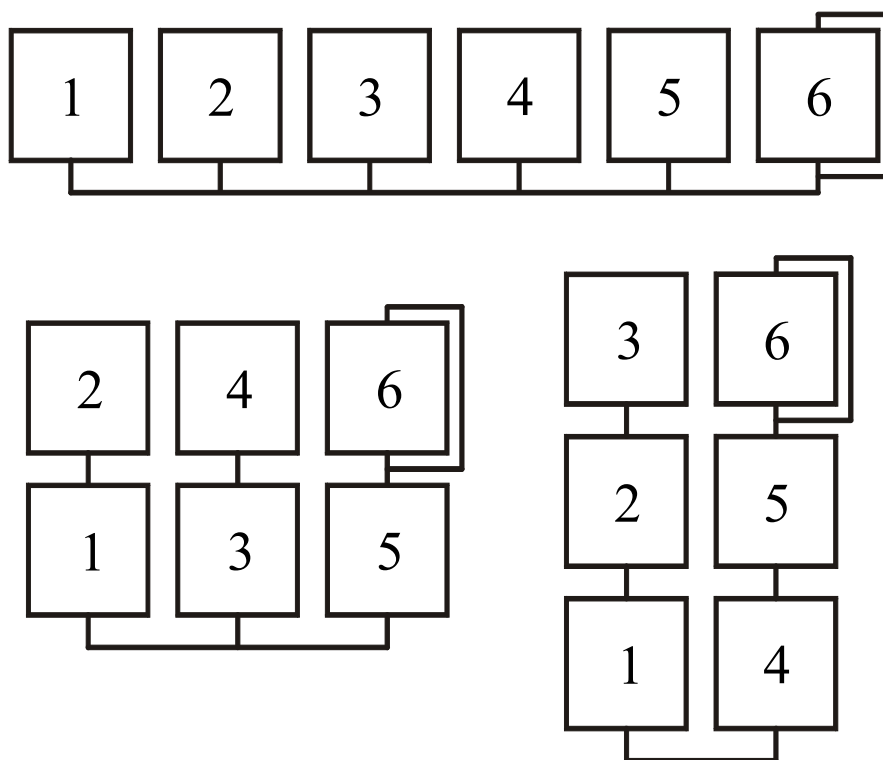
8.3.11 Algoritam

Zasad smo razmotrili samo sistem sa dva operatora, ali instrumenti poput Yamahe DX-7 i TX-7 expanderu imaju šest operatora za svaki glasovni modul. Stoga postoji mnogo različitih načina na koje ovi operatori mogu biti međusobno povezani. Slika 8.14 pokazuje dva primjera 6-operatorskog algoritma.



Slika 8.14: Dva primjera algoritama

Jedan glas sastoji se od 6 operatora, što znači da u jednom glasu možemo imati paralelnu kombinaciju s tri prije navedena para modulator-nosilac. Isto tako ostvariva je kombinacija s dva paralelna stupnja modulator-modulator-nosilac, kao i jednostavna paralelna suma svih 6 operatora, kao što je prikazano na slici 8.15.



Slika 8.15: Algoritmi 32,5 i 3 Yamahe DX7

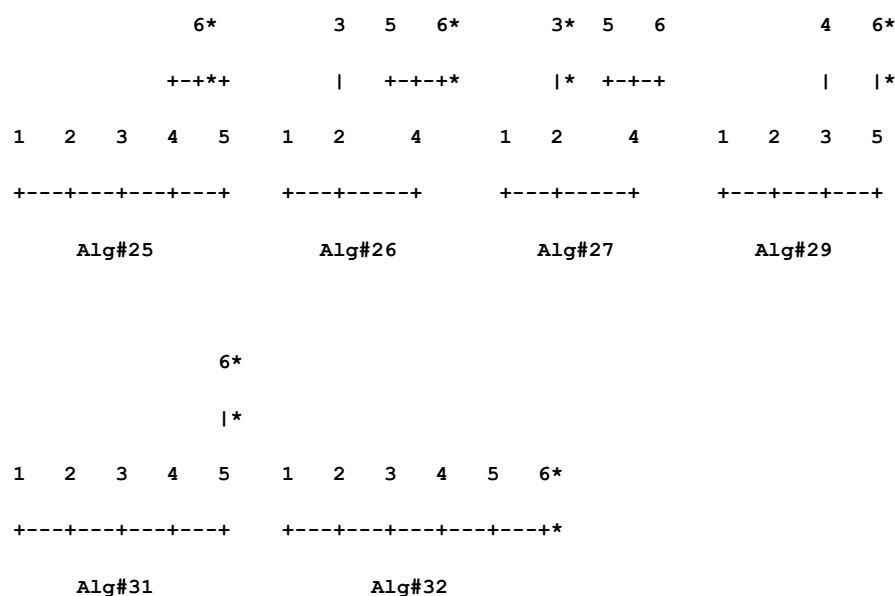
U nekim slučajevima signali modulatora prosljeđeni su u dva ili više nosilaca, ili jedan nosilac prima informaciju iz dva ili više modulatora. Slika 8.16 prikazuje svih 32 algoritma Yamahe DX-7. Zvezdice označavaju početak i kraj povratne veze.

6*	6	6																	
*																			
5	5		5	3	6*	3	6*		6*		6		6						
					*				*										
2	4	2*	4	2	3*	4	2	5	2	5	2	4	5	2	4*	5	2*	4	5
		*		+	---	+	---						+	---	+		+	---	+
1	3	1	3		1		1	4	1	4	1	3		1	3		1	3	
+	---	+	---		+		+	---	+	---	+	---	+	+	---	+	+	---	+
Alg#1	Alg#2		Alg#18	Alg#3	Alg#4		Alg#7		Alg#8		Alg#9								

3*	3		5	6*	5	6		4	6*	4	6	3					
*			+	---	+	+	---		*								
2	5	6	2	5	6*	2	4	2*	4	2	3	5	2*	3	5	2	6*
	+	---		+	---			*		+	---	+	+	---	+		+
1	4		1	4		1	3	1	3		1		1		1	4	5
+	---	+	+	---	+	+	---	+	---	+	+		+		+	+	---
Alg#10	Alg#11		Alg#14	Alg#15		Alg#16		Alg#17		Alg#19							

5*		5*																
*		*																
2	4		4		2	4	6*	2	4	6*	2*	4	5	6	2	4	5	6*
							*				*	+	---	+		+	---	
1	3	6	1	2	3	6	1	3	5	1	3	5	1	3		1	3	
+	---	+	+	---	+	+	---	+	---	+	+	---	+	---	+	+	---	+
Alg#28	Alg#30		Alg#5	Alg#6		Alg#12		Alg#13										

3*	5	6	3*	6	2	6*		3	6*		6*								
+	---	+	+	---		+	---	+	---		+	---	+	---	+	+	---		
1	2	4	1	2	4	5	1	3	4	5	1	2	4	5	1	2	3	4	5
+	---	+	+	---	+	---	+	---	+	---	+	---	+	---	+	+	---	+	
Alg#20	Alg#21		Alg#22	Alg#23		Alg#24													



Slika 8.16: Algoritmi Yamahe DX7

8.3.12 Povratna veza unutar algoritama (*feedback*)

Gotovo svaki algoritam FM sinteze sadrži jedan operator s petljom, tzv. element povratne veze, a radi se o tome da se signal na njegovom izlazu kopira i prosljeđuje natrag na njegov modulacijski ulaz, tako da sam sebe modulira. Ovo rezultira povećanjem harmoničkog sadržaja izlaza iz operatora. Postoji kontrolna pogodnost koja omogućava određivanje količinu povratne veze u petlji. U određenim prilikama ovo može biti odvedeno do stupnja da se operator ponaša kao izvor bijelog šuma, proizvodeći signale slučajnih visina tona unutar čitavog audio-spektra; stoga je povratna veza korisno oruđe za specijalne efekte. Element povratne veze može biti postavljen na nulu i tada se operator ponaša kao i svaki drugi. Također postoje i algoritmi s tzv. "dugom" povratnom vezom koja povezuje izlaz jednog oscilatora i ulaz onog iznad njega ili onog dva mjesta iznad njega.

8.3.13 Korištenje sinteze frekvencijskom modulacijom u praksi

Kada se stvara zvuk na FM sintetizatoru, potrebno je izabrati pogodni algoritam koji je prikladan za postizanje željenog zvuka. Prvo treba razmisliti da li raditi "horizontalno" ili "vertikalno". Pri tom treba znati da što više nosioca postoji na dnu algoritma, veće su mogućnosti slojevitosti zvuka - to stoji nasuprot činjenici da je algoritam "nižeg nivoa", tj. što se manje modulacijskih nivoa zapošljava, nosioci su manje bogati harmonicima. Za zvuk cijevnih orgulja na primjer, potrebno je proizvesti nekoliko paralelnih tonova poput flaute, da bi se oponašao skup cijevi koje zajednički proizvode jedan ton u stvarnosti. Cijevne orgulje vrlo malo vremenski mijenjaju svoj spektralni sadržaj, stoga ovdje ima smisla paralelno povezani algoritam. Suprotnost ovom zvuku je zvuk tipa saksofona: on zahtijeva ekstremno bogat spektralno promjenjiv formant, i u ovom slučaju ima smisla koristiti serijski-povezan algoritam.

Instrument kao što je Yamaha DX-7 ima 6 operatora po noti (glasovnom modulu) i 16-glasovnu polifoniju, tako da se u njemu zapravo nalaze 96 generatora sinusnog valnog

oblika - i to sve u nekoliko mikročipova. Za stvaranje analognog sinusnog oscilatora potrebno je određen broj diskretnih elektronskih komponenata, tako da stvaranje 96 takvih elektronskih naprava ne bi bilo praktično. Tako je, kao i kod aditivne sinteze, upotrebljena digitalna tehnika. Svi podaci o sinusnom signalu drže se u tablici valnog oblika. Sinusni valni oblici kreirani su imaginarno, u digitalnom formatu i tada manipulirani procesorom uz uvažavanje podataka o envelopama i modulacijama. Svaki nekoliko mikrosekundi vrši se kompletno nova kalkulacija koja rezultira prelaskom na sljedeći korak tablice valnog oblika. Ukoliko koraci nisu jako mali, primjetno je vrlo tiho zujanje kod sviranja niskih nota na FM sintetizatoru; to se događa zahvaljujući aproksimaciji u koracima konačnog valnog oblika.

