

Mr Dragan Novković

MIDI I SINTEZA ZVUKA



**Visoka škola elektrotehnike i računarstva
Beograd, 2013.**

Autor

Mr Dragan Novković

MIDI I SINTEZA ZVUKA

Recenzenti

Mr Olivera Gračanin,
vanredni profesor, Akademija umetnosti Novi Sad

Mr Dragan Drinčić, predavač,
Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Beograd

Tehnička obrada

Zorana Đorđević, d.i.a.

Dizajn korica

Mr Biljana Novković

Izdavač

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd

Štampa

Školski servis Gajić, Beograd

Tiraž

30 primeraka

ISBN

978-86-7982-186-7

SADRŽAJ

5 PREGOVOR

7 ADITIVNA SINTEZA

I deo

- 1.1 Osnovni pojmovi
- 1.2 Teorijske osnove
- 1.3 Furijeova analiza osnovnih talasnih oblika
- 1.4 Praktična primena aditivne sinteze

31 SUBTRAKTIVNA SINTEZA

II deo

- 2.1 Osnovni principi
- 2.2 Filtriranje
- 2.3 Modulacija

45 FM SINTEZA

III deo

- 3.1 Istorijski razvoj
- 3.2 Osnovni principi funkcionisanja FM sinteze
- 3.3. Indeks modulacije
- 3.4. Principi praktične realizacije FM sinteze

63 WAVETABLE SINTEZA

IV deo

75 MIDI PROTOKOL

V deo

- 5.1 Istorija razvoja MIDI protokola
- 5.2 Povezivanje MIDI uređaja
- 5.3 MIDI kontroleri
- 5.4 Struktura MIDI protokola
- 5.5 Sistemske poruke
- 5.6 MIDI Time Code (MTC)

PREDGOVOR

Ovaj udžbenik je pisan za potrebe predmeta MIDI i sinteza zvuka, koji se izučava u trećem semestru Studijskog programa **Audio i video tehnologije** koji funkcioniše u okviru Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu. Udžbenik pokriva oblasti koje za cilj imaju da daju osnovna znanja iz oblasti sinteze zvuka i načina funkcionisanja i upotrebe MIDI protokola.

Sinteza zvuka, koja predstavlja jednu od najinteresantnijih oblasti audio struke, se u ovom udžbeniku izučava sa nekoliko aspekata: istorijskog, teoretskog, projektantskog i korisničkog. Zbog vremenske ograničenosti samog kursa, vrste sinteze koje se obrađuju u ovom tekstu su svedene na izbor od četiri tipična predstavnika svake epohe u razvoju ove oblasti:

1.0 Aditivna sinteza, kao istorijski prva, koja je u potpunosti obeležila elektromehanički deo istorije razvoja ove oblasti (od kraja XIX veka do sredine XX veka);

2.0 Subtraktivna sinteza, koja je svoj procvat doživela punim razvojem analogne elektronike, obeleživši šezdesete i sedamdesete godine XX veka;

3.0 FM sinteza, kao specifičan vid sinteze koji je obeležio epohu digitalnih hardverskih sintisajzera iz osamdesetih godina prošlog veka;

4.0 Wavetable sinteza, kao tipičan predstavnik sinteze bazirane na savremenoj upotrebi računara koja svoj puni procvat doživljava od poslednje decenije XX veka.

Sama sinteza zvuka, u svom praktičnom aspektu, ima bliske veze sa studijskim radom i muzičkom produkcijom. Efikasnost samih uređaja za sintezu koji se koriste, kao i njihova prilagođenost radu ostatka audio sistema i lakoća manipulacije, umnogome su omogućeni i podržani kroz formiranje i upotrebu MIDI sistema. Iz tog razloga, u **5.0 MIDI protokol** se kao posebna tematika izučava pojam, teoretske osnove i praktična upotreba MIDI protokola, koji je u trenutku pisanja ovog teksta slavio svoj trideseti rođendan u svetu audia.

Knjiga je pisana za potrebe i u kontekstu školovanja studenata SP Audio i video tehnologije, što podrazumeva da je ovaj tekst namenjen studentima druge godine, za koje se podrazumeva da već imaju sva potrebna teoretska predznanja iz oblasti Elektroakustike i Audio elektronike. U tom smislu se određeni pojmovi koji se uvode u tekst ne objašnjavaju i tumače, već se njihovo poznavanje u trenutku čitanja teksta *a priori* podrazumeva.

Veliko hvala inženjeru za audio i video tehnologije Nikoli Jeremiću, koji je autor dela teksta o kompleksnim MIDI sistemima.

Dragan Novković
Beograd, novembar 2013.

ADITIVNA SINTEZA

I deo

Prvo poglavlje upućuje studenta u izučavanje oblasti Aditivne sinteze, predstavljajući četiri celine. Nakon objašnjavanja Osnovnih pojmova (1.1), proučavaju se Teorijske osnove (1.2) i Furijeova analiza osnovnih talasnih oblika (1.3), kako bi se konačno došlo do Praktične primene aditivne sinteze (1.4). Student će detaljnije biti informisan o sledećim temama:

- 1. Osnovni pojmovi o sintezi zvuka;*
- 2. Teorijske osnove aditivne sinteze zvuka;*
- 3. Furijeova analiza osnovnih talasnih oblika, koji se koriste u postupcima sinteze zvuka;*
- 4. Signal testerastog talasnog oblika;*
- 5. Signal pravougaonog talasnog oblika;*
- 6. Signal trougaonog talasnog oblika;*
- 7. Praktična primena aditivne sinteze zvuka;*
- 8. Istorijski razvoj aditivne sinteze zvuka;*
- 9. Telharmonijum;*
- 10. Hammond orgulje;*
- 11. Principi rada savremenih aditivnih sintetizatora zvuka.*

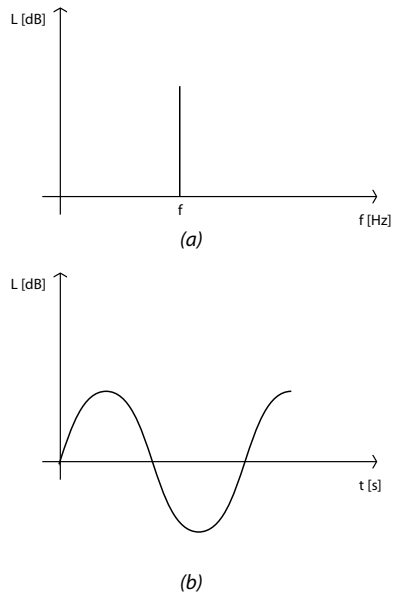
1.1 Osnovni pojmovi

Sinteza je, uopšteno gledano, proces kombinacije osnovnih elemenata kako bi se pomoću njih stvorio potpuno nov sadržaj, tj. stvaranje nečeg kompleksnog od određenog broja jednostavnijih komponenata. Sinteza zvuka ima sličan koncept u kojem se kompleksan zvuk formira uz pomoć jednostavnih osnovnih elemenata.

Osnovna podela u oblasti sinteze zvuka je na imitativnu i apstraktnu sintezu. Imitativna sinteza teži što vernijem oponašanju zvuka realnog instrumenta poput violine, francuske trube, elektronskih orgulja itd. Danas se ovaj cilj lako postiže uzorkovanjem (engl. sampling) zvuka, ali to ne možemo smatrati sintezom u užem, originalnom kontekstu tog pojma. Ovo je vrsta kopiranja nekog već postojećeg zvuka koji se ne kombinuje s drugim osnovnim elementima zvuka ili se ne manipuliše njime samim kako bi se dobio drugi zvuk. Za razliku od imitativne, apstraktna sinteza teži kreiranju potpuno novih, originalnih zvukova koji se ne mogu generisati upotrebom klasičnih muzičkih instrumenata.

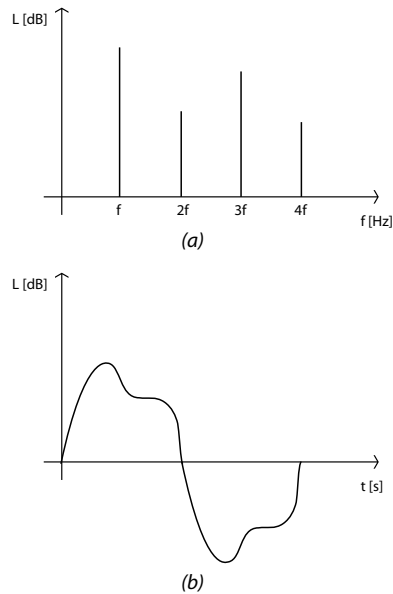
Svaki se zvuk u prirodi može svrstati u jednu od tri grupe:

1. **Prost ton:** ovo je vrsta zvuka koja se ne može sresti u prirodi, već se proizvodi u za te potrebe namenski konstruisanim uređajima – oscilatorima ili ton generatorima. Prost ton se karakteriše postojanjem samo jednog harmonika u spektru, dok je vremenski oblik takvog signala sinusoidaln. Iz tog razloga se prost ton često naziva i sinusoidom.



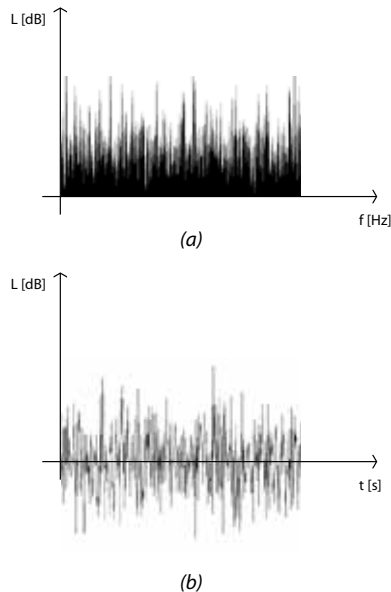
Slika 1.1: Izgled spektra (a) i vremenaskog oblika (b) signala prostog tona

2. **Složen ton:** ovu vrstu zvuka karakteriše postojanje harmonskog niza, koji, u slučaju pravilnih tonova kakve generišu klasični muzički instrumenti, podrazumeva postojanje harmonika na frekvencijama koje su celobrojni umnošci osnovne frekvencije tona.



Slika 1.2: Izgled spektra (a) i vremenaskog oblika (b) signala složenog tona

3. **Šum:** ovo je vrsta zvuka u čijem spektru je aktivan veliki broj harmonika, usled čega uvo više ne može da razaznaje njihove odnose i postojanje kao nezavisne događaje, već dolazi do njihovog stapanja koji se manifestuje kao osećaj šuma.



Slika 1.3: Izgled spektra (a) i vremenaskog oblika (b) signala šuma

Složen ton, koji karakteriše zvuk svakog muzičkog instrumenta, može se u potpunosti okarakterisati sa sledeće tri osobine:

1. **Visina tona** (engl. *pitch*) – fizički gledano, to je frekvencija oscilovanja zvučnog talasa. U slučaju složenog tona, visina je definisana učestanošću osnovnog, najnižeg harmonika u spektru tona. Što je osnovna frekvencija viša, viši je i ton čijem spektru ona pripada, i obrnuto.

2. **Boja tona** (engl. *timbre*) – boja je definisana harmonskom strukturom spektra tona. Boju tona određuju raspored i međusobni odnosi pojedinih harmonika u spektru. Subjektivno se boja tona može izraziti raznim pridevima, pa tako imamo svetle, tamne, šuplje, nazalne, tanke, oštre, itd. zvukove.

3. **Glasnoća tona** (engl. *volume*) – glasnoća tona je određena amplitudom oscilovanja zvučnog talasa. Što je veća amplituda, to je ton glasniji, i obrnuto.

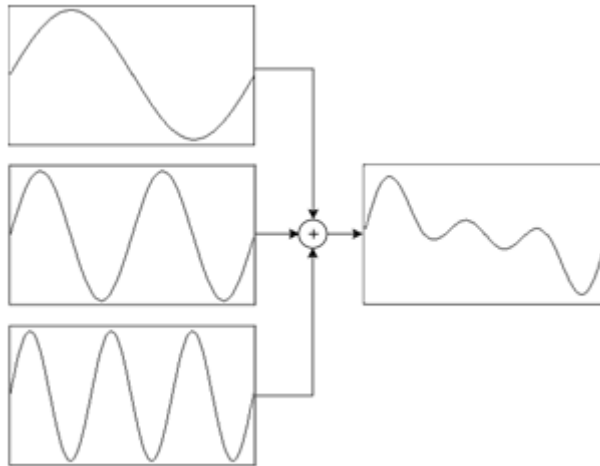
U stvarnosti su ta tri parametra retko kada konstantna – kod svih muzičkih instrumenata oni su vremenski promenljivi. Kod klasičnih instrumenata ta je promena najčešće kontinualna. Pritiskom dirke na klaviru u početku je zvuk vrlo svetao, što znači da ima izražene više harmonike (uzrok tome je udarac čekića po žicama), a s vremenom postaje sve mekši i tamniji budući da viši harmonici odumiru brže nego harmonici nižeg reda.

Glasnoća tona odsviranog na klaviru se takođe menja u vremenu. Pre nego što odsviramo notu pritiskom dirke, glasnoća je jednaka nuli, zatim, u trenutku pritiska na dirku, glasnoća skače na maksimalnu vrednost (ta vrednost je određena jačinom izvršenog pritiska na dirku), nakon čega se postupno smanjuje natrag na nulu dok ton rezonira kroz vreme držanja dirke. Naravno da ova vremenska nestalnost osnovnih parametara zvuka važi za sve realne muzičke instrumente.

Sa ovako postavljenim sistemom osnovnih parametara i shvatanjem njihove strukture i uticaja na formiranje konačnog zvuka, moguće je izvršiti analizu bilo kog zvuka, a na osnovu takve analize moguće je dalje baviti se različitim postupcima sinteze. Dakle, elektronski instrumenti – sintisajzeri, da bi do kraja bili funkcionalni, svakako moraju obezbediti potpunu kontrolu nad sva tri objašnjena parametra, uz neophodne dodatne mogućnosti modulacije koje omogućavaju promenu tih parametara u vremenu.

1.2 Teorijske osnove

Aditivna (adicija – sabiranje) sinteza je, istorijski gledano, prvi tip korišćene sinteze zvuka. Ona se zasniva na principu generisanja zvuka dodavanjem harmonika i oblikovanjem spektralne anvelope. Princip koji stoji iza aditivne sinteze je vrlo jednostavan: svaki talas se može predstaviti kao serija harmonika, čistih sinusnih talasa, postavljenih na različite pozicije u spektru, koji sabiranjem daju specifičan ton. U aditivnim sintisajzerima, dakle, mora postojati određeni broj oscilatora bazičnih signala, čiji su izlazi povezani sa odgovarajućim pojačavačima pomoću kojih se formira spektralna anvelopa signala. Izlaz svakog pojačavača povezan je na mikser koji sabira sve na ovaj način generisne spektralne komponente, dajući na svom izlazu konačni signal.



Slika 1.4: Prikaz osnovnog principa sabiranja prostih sinusnih tonova u postupku aditivne sinteze

Iza ovako prostog principa sinteze stoji matematička analiza koju je početkom XIX veka razvio francuski matematičar Jean Baptist Joseph Fourier (1768-1830), i koja predstavlja temelj analize i sinteze signala u mnogo širem domenu.

Verovatno najvažniji pojedinačni zaključak Furijeove analize je da bilo koji analizirani signal može biti rastavljen na niz prostih, sinusoidalnih signala, koji čine pojedinačne harmonike složenog signala koji se analizira. Na osnovu ovoga, lako se dolazi do pomenutog principa koji stoji u osnovi aditivnog načina sinteze signala zvuka: sabiranjem niza prostih



Slika 1.5: Jean Baptist Joseph Fourier
(1768-1830)

tonova moguće je rekonstruisati ili sintetisati bilo koji složen zvuk. Nije retkost da se aditivna sinteza u užem smislu često naziva i Furijeovom sintezom. Termin “u užem smislu” podrazumeva situaciju u kojoj se u postupku aditivne sinteze polazi od prostih sinusoidalnih tonova. Kao što ćemo kasnije videti ovo ne mora uvek biti slučaj, tj. aditivna sinteza može podrazumevati i rad sa oscilatorima koji generišu složenije oblike početnih signala.

Matematički gledano, Furije je dokazao da se periodične funkcije mogu formirati sumiranjem beskonačnih nizova. Sledeći tu pretpostavku, ustanovio je da se svi periodični signali, kada se predstave matematičkom funkcijom, mogu rastaviti na sumu sinusnih funkcija različitih frekvencija. Preciznije, bilo koji periodičan signal se u diskretnom vremenskom domenu može sintetisati prema izrazu (1-1).

$$s[n] = \frac{1}{2} a_0[n] + \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_k[n] \cos\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} kn\right) - b_k[n] \sin\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} kn\right) \quad (1-1)$$

ili jednostavnije:

$$s[n] = \frac{1}{2} a_0[n] + \sum_{k=1}^{k_{\max}} r_k[n] \cos\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} kn + \varphi_k[n]\right) \quad (1-2)$$

gde je:

$$a_k[n] = r_k[n] \cos(\varphi_k[n]), \quad b_k[n] = r_k[n] \sin(\varphi_k[n]) \quad (1-3)$$

U ovim formulama F_s je frekvencija uzorkovanja, f_0 je fundamentalna frekvencija, a $k_{\max}$ je najvišji harmonik ispod Nyquist-ove frekvencije. Jednosmerna komponenta je uopšteno nepoželjna u sintezi zvuka, stoga se element a_0 može ukloniti. Uvođenje vremenski promenljivih koeficijenata $r_k[n]$ omogućuje dinamičko korišćenje generatora anvelope signala kako bi se modulisali oscilatori, stvarajući pritom kvaziperiodični talasni oblik (što znači da je talasni oblik periodičan kratkotrajno, i da menja svoj talasni oblik kroz vreme).

Aditivnom sintezom možemo kreirati i neharmonične zvukove (one koji sadrže neperiodične talasne oblike), ako pojedini harmonici nemaju frekvenciju koja je celobrojni umnožak osnovne (fundamentalne) frekvencije. Uz vremenski promenjive i uopštene (ne nužno harmonične) frekvencije $f_k[n]$ (trenutna frekvencija k -te sastavnice za vreme n -tog uzorka), definicija sintetisanog izlaza se može izraziti pomoću jednačine (1-4):

$$s[n] = \frac{1}{2} a_0[n] + \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_k[n] \cos\left(\frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=1}^n f_k[i]\right) - b_k[n] \sin\left(\frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=1}^n f_k[i]\right) \quad (1-4)$$

što je u stvari varijacija izraza (1-1). Na isti način, korišćenjem supstitucija (1-3), dobijamo pojednostavljenu verziju izraza (1-4), prikazanog jednačinom (1-5).

$$s[n] = \frac{1}{2} a_0[n] + \sum_{k=1}^{k_{\max}} r_k[n] \cos\left(\frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=1}^n f_k[i] + \varphi_k[n]\right) \quad (1-5)$$

Ako je $f_k[n] = kf_0$, uz konstantu vrednost fundamentalne frekvencije f_0 , sve sastavnice signala su harmoničke, a rezultujući talasni oblik je kvaziperiodičan. Takođe se generalizovani izrazi (1-1) i (1-4) lakše svode na jednostavnije varijante (1-2) i (1-5). Za svaku neharmoničku sastavnicu, fazni član $\varphi_k[n]$ se može predstaviti preko trenutne frekvencije $f_k[n]$ pomoću sledeće smene (1-6).

$$f_k[n] \leftarrow f_k[n] + \frac{F_s}{2\pi} (\varphi_k[n] - \varphi_k[n-1]) \quad (1-6)$$

Koristeći ovu smenu, svi se fazni članovi $\varphi_k[n]$ mogu postaviti na nulu bez gubitka generalizacije, budući da će početna vrednost faze pri $s[0]$ ostati očuvana. Dodatnom eliminacijom istosmerne komponente, izraz za neharmoničku aditivnu sintezu pojednostavljuje se na izraz (1-7).

$$s[n] = \sum_{k=1}^{k_{\max}} r_k[n] \cos\left(\frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=1}^n f_k[i] + \varphi_k[0]\right) \quad (1-7)$$

$$\varphi_k[0] = \frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=-\infty}^0 f_k[i] \quad (1-8)$$

Ako konstantni fazni član (u vremenskom trenutku $n = 0$) izrazimo pomoću (1-8), generalni izraz za aditivnu sintezu se može krajnje pojednostaviti na konačan izraz definisan jednačinom (1-9).

$$s[n] = \sum_{k=1}^{k_{\max}} r_k[n] \cos\left(\frac{2\pi}{F_s} \sum_{i=-\infty}^n f_k[i]\right) \quad (1-9)$$

1.3 Furijeova analiza osnovnih talasnih oblika

Uopšteno, ako imamo periodičan talasni oblik $X[n]$, možemo odrediti njegove koeficijente Furijeovog niza $A[k]$ direktno primjenjujući Furijerovu transformaciju, prema izrazu (1-10).

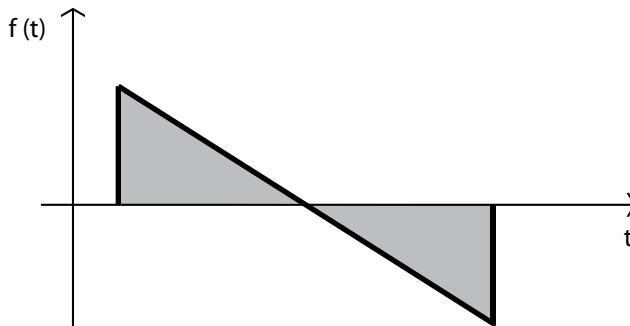
$$A[k] = \frac{1}{N} [X[0] + U^{-k} X[1] + \dots + U^{-(N-1)k} X[N-1]] \quad (1-10)$$

No, koristeći taj izraz direktno za testerasti talasni oblik će rezultirati mnogim stranicama algebre (nešto manje ako bi koristili diferencijalne jednačine). Umesto toga, oslonićemo se na svojstvo Furijeove transformacije koje u relaciju stavlja signal $x[n]$ i njegovu prvu razliku, koja je definisana sa $x[n] - x[n-1]$. Prva razlika testerastog talasnog oblika biće dovoljno jednostavna kako bi je mogli direktno odrediti i tako dobiti željenu Furijeovu seriju. Formula koja će nam pomoći u tome je izražena sa (1-11). FT označava Furijeovu transformaciju funkcije.

$$FT\{x[n] - x[n-1]\} \approx i\omega k FT\{x[n]\} \quad (1-11)$$

Testerasti talasni oblik

Primenićemo izraz (1-11) na testerasti talasni oblik $s[n]$, prikazan na slici 1.5.