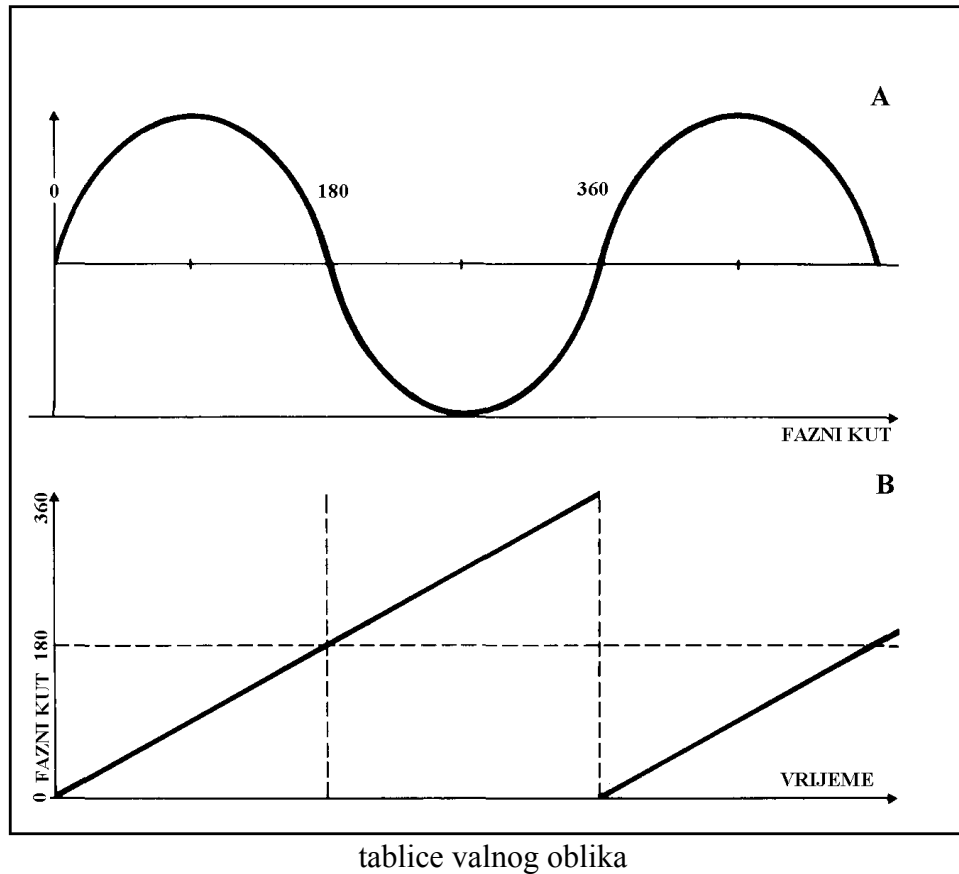
8.4 Sinteza fazne distorzije

Sintezu fazne distorzije ili faznog izobličenja patentirala je korporacija Casio osamdesetih godina. Primjenjuje je u svoja dva instrumenta: CZ-101 i CZ-1000. Stvarna upotreba ove vrste sinteze je relativno jednostavna, puno jednostavnija od prije spomenute FM sinteze - zajedničko im je to što su obale realizirane digitalnom tehnikom. Fazna distorzija (PD) temelji se na nelinearnom redoslijedu čitanja tablica valnih oblika u kojima je memorirano osam osnovnih valnih oblika (sinusni, pulsni itd.) i to jedan period.

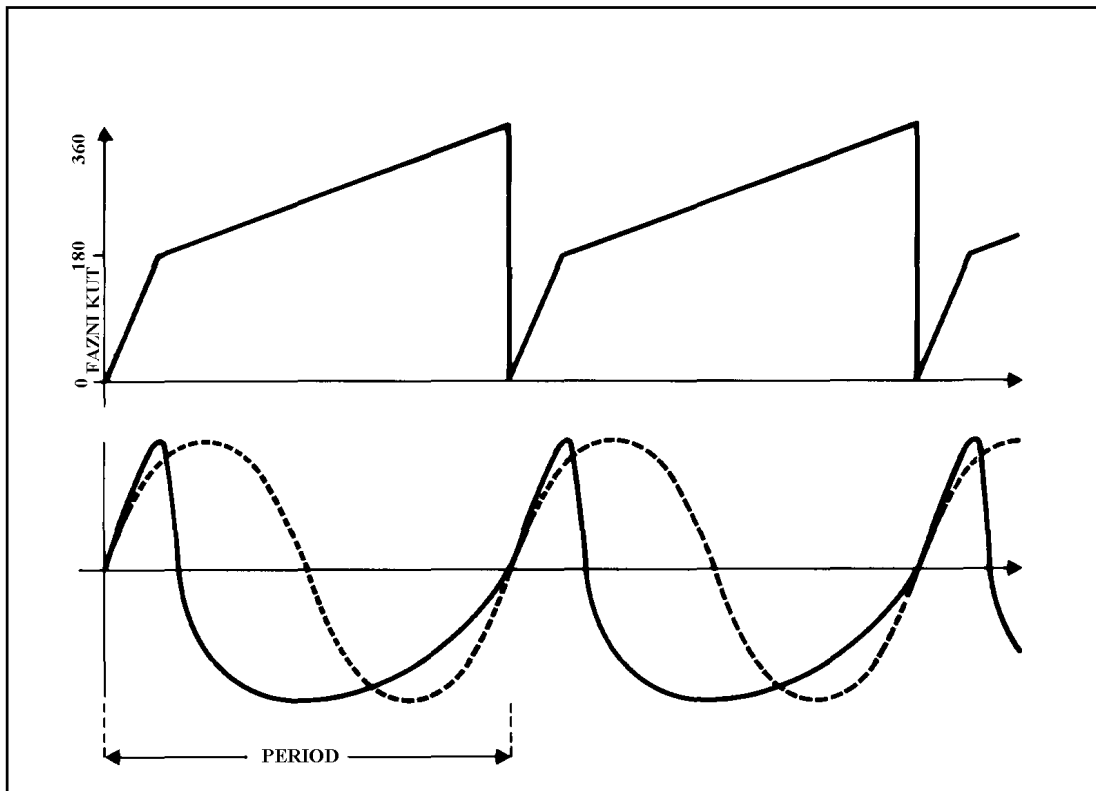
Princip promjene visine tona u sintetizatorima s tablicama valnih oblika već je prije objašnjen, a sastoji se u preskakanju nekih vrijednosti tablice (npr. preskakanje svake druge vrijednosti pri čitanju daje dva puta viši ton) ili računanjem međuvrijednosti interpolacijom za niše tonove. Normalno čitanje tablica bilo bi vremenski jednoliko: pokazivač na određeni redak tablice prolazio bi jednolikom brzinom preko svih redaka, tj. u istim vremenskim intervalima, iz više jednakih dijelova tablice pročitao bi isti broj podataka (jer su zbog principa promjene visine tona neki izbačeni). Fazno izobličenje zapravo znači da pokazivač preko svih dijelova tablice ne prolazi istom brzinom; on neke dijelove prelazi brže, a neke sporije i tako mijenja izgled izlaznog valnog oblika. Bitno je naglasiti da pritom ukupno vrijeme prelaska tablice, dakle period dobivenog valnog oblika, mora ostati isto kao kod normalnog čitanja tablice - tj. ako pokazivač na jednom dijelu tablice ubrza, na drugom treba usporiti, i to točno onoliko koliko mu treba da stigne do kraja tablice za isto vrijeme. To je uvjet da visina tona ostaje ista (uz promjenu spektralnog sadržaja).

Sljedeća slika prikazuje sinusni valni oblik (koji je jedan od osam osnovnih i umemoriran je u svojoj tablici valnog oblika), i njemu pripadnu promjenu faze čitanja iz tablice (promjenu mjesta pokazivača u tablici) pri normalnom čitanju.

Slika 8.17: Sinusni valni oblik i vremenska promjena faze kod normalnog čitanja



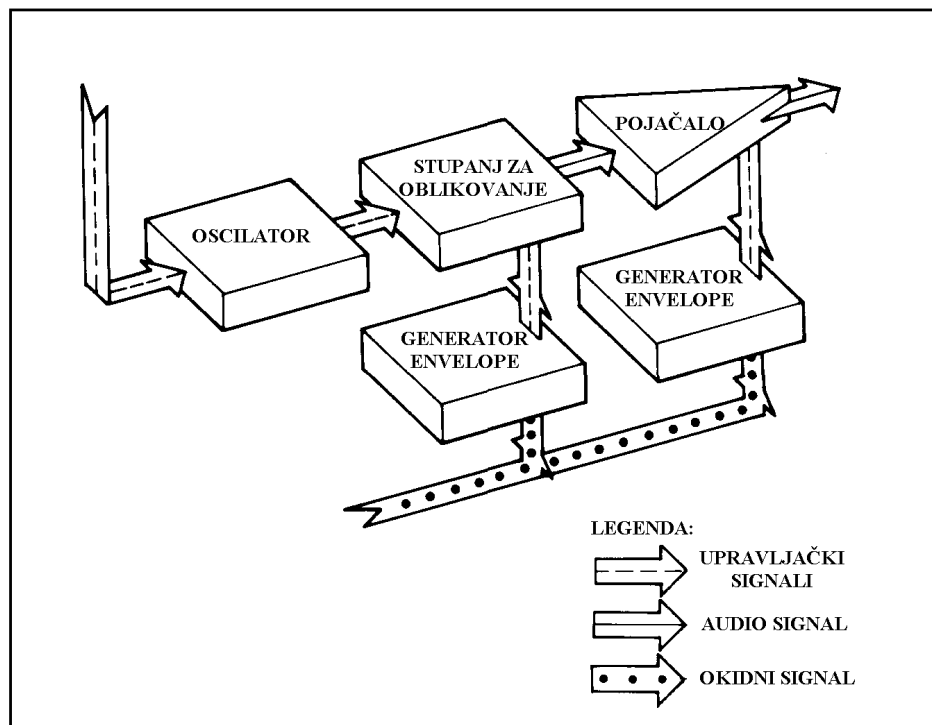
Ako sada unesemo nelinearnost pri čitanju tablice, tj. ako prvu polovicu tablice pročitamo nekoliko puta brže od druge, dobit ćemo sljedeći dijagram promjene faznog kuta, kao i dijagram novog valnog oblika na izlazu:



Slika 8.18: Nelinearna promjena faze sinusnog valnog oblika, dobivena nelinearnim čitanjem tablice valnog oblika i pripadno fazno izobličenje

Originalni, neizobličeni sinusni valni oblik prikazan je na slici crtkanom linijom.