Slika 1.6: Signal testerastog talasnog oblika

Za interval $0 \leq n < N$ imamo:

$$s[n] - s[n-1] = -\frac{1}{N} + \begin{cases} 1 & \text{za } n = 0 \\ 0 & \text{za } n \neq 0 \end{cases} \quad (1-12)$$

Ignorišući konstantni pomak od $-1/N$, ovo nam daje impuls, odnosno vrednost nula svugde osim u prvom uzorku po ciklusu. Suma u Furijeovoj transformaciji tako ima samo jedan član, pa time dobijamo izraz (1-13).

$$FT\{s[n] - s[n-1]\}(k) = 1, k \neq 0, -N < k < N \quad (1-13)$$

Zatim primenjujemo diferencijalnu formulu unatrag kako bi dobili izraz (1-14):

$$FT\{s[n] - s[n-1]\}(k) \approx \frac{1}{i\omega k} = \frac{-iN}{2\pi k} \quad (1-14)$$

koji vredi za celobrojne vrednosti k , male u poređenju i sa N , ali uz $k \neq 0$. Drugi oblik izraza smo dobili kombinovanjem relacija $\omega = 2\pi/N$ i $1/i = -i$.

Ova analiza nam ne daje istosmernu komponentu $FT\{s[n]\}(0)$, jer bi u tom slučaju morali deliti sa $k = 0$. Umesto toga, istosmernu komponentu možemo izračunati direktno kao sumu svih tačaka talasnog oblika – približno je jednaka nuli.

Kako bi dobili Furijeovu seriju izraženu preko poznatih realnih sinusnih i kosinusnih funkcija, kombinujemo odgovarajuće izraze za pozitivne i negativne vrednosti k . Prvi harmonik ($k = \pm 1$) iznosi:

$$\frac{1}{N} [FT\{s[n]\}(1) \cdot U^n + FT\{s[n]\}(-1) \cdot U^{-n}] \approx \frac{-i}{2N} [U^n - U^{-n}] = \frac{\sin(\omega n)}{\pi} \quad (1-15)$$

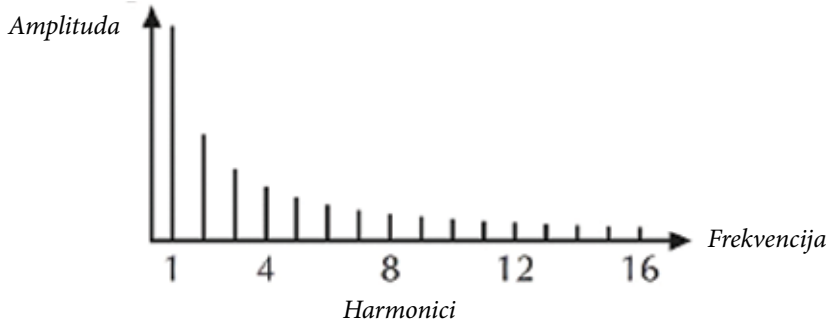
Analogno izrazu (1-15), k -ti harmonik će iznositi:

$$\frac{\sin(k\omega n)}{k\pi} \quad (1-16)$$

što na kraju rezultuje Furijeovom serijom za testerasti talasni oblik, koja je definisana jednačinom (1-17):

$$s[n] \approx \frac{1}{\pi} \left[\sin(\omega n) + \frac{\sin(2\omega n)}{2} + \frac{\sin(3\omega n)}{3} + \dots + \frac{\sin(k\omega n)}{k} \right] \quad (1-17)$$

Harmonijska (Furijeova) struktura testerastog talasnog oblika je prikazana na slici 1.7. Uočavamo da testerasti talasni oblik sadrži sve harmonike, i da njihova amplituda pada obrnuto proporcionalno umnošku frekvencije fundamentalnog harmonika (1/2, 1/3, 1/4, i tako dalje).



Slika 1.7: Harmonski niz testerastog talasnog oblika

Pravougani talasni oblik

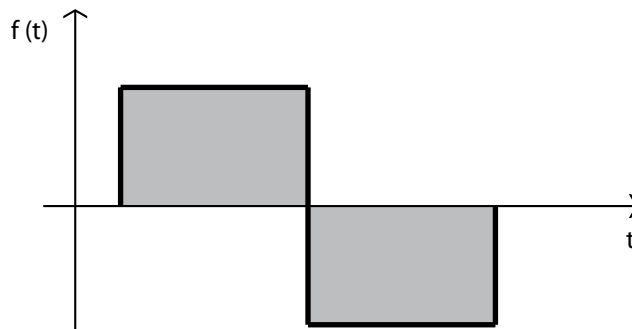
Kako bi dobili Furijeovu seriju za pravougaoni i trouglasti talasni oblik, koji dele slične spektralne karakteristike po pitanju rasporeda harmonika, razmotrimo izraz (1-18):

$$x[n] = s[n] - s\left[n - \frac{N}{2}\right] \quad (1-18)$$

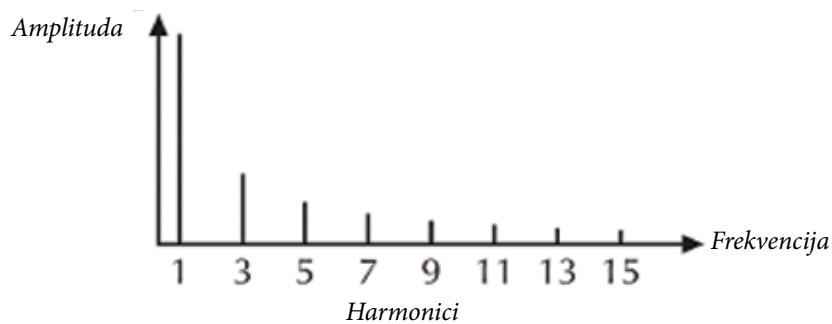
koji je jednak 1/2 za prvu polovinu ciklusa ($0 \leq n < N/2$), i -1/2 za drugu polovinu. Furijeovu seriju pravougaonog talasnog oblika dobijamo uvrstavajući Furijeovu seriju za $s[n]$ (izraz (1-17)) dva puta, što rezultira jednačinom (1-19):

$$\begin{aligned} x[n] &= \frac{1}{\pi} \left[\sin(\omega n) + \frac{\sin(2\omega n)}{2} + \frac{\sin(3\omega n)}{3} + \dots - \sin(\omega n) + \frac{\sin(2\omega n)}{2k} - \frac{\sin(3\omega n)}{3} \pm \dots \right] \\ &= \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega n) + \frac{\sin(3\omega n)}{3} + \frac{\sin(5\omega n)}{5} + \dots + \frac{\sin[(2k-1)\omega n]}{2k-1} \right] \end{aligned} \quad (1-19)$$

Uočavamo da pravougaoni talasni oblik sadrži samo neparne harmonike, i da njihova amplituda opada obrnuto proporcionalno umnošku frekvencije fundamentalnog harmonika, slično kao kod testerastog talasnog oblika. Harmonijski(Furijev) niz spektra signala pravougaonog talasnog oblika je prikazana na slici 1.9.



Slika 1.8: Signal pravougaonog talasnog oblika



Slika 1.9: Harmonski niz signala pravougaonog talasnog oblika

Trougaoni talasni oblik

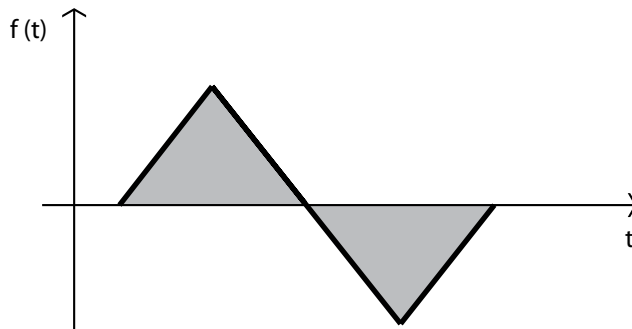
Simetrični trougaoni talasni oblik definišemo izrazom (1-20).

$$x[n] = 8p[n] - 8p\left[n - \frac{N}{2}\right] \quad (1-20)$$

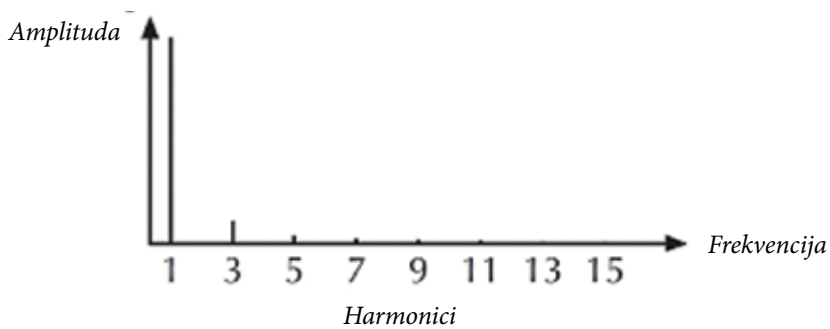
Uvršćavanjem Furijeove serije za $p[n]$ (1-17) dva puta, dobijamo Furijeovu seriju trougaonog talasnog oblika (1-21).

$$x[n] \approx \frac{8}{\pi} \left[\sin(\omega n) + \frac{\sin(3\omega n)}{9} + \frac{\sin(5\omega n)}{25} + \dots + \frac{\sin[(2k-1)\omega n]}{(2k-1)^2} \right] \quad (1-21)$$

Uočavamo kako i trouglasti talasni oblik sadrži samo neparne harmonike, no njihova amplituda opada obrnuto proporcionalno kvadratu umnožaka frekvencije fundamentalnog harmonika, čime se dobija harmonski (Furijev) niz prikazan na slici 1.11.



Slika 1.10: Signal trougaonog talasnog oblika



Slika 1.11: Harmonski niz signala trougaonog talasnog oblika

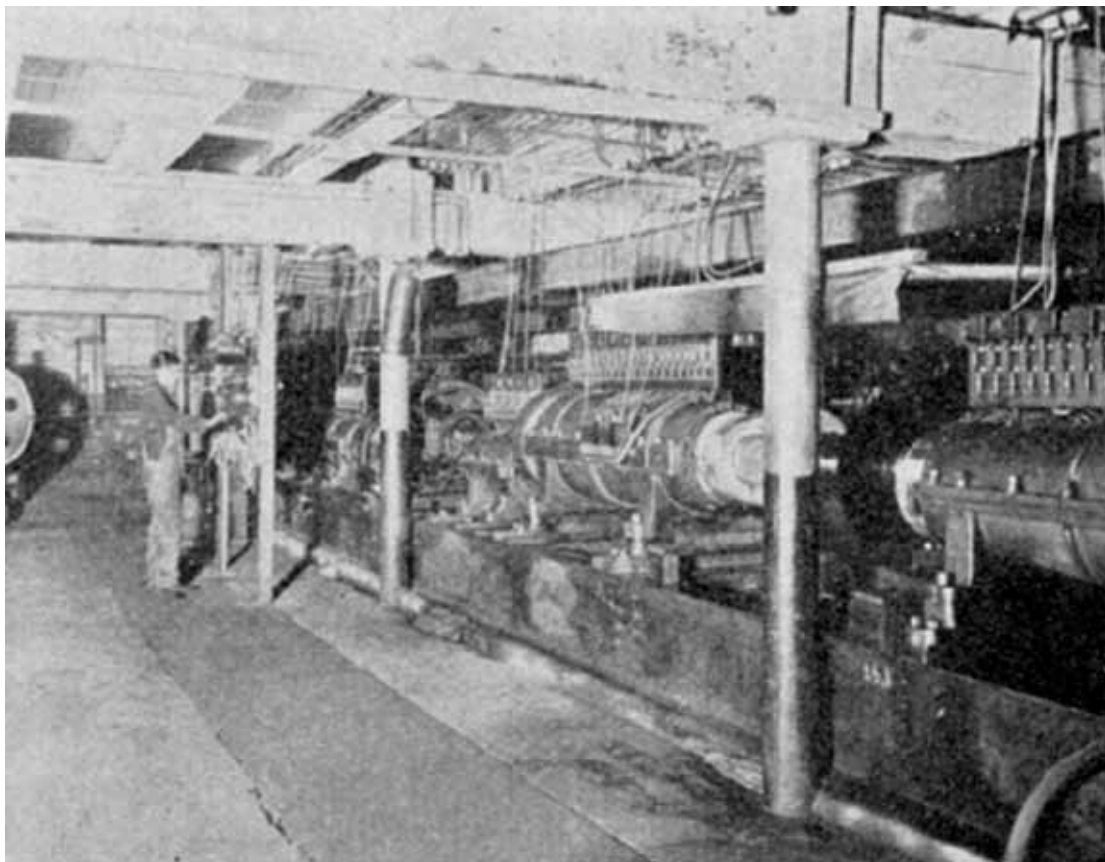
1.4 Praktična primena aditivne sinteze

Princip aditivne sinteze se od davnina koristi kod crkvenih orgulja: određene cevi (kod orgulja se nazivaju registri) generišu talasne oblike bliske sinusoidalnim koji se onda po prilici mogu mešati u raznim kombinacijama što je orguljama davalo prilično širok spektar različitih zvukova. Osnovni tonovi su proizvođeni sistemom cevi, pri čemu je postojala jasna korelacija između frekvencije tona kojeg proizvodi cev i dužine te cevi. Tako je cev dužine 8 stopa proizvodila fundamentalnu frekvenciju, dvostruko kraća cev (4 stope) je proizvodila ton dvostruko veće frekvencije (oktava više), a cev dužine 16 stopa je proizvodila prvi subharmonik, ton koji je dvostruko manje frekvencije (oktava niže), i tako dalje.