8.4.1 Glasovni modul PD sinteze



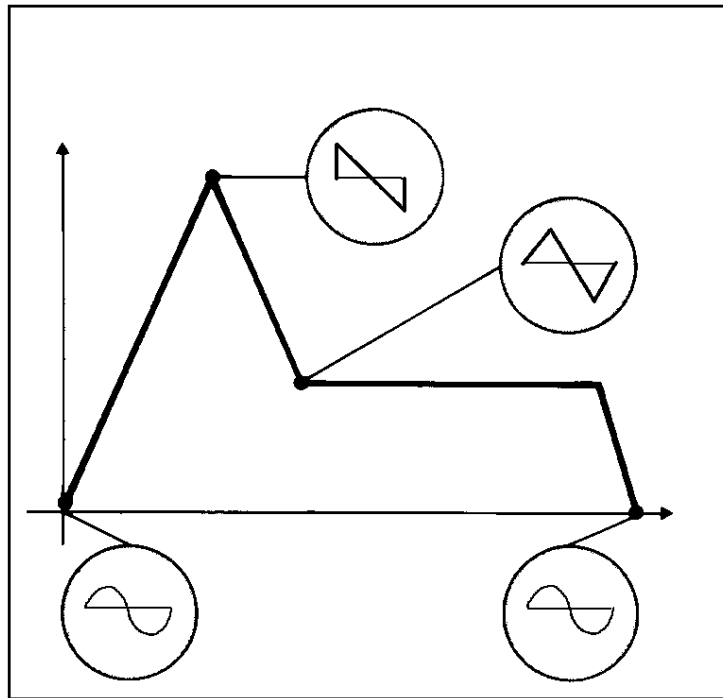
Slika 8.19: Blok dijagram generatora valnog oblika sintezom fazne distorzije

Blok dijagram tipičnog glasovnog modula sintetizatora sa faznom distorzijom prikazan je na slici 8.19. Vrlo podsjeća na glasovni modul klasične subtraktivne sinteze, međutim generiranje valnog oblika prethodno opisano vrlo je različito. Instrumenti Casio CZ serije imaju dvije identične linije oscilatora, distorzije i pojačala, od kojih svaki ima svoje vlastite generatore envelope. Visina tona svakog oscilatora može se učiniti malo razgođenom u odnosu prema drugom, da se dobiju titraji i tako poveća spektralna dubina zvuka. Slika glasovnog modula prikazane je na principu analognog modula - tako su oscilator (tj. generator osnovnog valnog oblika) i stupanj fazne distorzije odvojeni, iako prethodno objašnjena digitalna realizacija podrazumijeva ta dva stupnja čvrsto povezana u jedan.

8.4.2 Digitalno kontrolirana distorzija valnog oblika (DCW-*Digitally Controlled Wave*)

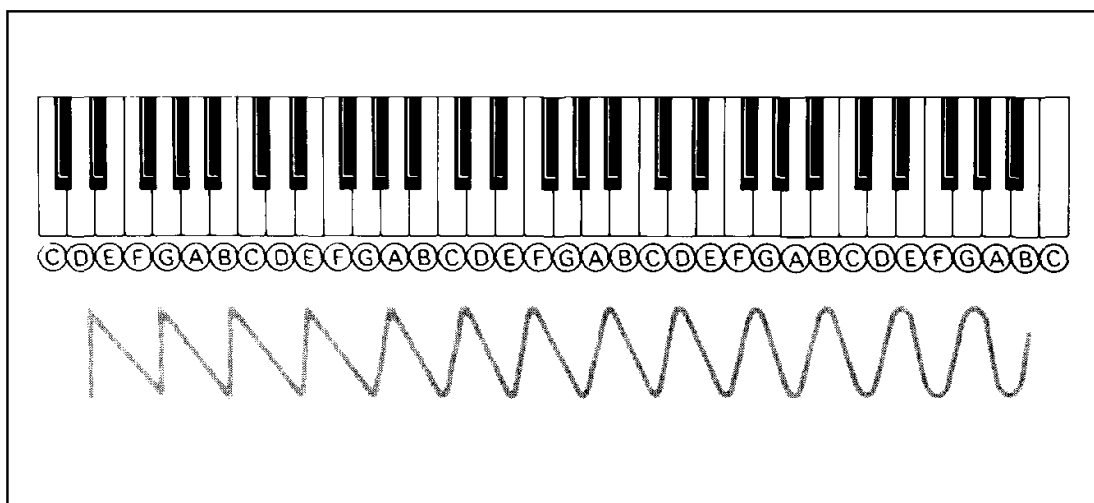
Ovaj stupanj ekvivalentan je filtru kod klasične subtraktivne sinteze, pošto kod sintetizatora s faznom distorzijom ne postoje filtri. DCW envelope koristi se da varira stupanj distorzije valnog oblika za vrijeme trajanja cijelog tona (a ne perioda, poput prethodnih krivulja): na taj način možemo konstruirati zvuk koji ima vremenski vrlo promjenjiv harmonički spektar i to zahvaljujući **generiranju** vremenski različitih valnih oblika. Zbog toga u načelu filtri nisu potrebni, jer je njihova svrha vrlo slična. Kao što je prikazano na slici 8.20, harmonički sadržaj može se vremenski učiniti bogatijim ili siromašnijim, i to rastom i padom envelope. Kada je primjenjena modulacija envelopom, na izlazu stupnja za distorziju dobivamo originalni sinusni val

za nulte vrijednosti envelope, i distorzirani val za maksimalne vrijednosti envelope. DCW envelope zapravo manipulira vrijednostima brzine rasta krivulje faznog kuta (slika 8.18), tj. koordinatama njenih prijelomnih točaka.



Slika 8.20: Digitalno kontrolirana fazna distorzija valnog oblika DCW envelopom

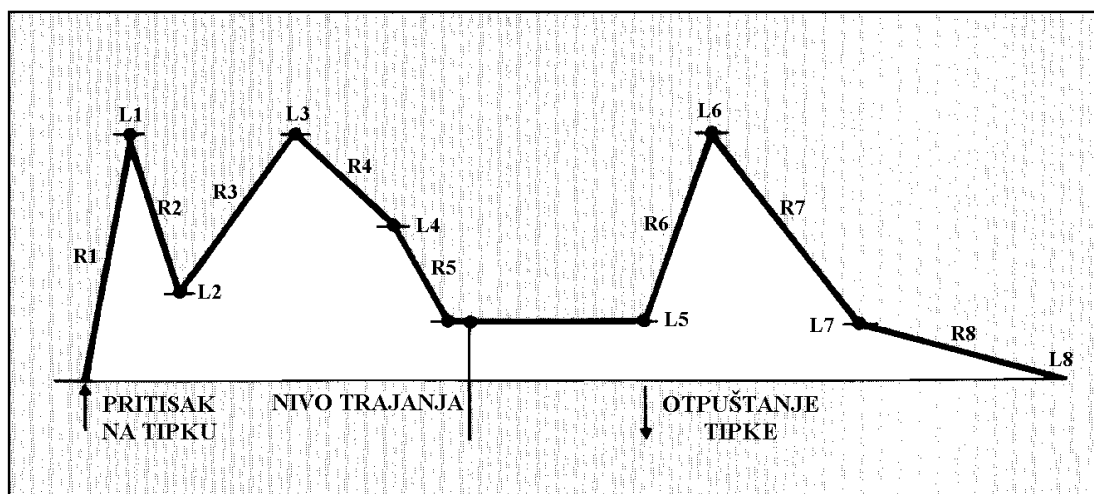
Osim envelope, na oblik izlaznog valnog oblika omogućeno nam je utjecati i pozicijom tona na klavijaturi (tzv. *Key Follow*). Tako npr. možemo realizirati da kod nižih tonova imamo pilasti valni oblik, a što su tonovi viši, on postaje sličniji sinusnom. Slika 8.21 pokazuje navedenu ovisnost.



Slika 8.21: Primjena utjecaja pozicije tipke na klavijaturi na jačinu fazne distorzije

8.4.3 Generatori envelope kod PD sintetizatora

Tradicionalna ADSR envelope koja je korištena u ranijim generacijama sintetizatora nije dovoljno fleksibilna za sintezu fazne distorzije. Envelope koja se koristi u PD sintetizatorima mora imati više stupnjeva, jer je zapravo zanimljivost njihovog zvuka u stalnoj promjeni harmoničkog sadržaja. Zbog toga se koristi takozvana RLEG envelope, koja ima do 8 prijelomnih točaka - sa svojim koordinatama: 8 vremenskih i 8 amplitudnih. Također, može se po volji izabrati mjesto za SUSTAIN (tj. na kojem od osam mjesta će se zadržati amplituda signala ako tipku držimo pritisnutu duže vremena), kao i za END (kraj krivulje) ukoliko ne želimo iskoristiti svih 8 stupnjeva. Slika 8.22 pokazuje jednu takvu kompleksnu envelope koju je moguće kreirati ovim sistemom. Postoje tri takve envelope po glasovnom modulu - jedna za oscilator (visina tona) DCO, druga za distorziju (DCW), a treća za pojačanje (DCA).



Slika 8.22: Uobičajena višestupanjaska *Rate-Level* envelope koja se koristi u sintetizatorima PD sinteze

8.5 Sinteza reprodukcijom uzorkovanog zvuka (PCM, AWM,AWM2,AI)

Sinteza reprodukcijom *sampleova* ili *Sample Playback* vrsta je subtraktivne sinteze. Različiti proizvođači prozvali su je različitim imenima: PCM (Pulse Code Modulation), AWM (Advanced Wave Memory), AWM2 (Advanced Wave Memory 2), AI (advanced Integrated) geometrijska sinteza itd. Svi se ovi termini najčešće odnose istu stvar: audio instrument ili električki/ elektronički instrument sampliran je (digitaliziran) i kao takav pohranjen u RAM ili ROM. Ako je naprave sposobna spremi rezultat u RAM ili na disk, naziva se sampler. Ako je sposobna samo reproducirati sampleove (iz RAM-a, ROM-a ili diska) različitim visinama, naziva se playback sintetizatorom. Većina samplera i drugih sintetizatora na načelu samplera koristi subtraktivnu sintezu (posjeduje dinamičke filtre), iako postoje neki sampleri koji nude vrlo ograničeno procesiranje (bez dinamičkih filtara) i oni se zbog toga ne smatraju sintetizatorima.

Termin PCM-a odnosi se na tehniku kodiranja koja se koristi u gotovo svim digitalnim instrumentima; termini AWM i AWM2 su termini korporacije Yamaha za 16-bitnu reprodukciju sampleova bez i sa filtrima.

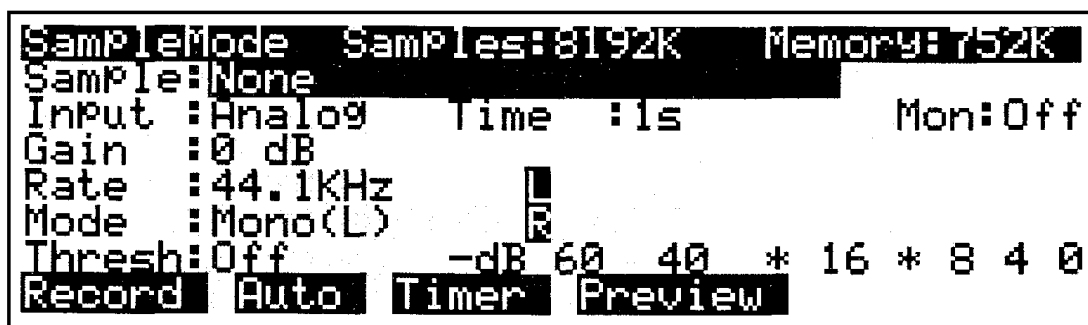
Reprodukcija sampleova je ono što je omogućilo sintetizatorima da zvuče realistično - da vjerno oponašaju realne instrumente. Ali postoji i mana ove metode: ona nudi manje opcija za ekspresivno sviranje nego gotovo bilo koja druga tehnika, jer nema toliko parametara na koje se može utjecati (kao FM, PD sinteza). Isto tako, sampleovi koji imaju svojstven karakter ili se lako prepoznaju kao akustični instrument, zadržavaju svoj karakter i nakon procesiranja jer filtri i druge opcije procesiranja jako malo mijenjaju boju tona samplea.