Vodeći se principima Furijeove teorije, 1860. godine, nemački naučnik Hermann von Helmholtz je konstruisao prvi namenski sintetizator zvuka, odnosno elektro-mehanički sklop koji je bio u stanju da od osnovnih, prostih tonova generiše složen ton. Ovaj uređaj je bio baziran na tada praktično jedinom izvoru prostog, sinusnog tona – zvučnoj viljušci. Okidanje zvučnih viljušaka bilo je kontrolisano električnim putem, čime je bilo omogućeno sabiranje njihovih pojedinačnih tonova u jednom trenutku.

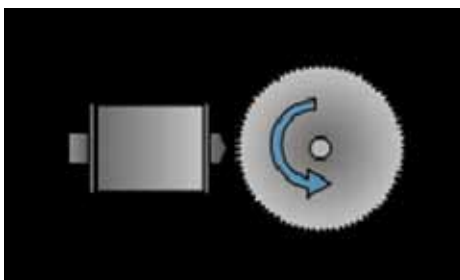
Na prelazu iz XIX u XX vek, Amerikanac Thaddeus Cahhil dizajnirao je uređaj koji se smatra prvim za sviranje realno upotrebljivim sintetizatorom zvuka, koji je dobio naziv Tellharmonium. Ovaj uređaj je bio polifon i svirao se putem standardne klavijature osetljive na pritisak. Dirke klavijature su kontrolisale sistem motora i alternatora koji su se okretali velikim brzinama, čije su učestanosti padale u čujni opseg. Na ovaj način je generisan niz prostih sinusoidalnih tonova koji su činili osnov za dalju sintezu složenog zvuka. I pored ovih interesantnih karakteristika i dobro zamišljenog sistema rada, uređaj nikada nije zaživeo u muzičkoj praksi, pre svega iz razloga ogromne mase (bio je težak oko 200 tona) i problema sa transportom (morao se transportovati vozom) i instaliranjem.

Aditivna sinteza, kao jedina realno ostvariva na nivou tadašnjeg tehnološkog razvoja, koji je podrazumevao kombinovanje električnih i mehaničkih rešenja, svoj zlatni period beleži u prvoj polovini XX veka, zaključno sa i danas popularnim i rado sviranim Hammond orguljama. Njihov tvorac, Laurens Hammond, osnovni princip rada koji podrazumeva mehaničku rotaciju kretnih elemenata sa kružnim brzinama koje upadaju u čujni frekvencijski opseg, preuzeo je od Tellharmonium-a. Hammond je tu osnovnu ideju tehnološki unapredio u smislu veličine i tipa rotirajućih elemenata i ukupne električne kontrole sistema.



Slika 1.12: Mašinsko postrojenje koje je obezbeđivalo rad Tellharmonium-a

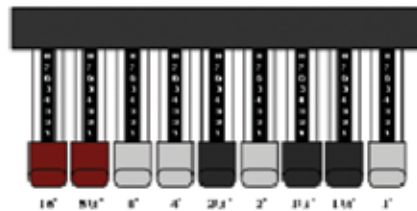
Prvi u javnosti predstavljen model imao je, kao srce sistema, električni motor koji je kontrolisao osovinu na kojoj se nalazio 91 metalni disk, svaki različite veličine. Diskovi su bili nazubljeni i rotirali su različitim ugaonim brzinama ispred pick-up jedinica, koje su na sebi imale namotan provodnik, i unutar kojih se nalazio stalan magnet (vidi sliku 1.13).



Slika 1.13: Prikaz mehanizma za generisanje struje prostog sinusnog oblika kod Hammond orgulja

Naizmenično smenjivanje metalnih nazubljenih delova neposredno ispred pick-up jedinice, dovodi do promena u magnetnom polju stalnog magneta što, po principu elektromagnetne indukcije, dovodi do generisanja naizmenične struje čija frekvencija direktno zavisi od brzine rotiranja diska. Kako se diskovi okreću brzinama koje odgovaraju učestanostima u čujnom opsegu, na izlazu iz ovog sistema se generišu proste sinusoidalne struje čijim se kombinovanjem generišu složeni tonovi, koji se preko sistema pojačavača reprodukuju na za to namenskom zvučniku. U jednom trenutku je bilo omogućeno kombinovanje 9 ovakvih prostih signala.

Oblikovanje anvelope ovako generisanog signala složenog spektra je na ovom instrumentu rešeno sistemom od 9 poluga (engl. drawbars), kojima se mogao regulisati nivo svakog od maksimalno 9 harmonika u spektru signala koji je u jednom trenutku bio generisan (*slika 1.14*) Svaka od 9 poluga je bila graduisana sa 8 diskretnih nivoa, koji su se generisali manjim ili većim izvlačenjem/uvlačenjem poluge.



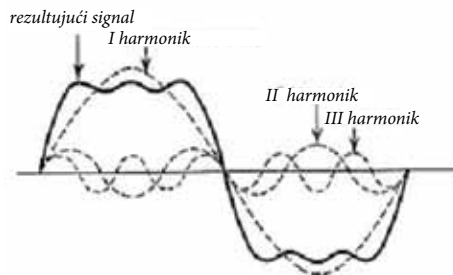
Slika 1.14: Sistem poluga za dodatnu manipulaciju strukturom tona kod Hammond orgulja

Pritiskanjem određene dirke na klavijaturi uključivao se zvuk koga bi generisao samo jedan disk, i na taj način se čuo prost ton. Uključivanjem određenih registara na instrumentu, pritiskanje dirke je uključivalo zvuk generisan od strane dva ili više diskova. Klasična struktura Hammond orgulja, na taj način posmatrano, je dakle sastavljena od 9 oscilatora, 9 pojačavača, električnog miksera i kontrole koja uključuje i isključuje određene pojačavače. Regulisanjem amplitude svakog od devedeset i jednog oscilatora sistemom 9 višestepenih poluga moguće je ostvariti na stotine hiljada različitih kombinacija zvukova, što je za ono vreme bila prava revolucija.

Uz pomoć Hammond orgulja, dakle, mogao je da se generiše ogroman broj talasnih oblika, ali generisani zvuk bio je statičan i jednoličan. Nijedan parametar se nije mogao menjao za vreme sviranja određene note. Zato su u kasnijim modelima na izlazu iz miksera dodati naponski kontrolisani filter i naponski kontrolisani pojačavač, koji su, menjajući spektar i amplitudu u vremenu, učinili zvuk dinamičnim.

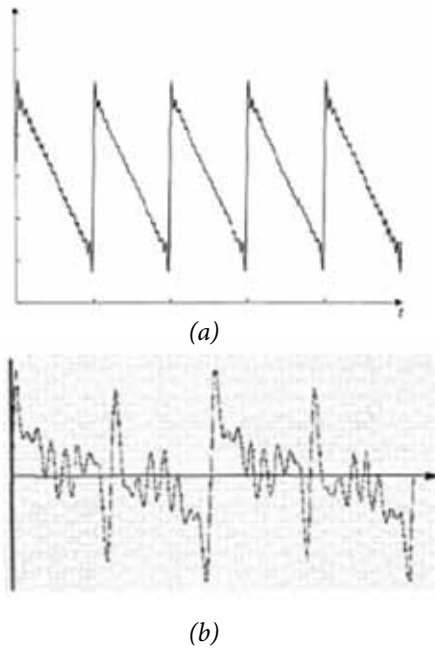
Iako najprostija po osnovnom principu rada, aditivna sinteza je, pogotovo za potrebe generisanja realnih zvukova (imitativna sinteza), izuzetno zahtevna za implementaciju: potrebno je raspolagati velikim brojem oscilatora (i po nekoliko desetina sinusnih oscilatora), od kojih svaki mora imati mogućnost kontrole dinamike (postojanje velikog broja anvelopa ADSR generatora). Kontrola ovakvih elektronskih sklopova u analognoj izvedbi je praktično neostvariva, tako da je njena puna snaga i upotrebljivost u postupcima imitativne sinteze morala sačekati pojavu digitalnih tehnologija.

Broj od 9 oscilatora po instrumentu, koji se često sretao kao neka vrsta standarda u ranoj fazi razvoja aditivne sinteze, bio je kompromis između realnih potreba i mogućnosti u to vreme, ali to nikako nije bilo dovoljno za preciznije sintetisanje realnih zvukova. Postojanje velikog broja sinusnih oscilatora svoje opravdanje traži u činjenici da je složene talasne oblike do kraja precizno moguće rekonstruisati samo korišćenjem celog harmonskog niza koji ih opisuje. Takav harmonijski niz može imati jako puno komponenti, koje moraju biti savaka za sebe ponaosob generisane sopstvenim oscilatorom. Korišćenjem prvih nekoliko harmonika moguće je samo delimično rekonstruisati talasni oblik. Tako, na primer, na *slici 1.15* je dat je talasni oblik signala četvrtke, rekonstruisan na osnovu svojih prva tri harmonika u nizu.