8.5.1 Uzorkovanje (*Sampling*)

Uzorkovanje se kod raznih vrsta sintetizatora vrši različitim frekvencijama uzorkovanja i različitom kvantizacijom. Kvantizacija kod starijih sintetizatora najčešće je 8-bitna, a kod novijih 16-bitna. Uobičajene frekvencije uzorkovanja su 29.4 kHz, 32 kHz, 44.1 kHz i 48 kHz.

Gotovo sve vrste samplera sposobne su, osim mono signala, uzorkovati i stereo analogni signal. Također, bolji sampleri imaju mogućnost sampliranja mono/stereo digitalnog signala iz nekog digitalnog izvora (CD, DAT); za prijenos digitalnih podataka potrebna je upotreba koaksijalnih, ili optičkih kablova.

Svaki sampler posjeduje prikaz glasnoće ulaznog signala u obliku digitalnih VU-metara. Analogni pokazivači su pretromi da signaliziraju tzv. *clipping*, kratkotrajne prelaske amplitude u područje koje za koje nema raspoloživih kodova. To je ujedno i osnovni problem kod sampliranja analognog signala: prelazak amplitude iznad 0 dB uzrokuje drastična izobličenja. VU-metri su prikazani na ekranu samplera i kalibrirani u -dB jedinicama (slika 8.23): nivo od 0 dB označava maksimalnu amplitudu signala koja neće dovesti do clippinga.



Slika 8.23: Uobičajen prikaz na ekranu *samplera* prilikom *sampliranja*

Takvog problema pri "uzorkovanju" digitalnog signala nema, pošto je on već uzorkovan na svom mediju (CD). Ovdje problem leži u konverziji različitih frekvencija uzorkovanja i kvantizacija; konverzija se vrši prekodiranjem pomoću interpolacija.

8.5.2 Frekvencija uzorkovanja

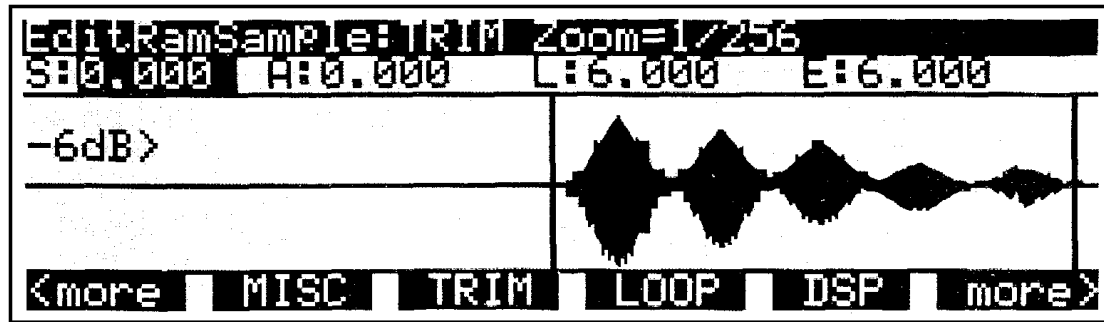
Kao što je poznato iz Shannonovog teorema, najviša frekvencija spektra uzorkovanog signala mora biti dvostruko manja od frekvencije uzorkovanja. To znači da kod niskih frekvencija uzorkovanja gubimo spektralni sadržaj viših harmonika. Ipak, pošto veći broj zvukova nema spektralne komponente iznad 15 kHz, za njihovo uzorkovanje možemo koristiti frekvenciju uzorkovanja od 32 kHz, bez gubitka kvalitete (npr. akustični i električni bas). Nasuprot tome, zvukove sa jako izraženim višim harmonicima (cimbal), potrebno je uzorkovati višom frekvencijom.

Drugi razlog odabiranja određene frekvencije uzorkovanja ovisi o najvećoj transpoziciji koju pojedini sampler može izvesti tokom reprodukcije. Sampleri mijenjaju visinu tona tako da mijenjaju brzinu čitanja tablice valnih oblika: što je veća frekvencija reproduciranja, viši je reproducirani ton. Zapravo, kao što je prije objašnjeno, to se postiže preskakanjem nekih redaka u tablici valnih oblika za više tonove, a interpolacijama za niže. Rijetki su sampleri koji imaju zasebne D/A konvertere za svaki glas i promjenjive takt frekvencije (frekvencije reprodukcije) za svakoga od njih (Emulator III - 16 glasa, 16 D/A konvertera). Takvo rješenje je najbolje i zvukovi su po mnogima najrealniji, što je objašnjivo nekorisćenjem kompliciranih algoritama interpolacije u realnom vremenu, koji nikad ne daju tako dobre rezultate.

No, klasičan način preskakanja nekih pozicija u tablici valnih oblika ima, kako je već spomenuto, kao posljedicu maksimalnu virtualnu frekvenciju reprodukcije. To znači da kod samplera koji ima maksimalnu frekvenciju reprodukcije 96 kHz, zvuk uzorkovan sa 48 kHz možemo transponirati samo jednu oktavu prema višim tonovima (dva puta veća frekvencija reprodukcije daje za oktavu viši ton), dok zvuk uzorkovan sa 29.4 kHz možemo transponirati približno za 21 poluton. Ne postoji nikakva granica transpozicije prema nižim tonovima.

8.5.3 Prikaz uzorkovanog zvuka

Uzorkovani zvuk kod novijih samplera prikazan je na ekranu: horizontalna os je vremenska, a vertikalna amplitudna. Tim digitaliziranim prikazom zvuka možemo se kretati naprijed i nazad, povećavati i smanjivati skale na vremenskoj (Zoom) i amplitudnoj osi (Gain). Povećanjem skale amplitudne osi imamo bolji pregled dijelova signala koji su vrlo tihi, a povećanjem skale na vremenskoj osi bolje vidimo signale viših frekvencija (koji imaju više nultočaka). To je važno kod postavljanja petlje (loop): moramo biti sigurni da je prijelaz s kraja samplea na povratnu točku gladak. Tipičan prikaz na ekranu samplea prikazan je na slici 8.24.

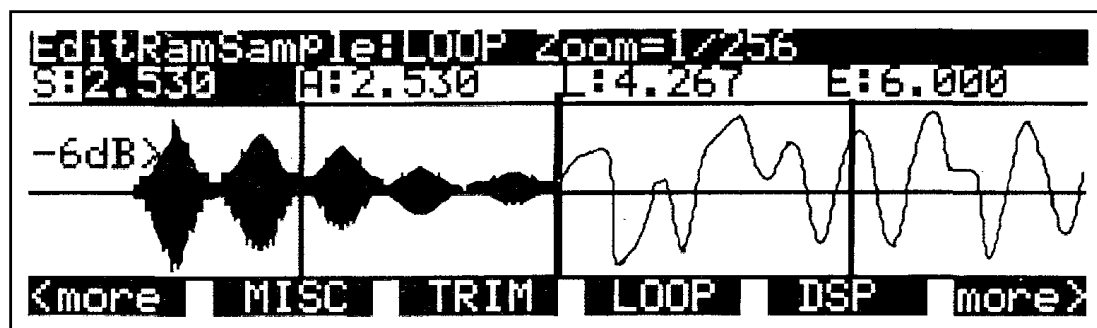
Slika 8.24: Prikaz uzorkovanog zvuka na ekranu *samplera*

Svaki sample ima tri ili četiri osnovna parametra koji se pamte zajedno s njim (svi mogu biti izraženi u vremenskim ili memorijskim jedinicama):

- **Start** - početak samplea
- **End** - kraj samplea
- **Loop** - povratno mjesto na koje se pokazivač vraća s kraja samplea, naravno - ako želimo lupiranje
- **Alt** - alternativno mjesto povratka pokazivača, koje možemo aktivirati nekim kontrolerom tokom sviranja, u svrhu promjene zvuka

Iznad prikaza samplea na prethodnoj slici nalaze se i ova četiri karakteristična parametra (kod prikazanog samplea, parametri End i Loop postavljeni su na istu vrijednost, tako da se u petlji ništa ne ponavlja).

Kod stavljanja određenog dijela samplea u petlju (looping) javlja se problem neprimjetnog prijelaza. Mnogi sintetizatori omogućavaju vizualno bolju preglednost spajanja kraja samplea (End) sa točkom povratka (Loop) generiranjem njihove zajedničke slike i povećanjem rezolucije spojnog mjesta. Tipičan prikaz ekrana kod ove opcije prikazan je na slici 8.25 (Kurzweil K-2000): treća četvrtina ekrana prikazuje dio samplea lijevo od kraja, a četvrta četvrtina dio desno od točke loopiranja.

Slika 8.25: Tipičan prikaz opcije *lupiranja* na ekranu *samplera*

8.5.4 Uređivanje uzorkovanog zvuka DSP funkcijama

Sampleri najčešće sadrže vlastite DSP (*Digital Sound Processing*) funkcije, pomoću kojih uređujemo (*editiramo*) sampleove. Ni jedna od njih ne odvija se u realnom vremenu. Interval na koji će funkcija djelovati obilježavamo početnom i završnom točkom (okomite linije Start i End). Ovo su neke od najčešćih DSP funkcija:

- **Normalize:** funkcija maksimalno povećava amplitudu samplea - množeći svaki uzorak sa istim skalnim faktorom, i to tako da vrijednost nijednog uzorka ne prelazi u clipping
- **Clear:** funkcija briše interval, a na njegovom mjestu ostavlja tišinu Delete: brisanje intervala, ali njegovim izbacivanjem i spajanjem lijevog i desnog ostatka samplea
- **Volume Adjust:** pojačava ili smanjuje glasnoću intervala
- **Reverse:** funkcija vremenskog okretanja samplea
- **Invert:** invertiranje samplea oko vremenske osi
- **Mix:** miješanje dva samplea
- **Insert:** ubacivanje jednog samplea u drugi
- **Pitch Shift:** funkcija vremenskog rastezanja bez promjene visine tona
- **Time Warp:** funkcija promjene visine tona bez promjene trajanja samplea

Ovo su osnovne, a postoji i čitav niz drugih, poput dodavanja efekata (isto tako ne u realnom vremenu). Većina samplera raspolaže i mogućnošću prebacivanja sampliranog materijala u računalo (preko MIDI ili SCSI kontrolera), njegovog uređivanja puno jačim i elegantnijim DSP programima (Sample Editing programi) i vraćanja uređenog samplea nazad u sintetizator.