Slika 1.15: Izgled rezultujućeg talasnog oblika pravougaonog signala, nastalog sabiranjem prve tri komponente u harmonskom nizu

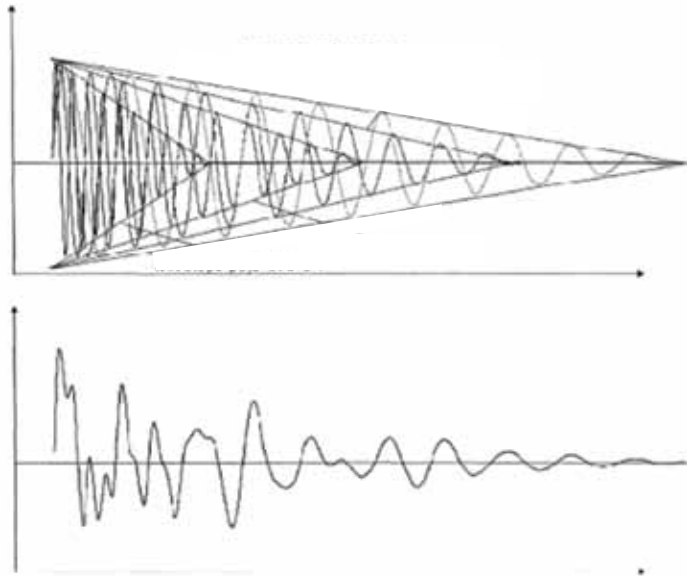
Kao što se sa slike vidi, talasni oblik ovako sintetisanog signala samo delimično liči na signal idealne četvrtke. Svako sledeće dodavanje harmonika u spektru će činiti da signal sve više teži idealnom, što dovodi do zaključka da će preciznost sinteze direktno zavisiti od broja oscilatora koje imamo na raspolaganju. U vidu treba imati i da se talasni oblik signala može drastično promeniti ako amplitude harmonika uzimamo proizvoljno, tj. da je zbilja neophodna precizna kontrola nivoa svakog harmonika ponaosob. U tom smislu na *slici 1.16a* je prikazana situacija u kojoj je testerasti signal formiran uz pomoć prvih 9 harmonika, čije amplitude stoje u pravilnom opadajućem nizu, dok je na *slici 1.16b* prikazan signal dobijen sumiranjem istog harmonskog niza, kod kojeg su amplitude svih harmonika dovedene na nivo osnovnog. Nije teško uočiti veliku razliku u izgledu talasnog oblika ova dva signala sintetisana upotrebom istih harmonika različitih amplituda.



Slika 1.16: Izgled talasnog oblika testerastog signala formiranog uz pomoć prvih devet harmonika jednakih amplituda (a) i amplituda koje stoje u pravilnom opadajućem nizu (b)

Da bi do kraja uvideli potrebnu strukturu aditivnog sintisajzera, moramo razmotriti generisanje realnih zvukova, poput zvuka okidanja žice na gitari. Iz iskustva znamo da je on za vreme okidanja jak i pun, a vremenom postaje tiši i “mračniji”. Da bi aditivni sintetizator mogao da proizvede ovaj zvuk, morao bi da ima vremensku kontrolu menjanja amplitude na svakom od oscilatora. Isto tako, iz iskustva znamo da je na početku okidanja zvuk pun jer sadrži jake više harmonike, a da se vremenom amplitude viših učestanosti smanjuju. Ustvari, vremenom i viši i niži harmonici slabe, ali niži slabe sporije od viših. Dalje, moramo simulirati i promenu amplitude za vreme trajanja note i kreirati profile za filter i pojačavač za većinu instrumenata.

Međutim, kontrolišući amplitudu harmonika u vremenu, štedimo na izlaznom filteru i pojačavaču. Filter oblikuje izlazni spektar signala, a to se isto može postići i kontrolisanjem pojačanja svake komponente na izlazu iz oscilatora. Proporcionalnim pojačanjem i slabljenjem svake komponente može se uticati i na anvelopu izlaznog signala. Na osnovu opisanog, možemo aditivnom sintezom rekonstruisati zvuk okidanja žice na gitari. Recimo da oscilator 1 generiše sinusoidu na osnovnoj učestanosti (1. harmonik), oscilator 2 - sinusoidu na dva puta većoj učestanosti (drugi harmonik) itd. Isto tako pretpostavimo da pojačavač 1 proporcionalno utišava zvuk oscilatora 1 do tišine za neko vreme T , pojačavač 2 proporcionalno utišava zvuk na izlazu oscilatora 2 do tišine za polovinu vremena - $T/2$ itd. U ovom primeru, kao i u realnom slučaju, amplitude nižih harmonika sporije slabe. Talasni oblici 4 harmonika i



Slika 1.17: Prikaz slabljenja pojedinih harmonika u spektru signala koji za cilj ima sintezu zvuka žičanog instrumenta

promena njihovih amplituda koja se odvija na upravo opisan način, kao i rezultujući talasni oblik na taj način sintetisanog signala su prikazani na *slici 1.17*.

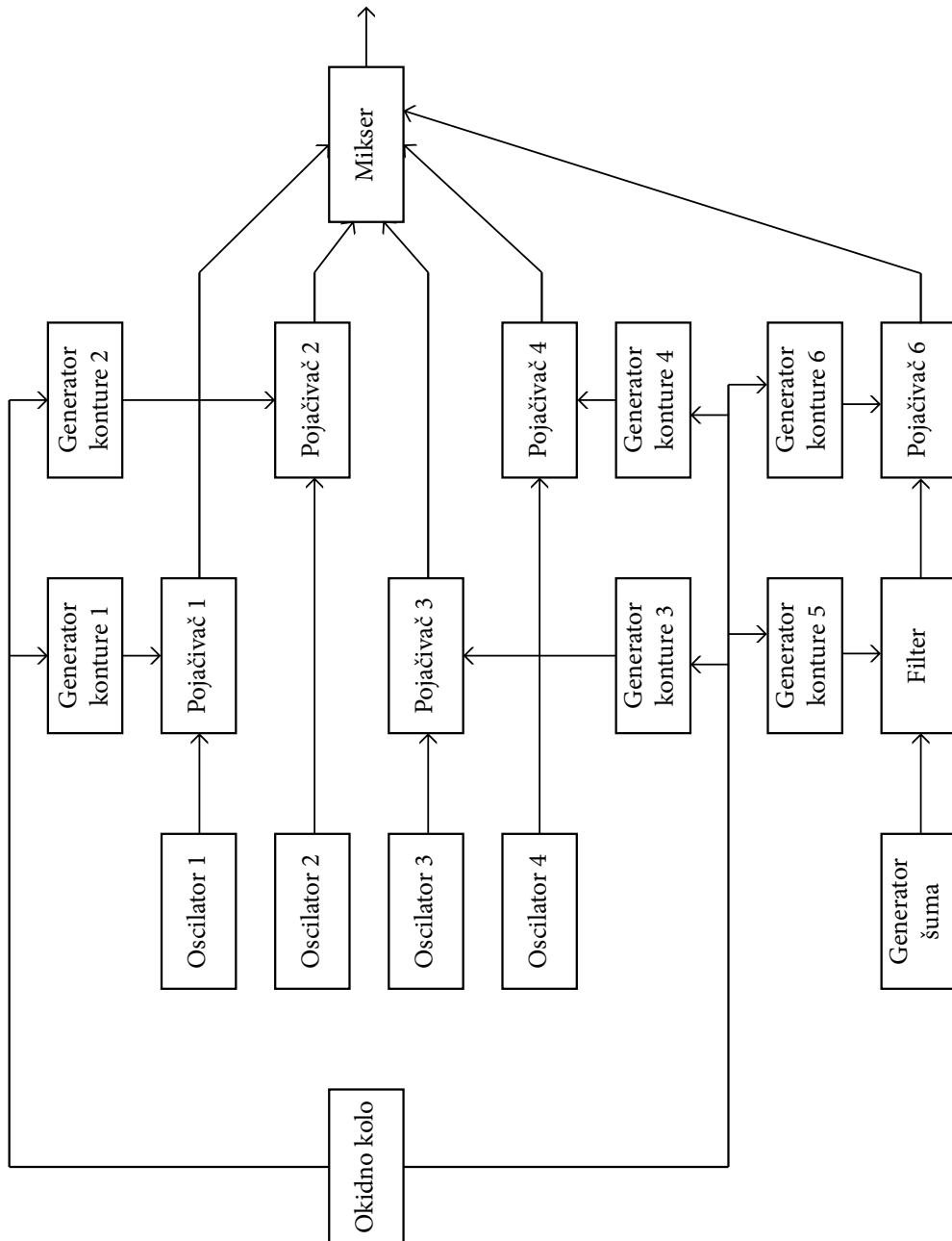
Treba napomenuti da postoje i instrumenti kod kojih uporedo sa slabljenjem određenih učestanosti u vremenu, neke druge amplitude inicijalno slabe, zatim se pojačavaju, pa opet slabe. Ovo je dodatni zahtev koji se mora rešavati precizno vremenski kontrolisanim generatorima anvelopa.

Obzirom da postoji puno zvukova koji nisu periodični, nameće se pitanje kako rekonstruisati njihov talasni oblik. Proučimo zvukove koje stvaraju neki instrumenti u orkestru, na primer, flauta i truba. Odgovarajućom analizom se iz njihovih zvukova mogu izdvojiti periodične komponente. Međutim, oduzimanjem ovih komponenti od originalnog zvuka ostaće neperiodična komponenta - šum. Dakle, prirodni instrumenti reprodukuju i neperiodične zvukove koji se ne mogu regenerisati sinusoidama. Tako se, u aditivnoj sintezi, ovi zvuci sintetišu uz pomoć generatora šuma. Neperiodični generatori zvuka nemaju spektar teoretski belog ili ružičastog šuma, već su filtrirani upotrebom realnih filtera. Da bi se postigla prirodna promena spektra u vremenu, pojačanje i ovog generatora, kao i kod oscilatora, treba da bude kontrolisano od strane generatora konture. Na *slici 1.18* prikazana je sveobuhvatnija blok šema aditivnog sintisajzera. Pojava digitalnih procesora uslovila je vrlo jednostavno funkcionisanje oscilatora, miksera, pojačavača i generatora kontura. Obzirom

da se digitalnom Furijeovom transformacijom (inverznom) iz zamišljenog spektra može na jednostavan način dobiti talasni oblik u vremenskom domenu, današnji aditivni sintizajzeri se nazivaju i Furijeovim sintisajzerima.

Tržište je vrlo siromašno instrumentima ove vrste; postoje samo dva uređaja pristupačnih cena: Kawai K5000 i Kurzweil K150FS. Neki sintisajzeri nude mogućnost generisanja talasnih funkcija crtanjem njihovog oblika ili specificiranjem amplituda što je rudimentarna i apstraktna verzija aditivne sinteze.

Moderni višejezgreni procesori su dovoljno snažni kako bi mogli u realnom vremenu računati sa velikim brojem harmonika (i do nekoliko stotina), pa su virtuelni instrumenti koji koriste aditivnu sintezu puno češći nego njihovi hardverski pandani. Takvi instrumenti neretko poseduju mogućnost resinteze zvuka, koja korišćenjem Furijeove analize razbija uzorak zvuka na osnovne harmonike, te prati njihove promene kroz vreme, koristeći kasnije te informacije u postupku sinteze. Korisnik tada može uticati na rezultate resinteze, i potpuno promeniti karakter zvuka. Na taj način, od zvuka klavira se može napraviti zvuk orgulja, koji će sadržati osnovni karakter zvuka klavira – mogućnosti su neograničene. Primer takvog specijaliziranog virtuelnog instrumenta je Camel Audio Cameleon5000, danas veoma često korišćen softverski aditivni sintisajzer.



Slika 1.18: Blok dijagram tipičnog aditivnog sintisajzera

REZIME I PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

U poglavlju *Aditivna sinteza* izloženi su osnovni pojmovi vezani za sintezu zvuka u opštem smislu. Objasnjena je Furijeova analiza signala koja leži u osnovi postupka aditivne sinteze zvuka. Zatim su opisani osnovni tipovi signala koji se koriste u postupcima sinteze. Nakon kratkog opisa istorijskog razvoja ovog tipa sinteze, pojašnjeni su principi rada pojedinih važnijih uređaja čiji se rad zasniva na ovoj sintezi.

1. Šta je sinteza zvuka?
2. Koja su dva osnovna tipa sinteze zvuka?
3. Objasniti osnovni princip aditivne sinteze zvuka.
4. Objasniti osnovne postulate Furijeove analize signala.
5. Objasniti osnovne karakteristike i skicirati vremenski i spektralni oblik testerastog signala.
6. Objasniti osnovne karakteristike i skicirati vremenski i spektralni oblik pravougaonog signala.
7. Objasniti osnovne karakteristike i skicirati vremenski i spektralni oblik trougaonog signala.
8. Objasniti princip rada Hammond orgulja.
9. Objasniti princip generisanja periodičnih tonova postupkom aditivne sinteze.
10. Objasniti princip generisanja neperiodičnih tonova postupkom aditivne sinteze.
11. Nacrtati principsku blok šemu funkcionalnog aditivnog sintisajzera.