8.5.5 Memorija

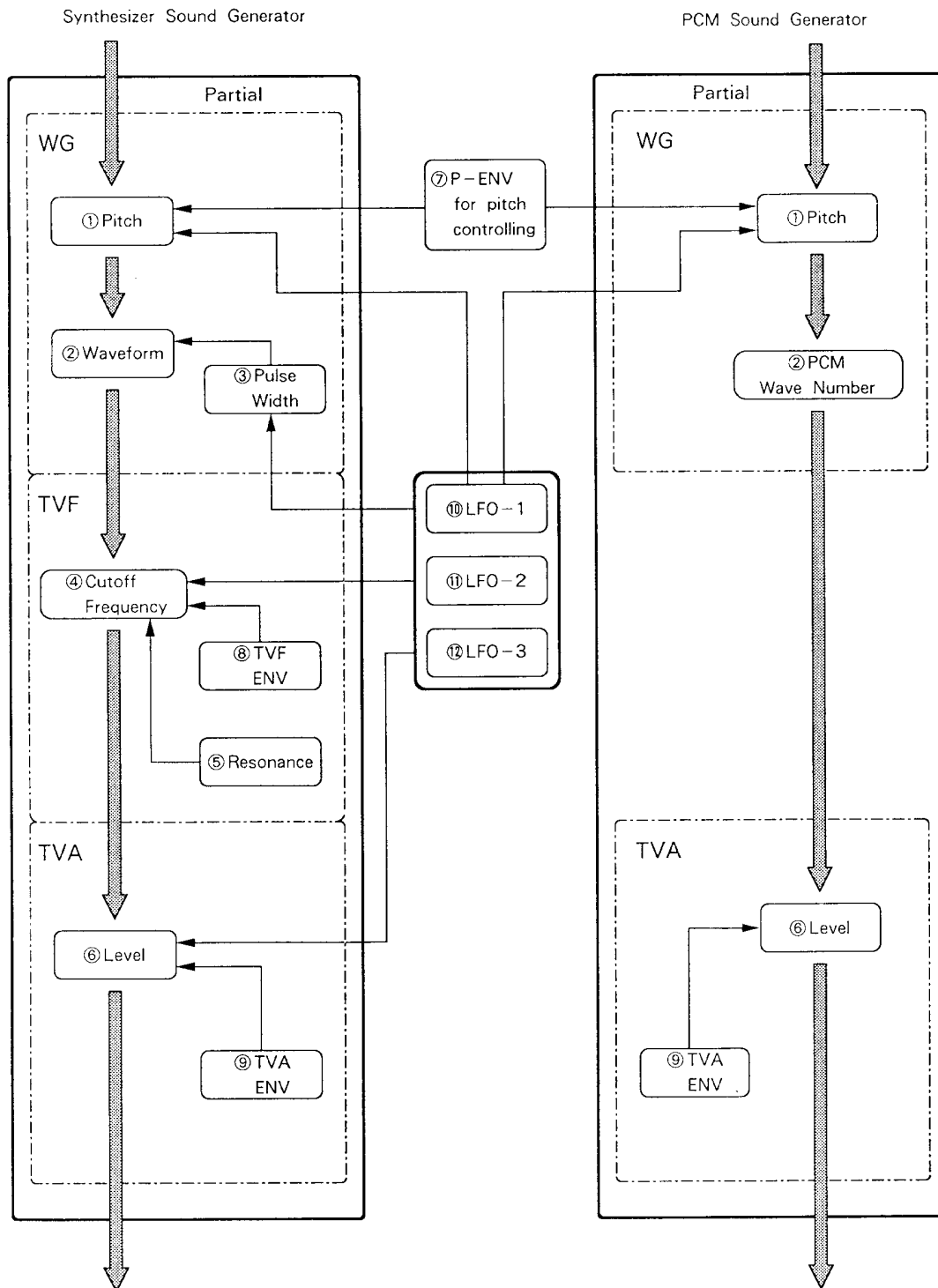
Kapacitet RAM memorije je za samplere jedan od najznačajnijih pojmova. Radi se o megabajtima memorije (4, 8, 16, 64 MB), pošto jedna sekunda stereo samplea frekvencije uzorkovanja 44.1 kHz sa 16 bitnom kvantizacijom (CD kvalitete) zauzima 176.4 kBytea. Sampleovi se trajno pohranjuju na medije velikog kapaciteta kao što su floppy disk, hard disk, CD-ROM i ZIP-drive.

8.6 Linearno Aritmetička Sinteza

LA sintezu počela je primjenjivati korporacija Roland na svojim sintetizatorima osamdesetih godina. Bazira se na opažanju da je početni tranzijent zvuka (attack) najvažniji dio tona za ljudsku percepciju dotičnog instrumenta. Tako LA sintetizatori koriste kombinaciju sampliranih tranzijenata i jednostavnih klasičnih digitalnih oscilatora sa samo pilastim i pulsним valnim oblikom za generiranje ostatka tona.

Tako se npr. za zvuk trube i violine koristi isti pilasti valni oblik, različito filtriran, sa različitim tranzijentima, a violini je dodan još vibrato. Činjenica da se samplirani zvuk i zvuk oscilatora zbrajaju ili množe (svaki posjeduje svoju amplitudnu envelope) razlog je naziva linearno aritmetička sinteza. Osnovni razlog njenog postojanja je štednja memorije, jer na ovaj način moramo memorirati samo tranzijente.

Kao karakterističnog predstavnika ove vrste sinteze istaknut ću Roland D-50, koji je po mnogima jedan od najboljih i najkorištenijih sintetizatora osamdesetih. Kod njega jedan patch (kod D-50 nazvan Tone) čine dva glasa. Oba mogu biti generirani PCM generatorom (tranzijenti) ili oscilatorom. PCM signalu nakon toga slijedi samo stupanj pojačanja, a sintetiziranom signalu slijede i stupanj filtra (koji je parametrički, tj. promjenjiva je i rezonancija na graničnoj frekvenciji frekvenciji) i stupanj pojačanja.



Slika 8.26: Dijagram toka signala iz priručnika LA sintetizatora Roland D-50

Nakon što su oba glasa generirana, oni se ili sumiraju, ili množe balansnim modulatorom (Ring Modulator). Balansni modulator (za razliku od modulatora amplitude čiji je modulacijski signal uvijek pozitivan) množi dva zvučna signala promjenjivih polariteta: na taj se način dobivaju neuobičajeni i metalni zvukovi koji s kompliciranim spektrom. Rezultat balansne modulacije dva zvuka izgleda kao na slici 7.25.

Na slici 8.26 prikazan je *patch* koji se sastoji od PCM i sintetiziranog glasa, no to nije jedina mogućnost: *patch* se može sastojati i od dva PCM glasa ili dva sintetizirana. Roland D-50 nudi njihove različite kombinacije s balansnim modulatorom: sljedeća tablica prikazuje raspoložive mogućnosti:

Legenda:

S - generator sintetiziranog glasa

P - generator uzorkovanog (PCM) glasa

R - balansni modulator (Ring Modulator)

Oznaka strukture	Glas 1	Glas 2	Kombinacija glasova
1	S	S	Sumiranje glasa 1 i glasa 2
2	S	S	Sumiranje glasa 1 i balansne modulacije
3	P	S	Sumiranje glasa 1 i glasa 2
4	P	S	Sumiranje glasa 1 i balansne modulacije
5	S	P	Sumiranje glasa 1 i balansne modulacije
6	P	P	Sumiranje glasa 1 i glasa 2
7	P	P	Sumiranje glasa 1 i balansne modulacije

Kod struktura sa balansnim modulatorom, rezultat modulacije uvijek se sumira sa jednim od izvornih glasova, kako bi konačni ton imao definiranu visinu (rezultat balansne modulacije nema harmonijski spektar).

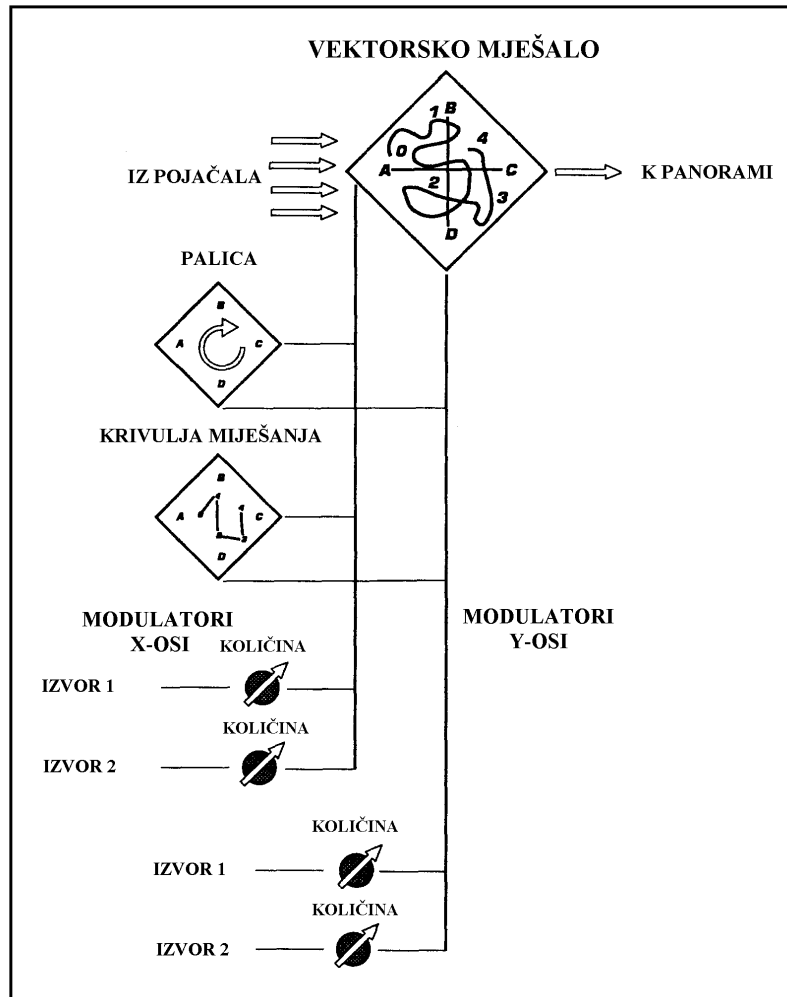
Program se kod Rolanda D-50 sastoji od jednog ili dva patcha. U prvom slučaju sintetizator je 16-polifon, a u drugom 8-polifon; nije multitimbralan. U svakom programu pamte se parametri za dva patcha, pa se za razliku od nekih drugih sintetizatora, jedan patch ne koristi u više programa: ako mijenjamo parametre jednog programa, to ne utječe na drugi.

8.7 Vektorska sinteza

Prvi sintetizator na kojem je upotrijebljena vektorska sinteza je Sequential Circuits Prophet VS: pomoću palice (Joystick) mogu se miješati valni oblici četiri oscilatora u realnom vremenu, kao i pomoću envelope X-Y koordinatnog sustava. Ostali vektorski sintetizatori su: Korg Wavestation EX, A/D i SR kao i Yamaha SY22, TG33 i SY35. Yamaha može miješati do dva FM i dva sample elementa, dok Korg omogućava miješanje četiri samplea ili sekvenci sampleova.