KLJUČNE REČI

Sinteza zvuka, Talasni oblik signala, Furijeova analiza, Aditivna sinteza zvuka, Telharmonijum, Hammond orgulje.

SUBTRAKTIVNA SINTEZA

II deo

Drugo poglavlje uvodi u oblast Subtraktivne sinteze kroz predstavljanje tri tematske celine: Osnovni principi (2.1), Filtriranje (2.2) i Modulacija (2.3). Na taj način, student se detaljnije upoznaje sa sledećim temama:

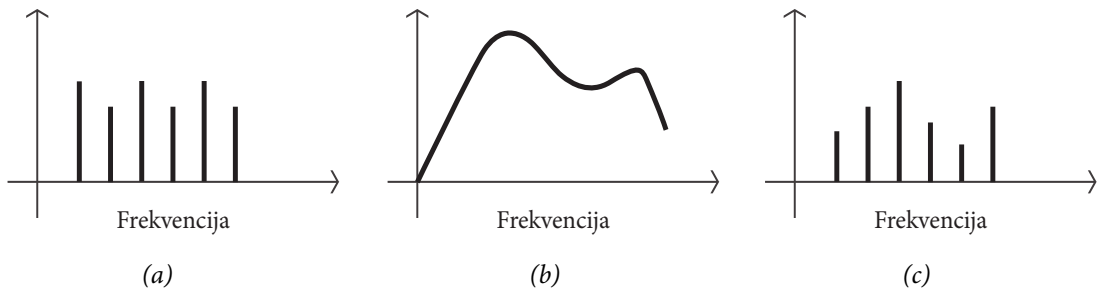
- 1. Osnovni principi subtraktivne sinteze*
- 2. Osnovna blok šema subtraktivnog sintetizatora zvuka*
- 3. Oscilatori osnovnih talasnih oblika koji se koriste u postupku subtraktivne sinteze zvuka*
- 4. Filtracija signala u postupku subtraktivne sinteze zvuka*
- 5. Uticaj i primena neidealnosti korišćenih elemenata u postupku subtraktivne sinteze zvuka*
- 6. Primena modulacije u subtraktivnoj sintezi zvuka*
- 7. LFO generatori*

2.1 Osnovni principi

Subtraktivna sinteza (subtrakcija – oduzimanje) je tip sinteze baziran na principu oduzimanja i oblikovanja spektara početnih, širokopolasnih signala. Signali koji se najčešće koriste kao osnov za dalja postupanja u procesu subtraktivne sinteze u vremenskom domenu imaju oblike četvrtke i trouglasto/testerastog oblika, koji imaju široke i pravilne spektre pogodne za kreiranje muzičkih tonova. Šumovi se u ovom tipu sinteze često i rado koriste kao osnov za kreiranje perkusivnih tipova zvukova.

Ideja koja stoji u osnovi subtraktivne sinteze je intuitivna i nameće se sama po sebi. Nagli razvoj analogne audio elektronike u dekadi 60-ih godina prošlog veka, omogućio je da se ovakva ideja relativno lako i sprovede u delo: nakon jednovjekovne vladavine aditivnog koncepta sinteze, subtraktivna sinteza postaje dostupna i suvereno vlada tržištem sintisajzera sve do početka digitalne revolucije s početka 80-ih godina XX veka.

Subtraktivna sinteza jeste vrsta fizičkog modelovanja analognog tipa. Elektronski sklopovi koji se koriste u njenoj realizaciji su idejno kompletno bazirani na analizi kontrolisanog akustičkog zvučnog sistema, koji se uvek i iznova sastoji od ekscitatora, oscilatora i rezonatora.



Slika 2.1: Prikaz principa formiranja tona akustične gitare: (a) harmonski niz generisan okidanjem žice, (b) formtni oblik tela akustične gitare i (c) rezultujući signal zvuka.

U tom smislu, u postupku subtraktivne sinteze se koriste sledeći elektronski sklopovi:

1. Oscilatori. Generišu početnu talasnu formu, najčešće signale širokog spektra. Uobičajeno je da sintisajzeri imaju više od jednog oscilatora koji se daju korisniku na raspolaganje.

2. Filter. Koristi se za spektralno oblikovanje signala oscilatora. U dizajnu sintisajzera često se sreću modeli sa po jednim filterom koji „opslužuje“ veći broj oscilatora. Luksuznija varijanta podrazumeva postojanje namenskog filtra za svaki od oscilatora u multioscillatornom sintisajzeru.

3. Pojačavačka sekcija. Koristi se za kontrolisanje nivoa signala u vremenu. U okviru ove sekcije nalazi se i anvelopa modul, koji obezbeđuje postojanje ADSR tipa kontrole pojačanja signala. I u slučaju ove sekcije, skuplji sintisajzeri se odlikuju postojanjem većeg broja anvelopa modula.

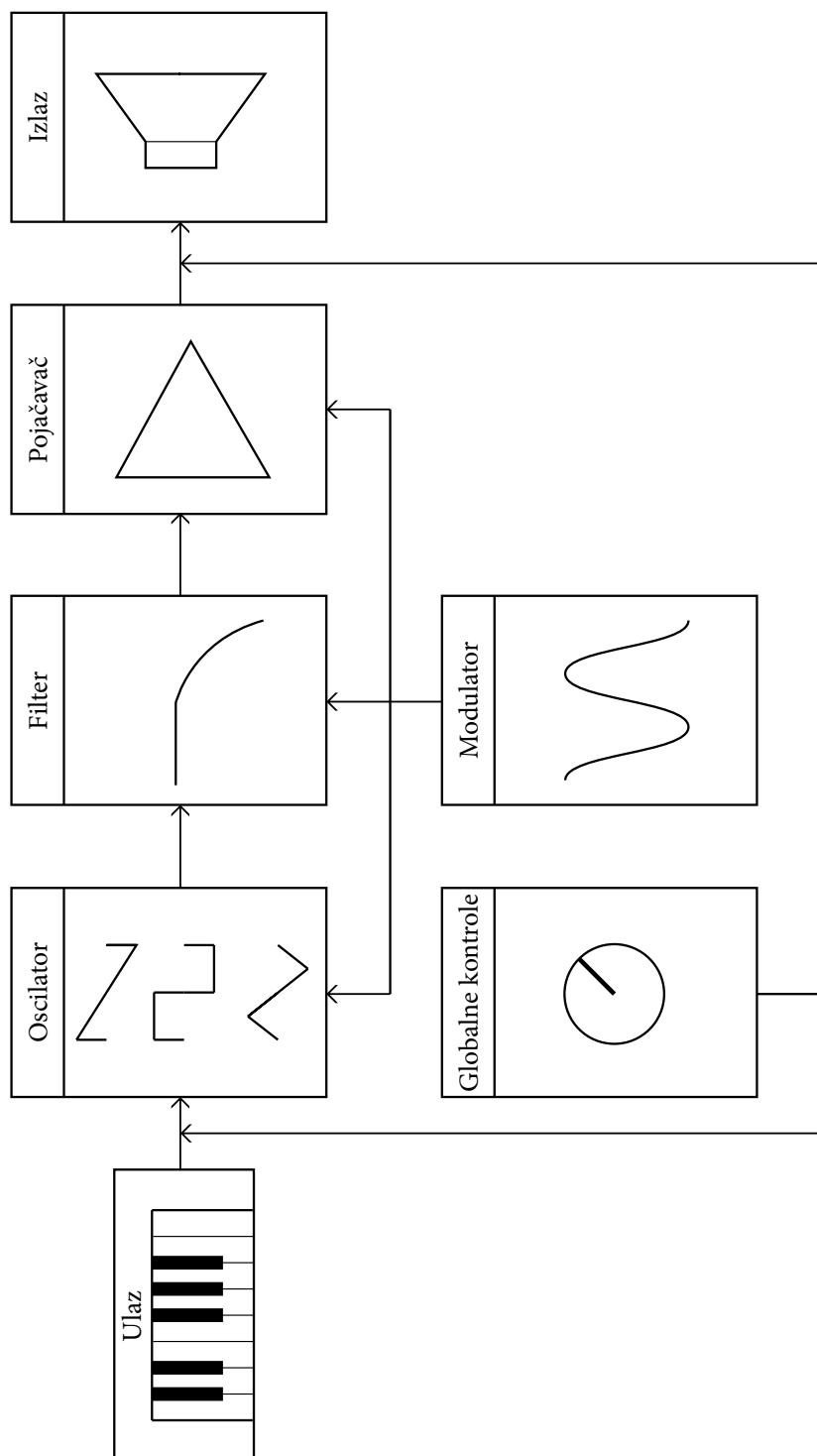
Ova tri tipa elektronskih sklopova čine neophodnu bazu za realizaciju postupka subtraktivne sinteze.

U cilju postizanje veće realističnosti i kontrole ovako generisanog zvuka, u postupku subtraktivne sinteze se kao po pravilu koriste i:

4. Modulatori. Kao što ima samo ime kaže, ovi elektronski sklopovi se koriste u cilju modulacije prethodno generisanih signala. Svaka vrsta vibrata, tremola ili nekog drugačijeg podrhtavanja i promene zvuka u vremenu, što je karakteristika praktično svih realnih zvučnih izvora, bila bi nemoguća bez modulatora. Modulatori se na sintisajzerima izvode kao automatski i manuelni. Automatski modulatori su kao po pravilu niskofrekvencijski, LFO oscilatori (eng. *Low Frequency Oscillator*), dok se u svrhe manuelne kontrole modulacije koja se primenjuje na osnovni zvuk koriste namenski točkići (eng. *wheels*), tzv. šabanajzeri.

5. Globalne kontrole. Ovim terminom se označavaju svi dodatni elektronski sklopovi koji muzičarima omogućavaju dodatne kontrole, komfor i kvalitet izraza u sviranju.

Blok šema kojom se povezuju svi opisani elementi je prikazana na slici 2.2.



Slika 2.2: Blok šema tipičnog subtraktivnog sintisajzera

Kao što je prethodno rečeno, standardni tipovi signala koji se koriste u postupcima subtraktivne sinteze su:

1. Četvrtke
2. Trouglasti signali
3. Testerasti signali
4. Šumovi

Razmotrimo ponašanje karakteristike svakog od ovih tipova signala.

Pravougaoni signali su signali koji u toku jednog ciklusa imaju dva stanja: stanje nule i stanje punog nivoa signala. Pravougaoni signali se deklarišu procentualnim odnosima ova dva stanja. Izgled spektra je takav da je pobuđen ceo harmonski niz, ali su pri tome neparni harmonici favorizovani: kako se pravougaoni signal približava odnosu 50 - 50% parnih harmonika je sve manje i manje.