Dijagram koji slijedi svojstven je za sve sintetizatore sa vektorskom sintezom. Četiri glasa (A,B,C,D) miješaju se pomoću X-Y koordinatnog sustava na sljedeći način: palica se može micati u X i Y smjeru koordinatnog sustava; Krajnji lijevi položaj po X koordinati palice daje maksimalnu amplitudu glasa A, a krajnji desni glasa C. Položaji između daju miješanje ta dva signala u određenom omjeru. Isto vrijedi i za Y koordinatu, samo što se ovdje radi o glasovima B i D. Micanjem palice mijenjamo i X

i Y koordinatu, i tako istovremeno mijenjamo prisutnost sva četiri glasa. Pokreti palice mogu biti zapamćeni preko MIDI-ja (horizontalni i vertikalni pomak palice generiraju svoje MIDI kodove) i na taj način možemo stvoriti vrlo kompliciranu krivulju u koordinatnom sustavu (kao ona nacrtana na vrhu dijagrama).



Slika 8.27: Vektorsko mješalo i upravljački signali

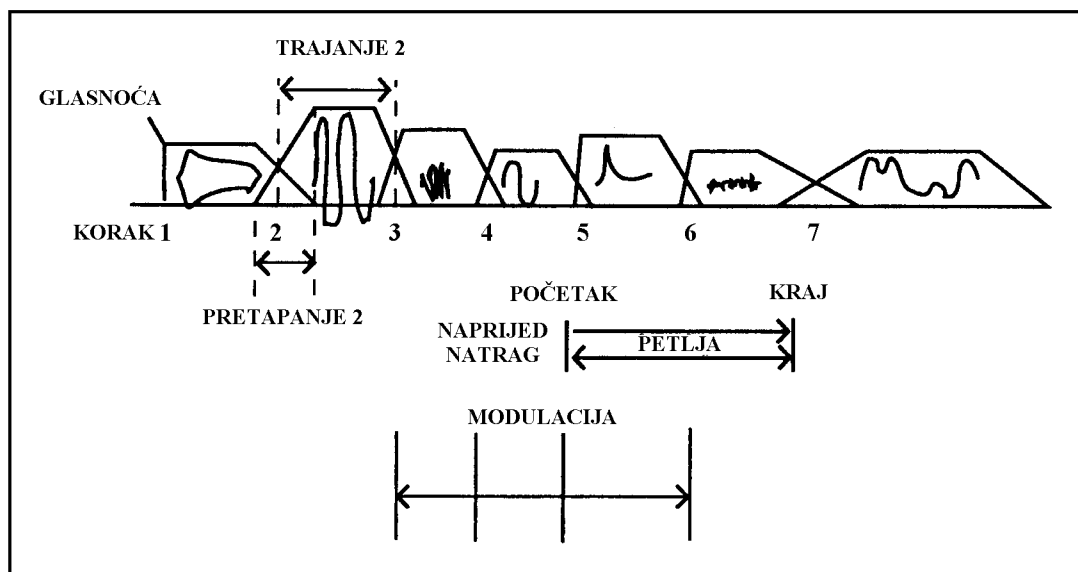
Postoji i drugi način promjene trenutne pozicije u koordinatnom sustavu: pomoću krivulje u memoriji sintetizatora. Ona se zbog malog kapaciteta memorije sastoji od nekoliko pravaca i naziva se envelope miješanja (Mix Envelope). Također je prikazana u dijagramu kao jedna od mogućnosti promjene koordinata. Joystickom se prije sviranja zvuka postave prijelomne točke ove krivulje u određene točke koordinatnog sustava (npr. točke 0,1,2,3,4), a zatim se definira i vrijeme koje je potrebno da se dođe od točke do točke (vrijeme 0-1, 1-2, 2-3 i 3-4). Nakon toga definira se i način kretanja duž krivulje: kad se dođe do četvrte točke, može se vraćati natrag obrnutim redoslijedom (4-3-2-1-0), ili se odmah vratiti na nultu točku pa krenuti ispočetka. Postoje i druge mogućnosti kretanja. Kad je pritisnuta tipka, trenutna koordinata koja određuje prisutnost glasova kreće se po toj unaprijed programiranoj krivulji dobiva se vremenski promjenjiv zvuk.

Treći način promjene koordinata je korištenjem bilo kakvih drugih modulatora (klavijature, kotačića za modulaciju itd.) tako da se izlaz iz spomenutih prosljeđuje u modulacijske ulaze za X i Y os. Dijagram na slici preuzet je iz priručnika sintetizatora Korg Wavestation, koji dozvoljava dva izvora modulacije po svakoj osi.

Tehnika je dobila naziv vektorska sinteza zbog toga što se svaki pravac u envelopei za miješanje nalazi u X-Y koordinatnom sustavu, ima početnu i krajnju točku, smjer i zapravo je vektor.

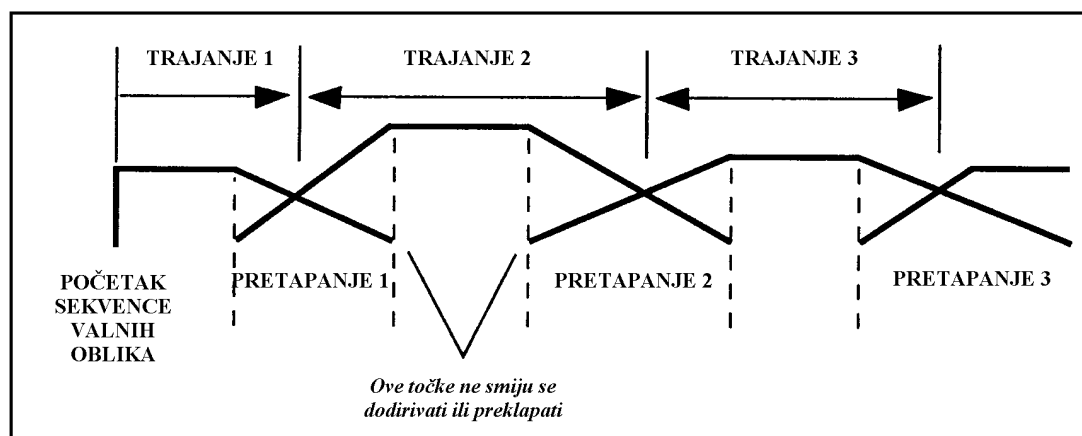
8.8 Sinteza sekvenci valnih oblika (*Wave Sequencing*)

U ovoj vrsti sinteze sekvence različitih segmenata sampleova koristi se za generiranje zvuka. U sintetizatoru postoji memorija u koju se unaprijed programira tablica redoslijeda sampleova (*pattern*). Pokazivač se duž tablice kreće brzinom koju mi definiramo. Ona sama ne zauzima mnogo memorije jer ne sadrži vremena početka i kraja određenog samplea - vremena trajanja su kao u starih sekvencera podijeljena na dvadesetčetvrtinke i mi definiramo koliko je dvadesetčetvrtinki trajanje note. Ova mjera odabrana je iz razloga što je pogodna za tročetvrtinske i četveročetvrtinske sekvence (24 je višekratnik od 3 i 4). Finija podjela nije realizirana, ali u praksi nije ni potrebna.



Slika 8.28: Sekvenca valnih oblika

Kad pritisnemo tipku, pokazivač se kreće po tablici i iz memorije poziva sampleove po uprogramiranom redoslijedu. Svaki sample može biti transponiran duž ljestvice, te tako možemo uprogramirati cijelu melodiju, koja se pokreće pritiskom na jednu tipku. Transpozicija se vrši u grubo u polutonovima (-24 do +24) i fina u centima (-100 do +100). Postoji još jedan parametar koji se programira za svaki sample u nizu: vrijeme pretapanja sa sljedećim sampleom (*Crossfade*). Radi se o tome da je omogućen blagi rast amplitude sljedećeg samplea za vrijeme stišavanja prethodnog; to vrijeme također se definira u šesnaestinkama. Na taj način (ako to naravno ne želimo) nemamo nagle promjene različitih zvukova, već lagano pretapanje jednog u drugi.



Slika 8.29: Pretapanje susjednih sampleova u sekvenci valnih oblika

Svaki redak sekvence valnih oblika sadrži sljedeće podatke:

- Pozicija u tablici (*Step*)
- Banka memorije u kojoj se nalazi željeni sample (ROM, CARD)
- Redni broj i ime samplea u banci (*Wave*)
- Transpozicija u polutonovima (*Semi*)
- Transpozicija u centima (*Fine*)
- Glasnoća (*Lev*)
- Vrijeme trajanja u šesnaestinkama (*Dur*)
- Vrijeme pretapanja, crossfade (*Xfd*)

Tipična tablica sekvenci izgleda ovako:

Step	Wave			Semi	Fine	Lev	Dur	Xfd
1	ROM	48	Pluck3	0	0	99	6	0
2	CARD	111	Shellldru	+7	0	53	3	0
3	CARD	115	Woodbloc	+3	0	99	3	0
4	ROM	47	Pluck 2	-1	+20	99	6	0
5	ROM	55	Mutegtr3	0	0	44	12	+3
6	ROM	135	HoseHit2	-2	-55	99	3	0
7	CARD	65	Jar	0	0	28	3	0
8	ROM	113	Tambouri	+2	0	99	6	+2

Broj mogućih koraka je vrlo velik, čak nekoliko stotina po sekvenci. Nakon što je sekvence uprogramirana, definiraju se još neki parametri. Jedan od njih je petlja (Loop): određuje se na koji će se korak pokazivač vratiti nakon pročitane tablice, kao i način na koji će se vraćati (odmah skokom na to mjesto ili unatrag do tog mjesta itd.). Ostali parametri su modulacijski: pod modulacijom sekvence smatra se promjena mjesta u sekvenci gdje pokazivač počinje čitanje. Ono se može učiniti promjenjivim,

zavisno o stanju definiranih kontrolera: npr. možemo postići da slab pritisak tipke pokreće sekvencu se prvih mjesta tablice, a sve jači pritisak iz sve udaljenijih mjesta u tablici.

Iz ovog prikaza vidi se da je tehnika sekvenci valnih oblika vrlo sofisticirano i korisno oruđe za stvaranje glazbe. U određenu sekvencu mogu se uprogramirati kompletne melodije, kao i gotovi ritmovi. To je jedno od najkorisnijih sredstava za vremensku promjenu spektralnog sadržaja tona.

8.9 Granularna sinteza

Granularna sinteza temelji se na sekvenci vrlo kratkih valnih oblika, i to toliko kratkih da se čuju kao promjena isključivo boje tona, a ne kao ritam. Kod prethodne sinteze vremenski intervali trajanja pojedinog samplea su vrlo dugi i trajanje im je određeno u šesnaestinkama dobe, tako da pobuđuju osjet ritma, dok uzorci u granularnoj sintezi traju vremenski tek nekoliko perioda valnog oblika. Zasad je ova vrsta sinteze razvijena samo na nivou akademske glazbene scene i još nije pronašla svoju komercijalnu primjenu.

8.10 Karplus-Strong sinteza

Ova metoda sinteze koristi se perkusivnim zvukom - poput praska ili pojedinačnog pulsa - koji ulazi u jedinicu za kašnjenje s povratnom vezom (odjek). Ako je signal povratne veze dovoljno snažan (90-99% originalnog), javlja se eksponencijalno opadajući zvuk određene visine tona. Vrijeme kašnjenja određuje visinu tona, tj. ono je jednako periodu rezultirajućeg valnog oblika. Ova metoda je osobito pogodna za simulaciju istitravanja žice i perkusivnih zvukova. Da bi se opadanje zvuka učinilo realističnijim, u povratnu vezu ugrađuje se niskopropusni filter, tako da viši harmonici brže opadaju.

Ovo je zapravo vrlo jednostavna vrsta fizikalnog modeliranja (koje će kao sinteza biti objašnjeno u sljedećem poglavlju), a zajednička su im osnovna svojstva: pošto se perkusivni ulazni signal ponaša kao pobuda petlje za kašnjenje koja proizvodi harmonički zvuk na izlazu, zvuk trzanja mijenja se promjenom perkusivnog zvuka, a svojstva žice promjenom parametara linije za kašnjenje.

8.11 Fizikalno modeliranje

Termin fizikalnog modeliranja odnosi se na korištenje računala za modeliranje (simuliranje) zvukova glazbenih instrumenata. Iako su ponekad instrumenti koji se modeliraju rari i teški, pravi izazov je modelirati glazbene karakteristike akustičnih instrumenata, uključujući sve načine izvođačkog izražavanja. Ako se promatra akustični glazbeni instrument poput klarineta, iz akustičnih i fizikalnih principa mogu se napisati jednadžbe koje izražavaju svojstva rasprostiranja vala u cijevi, uključujući efekte vibracije piska, tonalnih rupa, i zvona na kraju. S violinom je slično: jednadžbom se može izraziti vibracija žice iznad rezonantne kutije. Ako imamo na raspolaganju dovoljno brzo računalo, zvuk koji se proizvodi može se računati u realnom vremenu (za vrijeme sviranja), i to pomoću tipičnih ulaznih

podataka, kao što su jačina puhanja u pisak klarineta ili pritisak i brzina gudala na violinske žice. Razumijevanje akustike nije nimalo lako, osobito u primjeru violine u gornjem primjeru. Razvoj inteligentnih algoritama da bi se reducirala količina procesiranja, a još uvijek zadržala dovoljna sličnost realnom zvuku bio je donedavna obeshrabrujući izazov. Ipak, nedavni napredak algoritama fizikalnog modeliranja u kombinaciji s munjevitim razvojem modernih čipova za digitalno procesiranje signala (DSP) omogućio je (od 1994. godine) komercijalnu realizaciju sintetizatora fizikalnog modeliranja.

Sve metode sinteze koje su se pojavile do tada, imaju svoja ograničenja koja postaju vrlo ozbiljna kad se pomoću njih pokušava kreirati određena vrsta glazbe. Sva ta ograničenja mogu se svesti na zajednički nazivnik: ekspresivnost. Kada talentirani glazbenik svira na instrumentu, on čini mnogo više stvari koje utječu na zvuk nego što se to može simulirati klasičnim sintezama. Ako se to sviranje pokušava simulirati npr. sampliranjem, pada se u poteškoće čak i u jednostavnim stvarima. Uzmimo na primjer trubu. Kad se truba svira tiho, ona ima mekan zvuk s blago izraženim višim harmonicima. što se glasnije svira, sadržaj viših harmonika se povećava (naspram osnovnog), i zvuk postaje oštriji. Kad se svira punom snagom, zvuk postaje vrlo limen, sa jakim višim harmonicima. Boja tona malo varira također s količinom zraka koji svirač usnama koristi za "intonaciju". Također, određeni dijelovi glazbenog djela često zahtijevaju tzv. *crescendo* - gdje se ton počinje svirati tiho i s vremenom se pojačava do glasnog.

Kako bi ove probleme riješili sampliranjem? Kao prvo, trebali bismo se služiti profesionalnim sampleovima trube, a ne onima koji se nalaze u *play-back* sintetizatorima, zbog njihove niže vjernosti. No, dobre sampleove je teško naći, a i skupi su. Ako imamo samplirane prijelaze tih u glasne tonove (*crescendo*), njima se ne možemo služiti, jer im je duljina fiksna.

Tipičan način bio bi programiranje troslojnog *patcha* koji ima trubu sviranu meko, srednje glasno i glasno, tako da se, kad tipke udaramo lagano, čuje meka truba, a kad ih udaramo jako, čuje truba limenog zvuka. Pretapanje između ta tri zvuka ne može biti lagano (*cross-fade*), tako da kod nota sa *crescendom*, razne slojeve mora okidati neki drugi kontroler, a ne klavijatura, jer njihova promjena vrši za vrijeme trajanja tona.

Drugi način bio bi korištenje niskopropusnog filtra na sampleu glasno svirane trube, rezonantne frekvencije kontrolirane jačinom pritiska tipki, kako bi se simulirale promjene u svjetlini tona. No, ni to rješenje ne daje zadovoljavajuće rezultate.

Razmotrimo sada problem vibrata. Sintetizatorski vibrato uvijek zvuči preregularan, previše mašinski, s manjkom ekspresivnosti. To je zato što je kod sintetizatorskog vibrata najčešći parametar koji glazbenik kontrolira samo dubina modulacije niskofrekvencijskim oscilatorom: zato najčešće nema realistične promjene visine tona, kao ni timbralne promjene koje se pri tom javljaju kod akustičnih instrumenata.

Trubači imaju individualne karakteristike stvaranja vibrata, koje variraju ovisno o zahtjevima glazbenog djela i njihovom trenutnom osjećaju. To daje njihovom sviranju svojstven, "organski" osjećaj. Violinisti i vokalisti koriste totalno različite tehnike vibrata, a točan vibrato je nužan u njihovim izvedbama. Kroz vibrato se unose emocije, i tu nema kompromisa.

Što je sa počecima tona (*attack*)? Većina studija pokazala je da većina ljudi ima problema sa raspoznavanjem instrumenata ako se odstrane početni dijelovi tona. Oni su izrazito važni, i vrlo su važni za osjećaj izvedbe. Kod sintetizatora baziranog na sampliranju, glazbenik ima kontrolu nad envelopom (iako se zaista rijetko koristi za vrijeme sviranja), i u principu se može modulirati filter ili glasnoća pojedinog sloja (*layera*), ali akustični instrumenti imaju vrlo kompleksni početni zvuk koji se dramatično mijenja ovisno o načinu sviranja. To je gotovo nemoguće simulirati klasičnim sintetizatorom.

Stvarna akustične izvedbe pune su zvukova koji se mijenjaju tokom trajanja note zbog toga što glazbenik **svira** notu - ne definira samo njen početak, glasnoću i kraj).

Cjelokupni model note korišten u modernim sintetizatorima, koji se sastoji od klasične ADSR-envelope, pa i naprednije envelope s više prijelomnih točaka, u načelu su umjetne, i nisu realne kao u ekspresivnom sviranju. U *sustain* dijelu note kod akustičnih instrumenata, nota je modulirana u visini i boji tona, kao i glasnoći od strane glazbenika, na način na koji on to odluči - to je realnost i to je potrebno učiniti mogućim u sintezi.

Najvažnija slabost konvencionalnih sintetizatora koji nude veliku kontrolu nad parametrima zvuka, možda je to što nisu prijateljski prema korisniku koliko bi trebali biti. Podešavanje parametara vrlo je komplicirano i zahtijeva i drugu vrstu znanja osim glazbenog.

No, nisu klasični sintetizatori bazirani na sampleovima toliko loši. Oni mogu realno oponašati jedan dio instrumenata, čije sviranje nije toliko ekspresivno. Odlični su za pozadinske akorde; vrlo su dobri za zvukove klavira i orgulja, bubnjeva i perkusionističkih instrumenata. Za gudačke akorde, potrebni su vrlo dobri sampleovi, i čak tada postoje ograničenja, da ne bi zvučali sintetski. Više različitih zvukova stavlja se u slojeve i tako su maskirane nesavršenosti pojedinih sampleova, tako da mnogo ljudi smatra potpuno upotrebljivim ovaj način korištenja sintetizatora pri simulaciji realnih instrumenata.

Kada se dođe do solo ili glavnih dionica, mogu se koristiti akustični instrumenti ili fizikalno modeliranje. U ovom slučaju, polifonija nije potrebna. I ne samo to: PM sintetizator je lagano koristiti kada se želi napraviti zvuk npr. četiri instrumenta koji sviraju jednu sekciju. Može se naćiniti vrlo uvjerljiva sekcija u jednom programu, bez korištenja ikakvih *chorus* efekata.

Dakle, sinteza fizikalnog modeliranja je tehnika koja omogućava glazbeniku da u izvedbu unosi mnogo emocija koristeći relativno jednostavne kontrolere, i kreira kompleksne efekte koje ćine akustićni instrumenti. Da bi se to ispunilo, generiranje valnih oblika provodi se procesiranjem voćenim jednostavnim kontrolnim ulazima (i MIDI-jem).

Za realizaciju fizikalnog modeliranja trebalo je ostvariti sljedeće tehničke zahtjeve:

1. **Unaprjeđenje digitalnog procesiranja**
2. **Razvoj algoritama**
3. **Poboljšanje glasova**

8.11.1 Digitalno procesiranje signala

Procesori digitalnog audio signala (DSP čipove), na nižem su stupnju razvoja od onih u osobnim računalima. Iako im se tokom godina povećala snaga i kompleksnost, tipični čipovi korišteni u audio procesiranju su mnogo manji i jeftiniji nego tradicionalni centralni procesori kao moderna Intelova x86 serija, Motorolina 68K serija, Power PC, DEC Alpha, SPARC itd. DSP čipovi orijentirani su na specifične karakteristike digitalnog procesiranja signala:

1. Mali prostor za podatke, jer brojevi u nizu prolaze kroz procesor.
2. Mali prostor za kodove. Algoritmi za procesiranje su vrlo mali u usporedbi s algoritmima osobnih računala.
3. Nema potrebe za mogućnosti pomičnog zareza: procesiraju se cjelobrojne vrijednosti.
4. Potreba za brzim množenjem: množenje se mora obavljati unutar jednog perioda takta.
5. Dovoljna brzina; tradicionalno DSP čipovi koriste odvojene sabirnice za programe i podatke kako bi se poboljšala brzina. Također Sadrže interno višestruke DSP jedinice kako bi se nekoliko stvari obavilo za vrijeme jednog perioda takta.
6. Niska cijena: ova karakteristika kombinirana sa serijskom obradom podataka, omogućava stavljanje nekoliko DSP čipova u serijsku konfiguraciju da se povećaju mogućnosti procesiranja.

Da se stekne osjećaj za mogućnosti DSP-a, treba znati da tipični DSP čip radi na frekvenciji 50 MHz i može množiti i zbrajati (uz pozivanje i spremanje podataka) u jednom periodu internog takta. Recimo da može izvršiti samo jednu instrukciju po periodu takta. Ako podaci dolaze s frekvencijom uzorkovanja od 50 kHz, tada može izvršiti 1000 instrukcija po uzorku. To je vrlo velik broj instrukcija (čak i kada se oduzme jedan velik dio potreban za digitalno filtriranje koje je vrlo kompleksno). Za sada to još nije dovoljan broj za veliku polifoniju, ali se mogućnosti i pristupačnost cijene DSP čipova svakim danom poboljšavaju, a proizvođači sintetizatora prate taj trend.