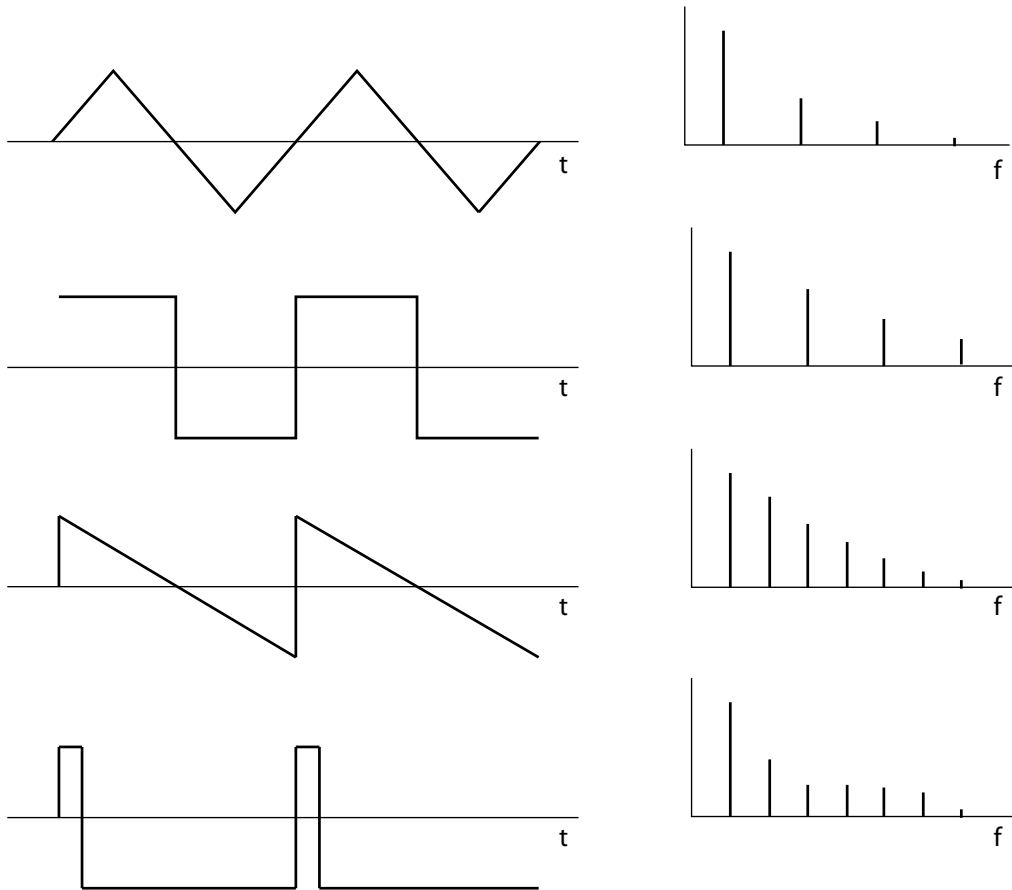
Zbog tonalne karakteristike ovakvog tipa signala, koji se na engleskom jeziku opisuje terminima *hollow* i *woody-sounding*, ovaj tip signala se rado koristi kao početni u svrhe formiranja tonova koji liče na one koji se proizvode duvačkim instrumentima sa trskom, različiti pokrivaajući zvuci i boje, kao i fini bas zvuci. Takođe se sreće i u emulacijama zvukova bas bubnja, perkusivnih instrumenata. Za takve potrebe kao po pravilu se kombinuje sa izlazima iz drugih oscilatora, poput oscilatora šuma i sl.

Harmonska struktura se karakteriše pobuđenim nizom neparnih harmonika. Tačan izgled ovog niza u frekvencijskom domenu zavisi od pravilnosti izgleda pravouganog signala u vremenskom domenu. Što je izgled bliži teoretskoj pravilnosti, harmonski niz je uravnoteženiji i bliži idelanom.

U tonalnom smislu se ova težnja pravilnosti karakteriše sve većim prisustvom nazalne komponente u ukupnom zvuku, što treba imati na umu prilikom kreiranja zvukova limenih duvača, basova i sl.

Trougaoni signal takođe poseduje samo neparne harmonike u spektru, ali za razliku od četvrtke, kod trougla dolazi do bitnijeg opadanja viših harmonika. Ovo se pojavljuje kao mekoća u tonalnom prikazu, što ovakve signale čini pogodnim za kreiranje zvuka flaute, različitih mekih pozadinskih boja i sl.

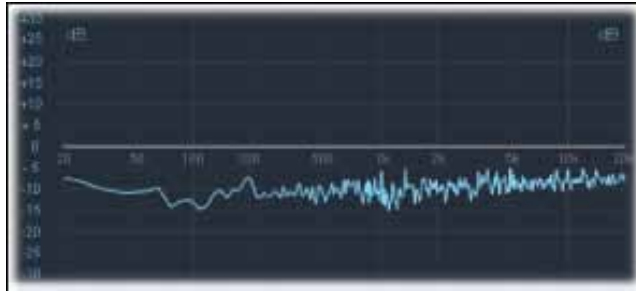
Testerasti signali pobuđuju sve harmonike u harmonskom nizu, pri čemu je njihovo opadanje ravnomerno, slično kao kod pravougaonih signala. U tonalnom smislu, ova činjenica se manifestuje jasnim i svetlim zvukom pogodnim za dalje generisanje žičanih, duvačkih i sličnih zvukova. Šumovi se, kao što je već rečeno, kao po pravilu koriste za generisanje perkusivnih tipova zvukova, ali i zvukova poput zvuka vetra, mora i sl.



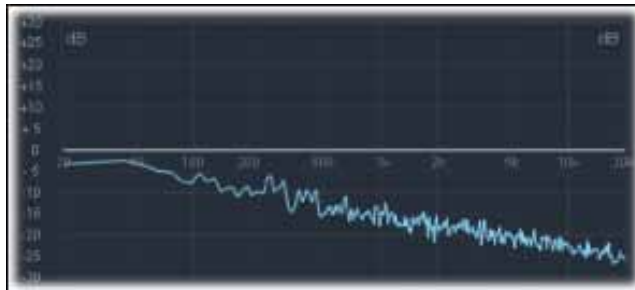
Slika 2.3: Standardni talasni oblici i spektri signala oscilatora u subtraktivnoj sintezi

Beli šum, verovatno najčešće sretan na izlazima iz oscilatora, pogodan je za dalju obradu jer ima ravnomerno sve harmonike u spektru. Treba imati na umu da je energija u poslednjoj oktavi spektra ovog šuma za skoro 30 dB viša od energije zvuka u najnižoj oktavi u spektru. Ovo u tonalnom smislu znači da je to izrazito svetao zvuk, sa procentualno malom količinom energije u opsegu niskih frekvencija. Ovakav tonalni karakter je pogodan za formiranje perkusivnih zvukova tipa doboša, na primer. Obojeni šumovi takođe pobuđuju sve harmonike, ali se pri tome neki od njih potiskuju.

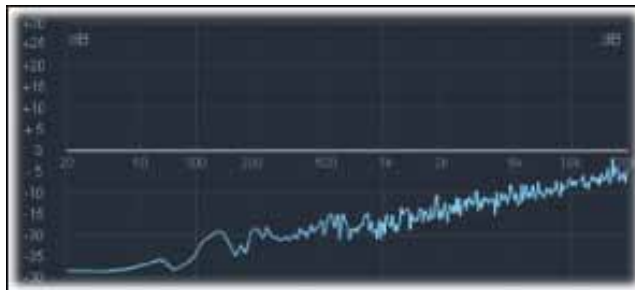
Ružičasti šum je šum kod kojeg je ukupna snaga harmonika u svakoj oktavi u spektru podjednaka. To znači da se on može formirati uz korišćenje filtera koji slabi harmonike stopom od 3 dB/okt koji se postavlja na izlazu iz generatora belog šuma. Ovaj zvuk se odlikuje znatno impozantnijim tonalnim karakterom u opsegu niskih frekvencija, te se kao takav može koristiti u generisanju bas bubanj tipa zvukova.



(a)



(b)



(c)

Slika 2.4: (a) beli šum, (b) roze šum, (c) plavi šum

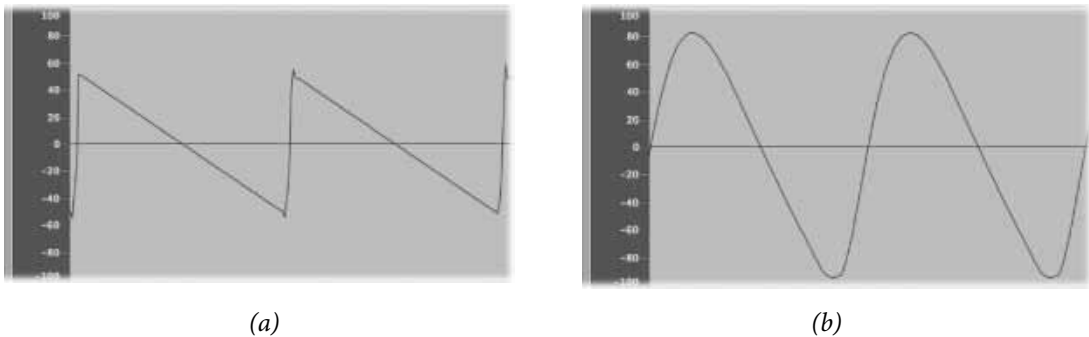
Ukoliko želite još više energije u opsegu niskih frekvencija, od ružičastog klizite ka crvenom šumu, koji se u audio tehnici definiše kao beli šum oslabljen filtrom čija je kriva opadanja na nivou od 6 dB/okt.

Ukoliko vam treba istaknuta regija visokih frekvencija, možete beli šum filtrirati tako da primenite filter sa krivom koja obezbeđuje porast energije od 3 dB/okt. U tom slučaju, znajte da imate posla sa plavim šumom, i čuvajte svoje visokotonske zvučnike!

2.2 Filtriranje

U postupku subtraktivne sinteze, nakon faze generisanja početnog signala, potrebno je pozabaviti se fazom filtriranja signala, filtriranja u smislu oblikovanja harmonske strukture signala koja treba da obezbedi željeno zvučanje tona.

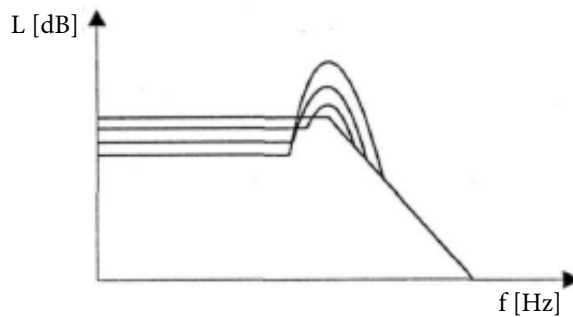
Trouglasti signali po svom izgledu podsećaju na sinusoidalne. Za razliku od njih zvuče tvrđe, jer u spektru imaju više od jedne komponente. Lep primer upotrebe filtera je prikazan na slici 2.5.



Slika 2.5: Vremenski oblik trouglastog signala pre (a) i posle (b) postupka filtriranja filtrom koji čisti sadržaj spektra iznad 2,5 kHz.

Na slici je prikazan vremenski oblik trouglastog signala pre i posle postupka filtriranja filtrom koji čisti sadržaj spektra iznad 2,5 kHz. Signal postaje vidno sličniji sinusoidalnom obliku signala, dok tonalno postaje sve mekši, sličniji zvučanju prostog sinusoidalnog signala.

Pri korišćenju filtera, kako analognih, tako i digitalnih, treba imati na umu neke činjenice koje utiču na kvalitet konačnog zvuka koji će se sintetizovati. Naime, svi realni filteri kroz koje se propusti signal u isti taj signal unose određenu dozu nečega što se opisuje terminom zvonjava (eng. *Ringing*). Zvonjava je pojava do koje dolazi u oscilatornom sistemu kalem/kondenzator, koja se manifestuje izdizanjem ukupne energije sistema na frekvencijama bliskim frekvenciji rezonanse sistema. To u praksi znači da realni filteri nemaju idealne prenosne karakteristike, kakvima se često predstavljaju, već njihove prenosne karakteristike u okolini bitne frekvencije imaju neminovan porast.