8.11.2 Algoritmi fizikalnog modeliranja

Ovo je osjetljivo područje kojem je posljednjih godina posvećeno nešto pažnje, ali ne mnogo, s obzirom na stvarne mogućnosti. Metode o kojima će ovdje biti riječi odnose se na sve digitalne sintetizatore i moderne digitalne efekte.

Znamo da se svaki valni oblik u digitalnom obliku sastoji od serije uzoraka. Uzorci su uobičajeno predstavljeni 16-bitnim cijelim brojevima (amplituda se kvantizira na vrijednosti od +32767 do -32768). Frekvencija uzorkovanja kvalitete CD-a daje 44100 uzoraka u sekundi po valnom obliku. Da bi učinili nešto jednostavno, poput promjene glasnoće, jednostavno množimo svaki uzorak istim faktorom. Većina digitalnih sintetizatora ima tri ili četiri mjesta na kojima se vrši postavljanje parametara glasnoće i ukupna glasnoća je jednostavni produkt ovih faktora. U digitalnom obliku, miješanje dva zvuka svodi se na zbrajanje pojedinih uzoraka iz dva valna oblika. Algoritam za stvaranje distorzije izgledao bi ovako:

```
If Sample > HighLimit then Sample = HighLimit
Else If Sample < LowLimit then Sample = LowLimit
Else (Ostavi na miru)
```

Iz ovog se vidi da tipično procesiranje koje se odvija u svakom digitalnom sintetizatoru (stvaranje envelope, promjene veličine uzoraka i stvaranje višeslojnih glasova) gotovo ne oduzima nikakvu procesorsku snagu. Ono može biti učinjeno a samo nekoliko instrukcija po uzorku.

Razmotrimo sada jednostavni *delay* (odjek). Za njega je potrebno jednostavno prosljeđivanje uzoraka u posmačni registar, te nakon što uzorak prođe kroz registar, njegovo množenje s istim faktorom (*wet/dry mix ratio*) i pribrajanje s glavnim tokom uzoraka.

Za realizaciju reverba, zbrajamo zajedno velik broj delaya različite dužine: uzorci nisu uzimani samo sa izlaza posmačnog registra, već i sa neki drugih dijelova registra, ovisno o algoritmu koji simulira različita vremena refleksije od zidova prostorije (pri tome se pojedinačne jeke filtriraju, pošto kod realnih prostorija postoji apsorpcija zidova - više frekvencije su više apsorbirane). Mada je ova slika digitalnog reverba pojednostavljena, niti u stvarnom slučaju (stereo-reverb itd.) nije mnogo kompliciranija. Iz ovog prikaza se vidi da reverb oduzima mnogo više procesorske snage nego množenje parametrom (skaliranje) i miješanje signala. Zbog toga se bolje reverb jedinice od lošijih razlikuju po tome koliko "gust" reverb proizvode (količina refleksija po vremenu), i koliko su velike prostorije koje simulira, jer je potrebno više procesorske snage za simuliranje refleksija iz svake točke velike prostorije.

Ovi algoritmi filtriranih odjeka imaju primjenu u fizikalnom modeliranju. Realni glazbeni instrumenti proizvode tonove određene visine generiranjem stojnih valova u cijevima, rezonantnim tijelima i žicama: glazbenik manipulira rezonantnom frekvencijom stojnih valova. Kratke delay-linije korištene u PM sintezi nisu niti izdaleka toliko procesorski zahtjevne kao reverbi velikih prostorija, ali postoji još parametara koji ulaze u kompletnu sliku. Cjelokupne kompleksne akustične karakteristike specifičnog materijala (tj. akustične apsorpcijsko/refleksijske karakteristike specifičnog drva ili mjedenog materijala, te oblaganje tkaninom itd.) su uobičajeno sadržane u parametrima filtra, čiji su parametri namješteni na osnovama mjerenja stvarnih instrumenata. Ovo filtriranje može biti izvršavano nakon svakog izlaska iz spomenute kratke delay linije, i ovdje počinje potreba za većom procesorskom snagom. Nadalje, stvarna dužina linije za kašnjenje određenog instrumenta obično nije točne duljine kakvu zahtijeva vrijeme kašnjenja, tako da moramo interpolirati između uzoraka, a to zahtijeva još više računanja.

Za modeliranje različitih tipova šuma, potrebni su nam dodatni generatori šuma, kao i njihovo pribrajanje drugim zvukovima. Samo po sebi, modeliranje šuma nije tako teško, ali da bi se akustično točno modulirale karakteristike šuma (variraju sa izvođenjem) potrebno je više procesiranja.

Kod duhačkih instrumenata moramo modulirati kompleksnu akustiku usta glazbenika i njihovu interakciju s piskom (koji nije isti kod trube i kod flaute, u koju se ne puše na isti način). Ovaj dio modela imaće dramatične efekte na vrlo važne početke tonova (tranzijente) kao i legato prijelaze. Drugim riječima, kad počnemo puhati, ali instrument još nije stigao u rezonantni mod, imamo tranzijentni zvuk, koji je jedinstven svakom instrumentu i izvođačevoj akciji. To je jedan od dijelova modela koje je najteže realizirati, a vrlo je važan, jer slušatelji prepoznaju instrumente i glazbenike više prema tranzijentima i drugim izrazima nego po boji tona. Neki sintetizatori čak modeliraju efekt harmoničkog pretjeranog puhanja (*overblowing*), koje se koristi kod duhačkih instrumenata kad se žele odsvirati više note sa istim položajem prstiju.

Kod nekih duhačkih instrumenata potrebno je također simulirati efekt šupljine ždrijela i da bi se postigao efekt "režanja". Da bi se modelirale žice koje se svira trzanjem (poput onih na gitari), radi se model linije za kašnjenje s filtrom na kraju linije. Realni instrumenti imaju rezonirajuću žicu koja je inicijalno uzbuđena oštrim trzajem, i njeno titranje postepeno odumire zahvaljujući apsorpciji na krajevima i u zraku. Apsorpcija je modelirana filtrom i skaliranjem, a rezonantno tijelo također filtrom.

Simuliranje gudačkih žica puno je teže. Potrebno je modelirati kompleksnu akciju povlačenja i ispuštanja žice gudalom koja se javlja kada ono tare o žicu, kako se ta akcija mijenja s pritiskom, glasnoćom, pozicijom gudala (relativno prema mostu), nauljenosti gudala kao i njegovim kutom (koji rezultira kontaktnom površinom). Naposljetku, potrebno je modelirati kompleksno sjedinjenje s kompleksnom rezonantnom šupljinom tijela instrumenta.

U praksi je korisno imati mogućnost izbora dijela instrumenta, npr. modela verzije tijela violine, koje ima svojstven zvuk. Ili npr. izbornik unutar modela trube koji daje izbor metala i debljine cijevi. Te karakteristike modeliraju se pomoću jednog ili više filtara, a parametre filtara postavlja glazbenik slušanjem. Podešavanje modela kako bi dali točan zvuk određenih karakteristika vodi nas u sljedeće poglavlje.

8.11.3 Razvoj različitih zvukova

Jednom kad je tim za razvoj algoritama obavio svoj dio posla, preostaje mnogo posla stručnjacima za editiranje zvukova. Razvoj *patcheva* PM sinteze najvjerojatnije je teži od svih ostalih, pošto se ulazi u samu srž modela. Važno je zapamtiti da je osnovni dizajn glasa u PM sintezi jedna komplicirana umjetnička forma. Može se usporediti s dizajniranjem realnih akustičnih instrumenata. Programiranje *patcheva* je toliko kompleksno, da kad korisnik promijeni određene parametre, zvuk modela potpuno se mijenja i rijetko kad je upotrebljiv: osoba koja želi editirati PM instrument mora imati enormno znanje o akustici instrumenata, kao i o digitalnoj tehnologiji, što je nemoguće očekivati od većine glazbenika.

Stoga se razvija druga vrsta pristupa - korporacija Yamaha je u svom sintetizatoru VL1 podijelila editiranje glasova u dva osnovna dijela: dizajn osnovnih elemenata i dizajn sveg drugog. Dizajn osnovnih elemenata, u kojem se dizajnira fundamentalna

akustika virtualnog instrumenta, najteži je dio; njega najbolje obavljaju profesionalci koji se dobro snalaze u glazbenoj akustičnoj teoriji kao i u karakterističnim nijansama dotičnog modela. Ostali parametri, čija je mogućnost promjene prepuštena korisniku, zapravo je baratanje glazbenim pojmovima vrlo bliskim glazbeniku. To su tzv. macro parametri, poput tipa duhačkog šuma, njegove glasnoće ili osjetljivosti glasnoće o jačini pritiska tipke.

Predstavnici sintetizatora koji koriste sintezu fizikalnog modeliranja:

Korg WaveDrum, Korg Prophecy, Roland VG-8, Yamaha VL

9. LITERATURA

Knjige:

- [1] F.C. Judd. *Elektronische Musik (Musik aus der Retorte)*. Franzis - Verlag, München 1965.
- [2] T.D. Towers. *Electronics in Music*. Newnes Technical Books, Butterworths, UK, 1976.
- [3] Boris Kviz. *Radiotelemetrija*. Školska knjiga, Zagreb 1980.
- [4] Dean Friedman. *The Complete Guide to Synthesizers, Sequencers & Drum Machines*. Amsco Publications, New York 1985.
- [5] David Crombie. *The New Complete Synthesizer*. Omnibus Press, Sidney, 1986.

Priručnici sintetizatora:

- [1] *Roland D-50 Linear Synthesizer Owner's Manual*. Roland Corporation 1987.
- [2] *Korg Wavestation (Advanced Vector Synthesis. Wave Sequencing.) Reference Guide, Player's Guide*. Korg Corporation.
- [3] *Kurzweil K2000 (V.A.S.T.) Musician's Guide*. Young Chang America, Cerritos, CA, 1991., *Musician's Guide Supplement*. Young Chang America, Cerritos, Ca, 1995.

Članci s interneta:

- [1] *Using the Moog Synthesizer*.
<http://arts.ucsc.edu/ems/music/eq...thesizers/analog/moog/Mood.html>
- [2] *Subtractive Synthesis*.
<http://www.geocities.com/SunsetStrip/Underground/2288/t2ansynt.htm>
- [3] *Digital Synthesizers*.
<http://arts.ucsc.edu/ems/music/eq...thesizers/digital/Digisynths.html>
- [4] *FM Synthesis*.
<http://www.geocities...rip/Underground/2288/t2fmsynt.htm>
- [5] *DX Spectrum Amplitudes*.
<http://www.geocities...trip/Underground/2288/t2dx-fm.htm>
- [6] Herbert Janßen. *SY Programming*.
heja@neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de
- [7] *Musical Physical Modeling*.
<http://web800.com/music/vl/physmodl.htm>

- [8] ***Physical Modeling Theory.***
<http://web800.com/music/vl/theory.htm>
- [9] ***Synthesizer Layouts.***
<http://www.geocities...rip/Underground/2288/t2synths.htm>