Slika 2.6: Prenosna karakteristika realnog filtra

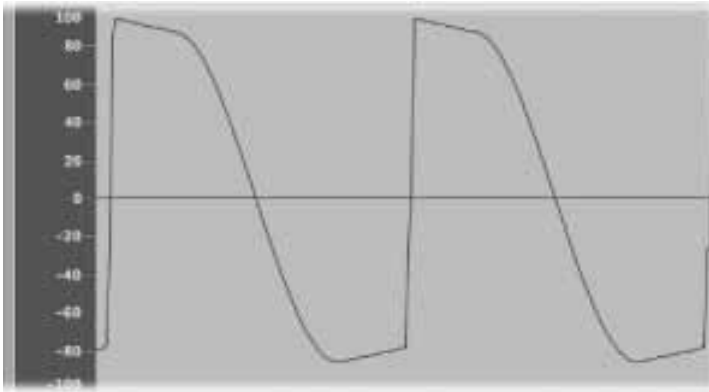
Ova karakteristika filtra se zgodno koristi u postupku subtraktivne sinteze, kroz praktičnu upotrebu parametra resonance. Ovaj parametar omogućava rezonantno izdizanje (ili utišavanje) određenih regiona u spektru početnog signala, što često jeste potrebno pri simulaciji akustičnih instrumenata, vokalnih simulatora i sl.

Na slici 2.7 je prikazan testerasti signal filtriran iznad 660 Hz, uz naglašeno korišćenje parametra Resonance. U izgledu signala jasno se uočava „zvonasta“ karakteristika, dok je tonalni karakter umekšan (zbog filtriranja). Zbog naglašenog izdizanja spektra u opsegu rezonantne učestanosti filtra, ton postaje frekvencijski istaknut pre svega u tom užem frekvencijskom opsegu. Ekstremno visoke vrednosti *resonance* parametra mogu dovesti do samooscilovanja filtra, pri čemu se generiše manje-više prosta, sinusoidalna pobuda na frekvenciji rezonanse.



Slika 2.7: Testerasti signal propušten kroz filter sa izraženim efektom zvonjave granične frekvencije od 660 Hz

Parametar Drive, koji se često sreće na instrumentima ovog tipa, omogućava dodatno izdizanje nivoa početnog signala na ulazu u filter. Elektronika filtera se na ovaj način može pobuditi na rad u režimima koji teže zasićenju, što se na prenosnu karakteristiku odražava kao pojava izobličenja usled odsecanja i specifične vrste limitovanja signala. Tonalno, ovakav zvuk postaje „prljaviji“, čvršći, manje fin.



*Slika 2.8: Izobličenje vremenskog oblika testerastog signala
usled prekomerne upotrebe drive kontrole*

2.3 Modulacija

Dodatne mogućnosti kreativnog upliva u postupak ove vrste sinteze omogućene su kroz kontrolisanu modulaciju karakteristika filtera koji se koriste. Signali na izlazu iz LFO oscilatora, koji se koriste za modulaciju različitih stvari, u ovom slučaju svojim ritmom upravljaju parametrima filtra poput granične ili centralne frekvencije. Zvuci bez modulacije imaju tendenciju da zvuče monotono. Određeni prizvuk modulacije i nestabilnosti u zvuku tokom trajanja čini da zvuk postane življi i bliži realnim izvorima zvuka. Modulator se, tako, u okviru elektronskog sklopa sintetizatora zvuka često u dizajnu može pronaći u pojačavačkom stepenu, gde služi da moduliše završno pojačanje formiranog signala.

Sam postupak modulacije može biti automatski, ili izazvan nekom neposrednom akcijom. Automatska modulacija se vrši uz opisano korišćenje LFO oscilatora koji kontinualno u vremenu vrše svoju funkciju. Izazvana modulacija se može kontrolisati ili korišćenjem opšte kontrolne površine (najčešće klavijature) ili uz pomoć namenskih kontrolera modulacije (tačkovi za modulaciju eng. – pitch wheel), raznih pedala i sl. Tako, na primer, dirke na klavijaturama koje su osetljive na dinamiku pritiska lako mogu postati kontroleri modulacije granične frekvencije filtra, čime agrsivnije sviranje uz jači pritisak na dirke klavijature za posledicu ima svetliju boju tona sintetisanog zvuka.

Pomenuti generator niskih frekvencija (LFO generator) je sastavni deo praktično svakog sintisajzera zasnovanog na principima subtraktivne sinteze. Kao što mu samo ime kaže, njegov osnovni zadatak je da generiše tonove niskih frekvencija, koje su najčešće izvan čujnog opsega čoveka. Dakle, oni ne utiču na zvuk neposredno, ali su izuzetno aktivni u automatskoj kontroli parametara signala, što se u zvuku može pojaviti kroz formu vibrata, podrhtavanja, klizanja granične frekvencije filtra itd.

LFO generator nudi nekoliko parametara čijim je podešavanjem moguće uticati na konačan rezultata modulacije. Prvi je sam izbor talasnog oblika NF signala. U tom smislu kao česti se sreću trougaoni i pravougaoni talasni oblici signala. Trougaoni signali su zgodni u aplikacijama kontrole modulacije granične frekvencije filtra ili centralne učestanosti oscilatora, dok se pravougaoni koriste u situacijama gde je potrebna nagla promena između dva različita stanja: promena visine kod efekta vibrata, promena tona za oktavu i sl.

Frekvencija ili *rate* parametar služe za kontrolu učestanosti izlaznog signala. Manje vrednosti učestanosti dovode do efekta poljuljavanja koji se zgodno može koristiti za sintetisanje zvukova poput valjanja morskih talasa.

LFO generatori mogu biti nezavisni u svom funkcionisanju, ili deo šire mreže uređaja čiji se radni takt kontroliše sa jednog mesta koje je izvor tog takta. Ta veza se ostvaruje preko *sync* funkcije koju većina LFO oscilatora omogućuje.

Opisani postupak subtraktivne sinteze je omogućio da se industrija sintisajzera tokom 70-ih godina XX veka pretvori u važan segment audio tržišta. Razvoj digitalne tehnologije znatno je olakšo i poboljšao kontrolu parametara u procesu subtraktivne sinteze. Osnovna mana je svakako limitiranost, definisana vrstom i kvalitetom korišćenih oscilatornih i filterskih kola. Bitno je napomenuti i da se aditivna i subtraktivna sinteza, kao tipični predstavnici analogne sinteze zvuka, danas kombinuju u cilju proširivanja mogućnosti sinteze.

REZIME I PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

U ovom poglavlju su pojašnjeni osnovni pojmovi vezani za subtraktivnu sintezu, kao i blok šema na kojoj se rad sintisajzera ovog tipa zasniva. Razmotrene su karakteristike osnovnih tipova signala koji iniciraju ovaj proces. Pojašnjena je uloga filtara, kao i uticaj njihovih realnih karakteristika na ovaj tip sinteze. Na kraju poglavlja je opisana i uloga modulatora u postupku subtraktivne sinteze.

1. Objasniti princip rada, nabrojati osnovne gradivne elemente i skicirati blok šemu subtraktivnog sintisajzera.
2. Nabrojati i opisati karakteristike osnovnih tipove signala koji se koriste za iniciranje postupka subtraktivne sinteze.
3. Definisati i skicirati izgled spektra belog, roze i plavog šuma.
4. Objasniti ulogu i uticaj realnih karakteristika filtra u postupku subtraktivne sinteze.
5. Objasniti ulogu i primenu modulacije u postupku subtraktivne sinteze.

KLJUČNE REČI

Subtrakcija, oscilator, filter, modulator, zvonjava, LF oscilator

FM SINTEZA

III deo

Treće poglavlje uvodi studenta u izučavanje oblasti FM sinteze kroz četiri podpoglavlja. Najpre se razmatra Istorijski razvoj (3.1), zatim Osnovni principi funkcionisanja FM sinteze (3.2) i Indeks modulacije (3.3), da bi se konačno došlo do Principa praktične primene realizacije FM sinteze (3.4). Ovako struktuirano poglavlje, studenta upućuje u sledeće teme:

- 1. Istorijski razvoj FM sinteze*
- 2. Osnovni principi funkcionisanja FM sintetizatora zvuka*
- 3. Pojam nosioca i modulatora*
- 4. Osnovna pravila generisanja spektra signala u postupku FM sinteze zvuka*
- 5. Indeks modulacije*
- 6. Uticaj promene indeksa modulacije na konačan izgled spektra sintetisanog signala*
- 7. Osnovni principi realizacije FM sintetizatora zvuka*
- 8. Pojam operatora*
- 9. Principi formiranja blok šeme FM sintisajzera upotrebom operatora*

3.1 Istorijski razvoj

FM sinteza (eng. *Frequency Modulation*) je postupak sinteze zvuka čiji je idejni tvorac američki kompozitor, muzičar, pronalazač i profesor Stanford univerziteta, dr Džon Čauning (John Chowning). Do otkrića je došao slučajno, dok je eksperimentisao sa različitim tipovima zvučnih vibracija u svojoj laboratoriji na Stanford univerzitetu sredinom 60-ih godina XX veka. On je u tom periodu izvršio veliki broj eksperimenata sa različitim tipovima vibrata. Vibrato je oblik promene-modulacije zvuka, koji predstavlja naizmeničnu promenu frekvencije ili jačine zvuka, koja se na sintisajzerima lako postiže upotrebom oscilatora niskih frekvencija (LFO). Za eksperimente je koristio tadašnji računarski sistem na univerzitetu. Samo otkriće se dogodilo slučajno: kada je ubrzavao stepen vibrato modulacije do frekvencija koje je ljudsko uho moglo čuti, dolazio je do tačke u kojoj su se mogli razaznati novi kompleksni tonovi, tj. novi signali nastali iz modulisanih osnovnih signala. U tim početnim eksperimentima, zvuci koje je dobijao imali su karakter metalnog, zvonastog zvuka koji je po svojim tonalnim karakteristikama imao dosta sličnosti sa zvukom perkusivnih instrumenata. Ovo je dr Čauningu, koji je i sam bio vrstan perkusionista, bio sasvim dovoljan motiv da se upusti u dalje istraživanje.

Sličan princip se koristi i pri emitovanju FM radio programa, ali se za te potrebe koriste mnogo više frekvencije, izvan granica čujnog opsega. Čauning je radio sa nižim frekvencijama modulacije, unutar granica čujnog opsega, brzo uvidevši sav potencijal ovog načina sinteze zvuka. Narednih godina razvio je metodu frekvencijske modulacije do kraja, matematički i praktično. Kroz svoj praktičan rad je pokazao da je FM sinteza upotrebljiva i perspektivna metoda sinteze i 1968. postao je prva osoba koja je komponovala i snimila muzičko delo koristeći FM sintezu kao jedino sredstvo u stvaranju zvuka.

Čauning i njegovi saradnici proveli su nekoliko narednih godina u usavršavanju i razvoju postupaka FM sinteze, postavivši jasnu matematičku i praktičnu osnovu za rezultate koje su postizali. Osetivši se spremnim za ulazak u komercijalnu eksploataciju, Čauning je posredstvom Standfordove kancelarije za licence ponudio saradnju pojedinim američkim proizvođačima elektronske audio opreme. U vreme kada su Minimoog i ARP Odyssey vladali tržištem subtraktivnih sintisajzera, i u trenutku kada su četvorobitni mikroprocesori predstavljali napredne i skupe naprave, nijedan američki proizvođač nije uvideo komercijalni potencijal FM sinteze. Stanford se nakon toga okrenuo japanskim proizvođačima. Yamaha je krajnje poslovno odreagovala na ponudu, poslavši svoje ljude na Stanford. Kada su shvatili čime Čauning raspolaže vrlo brzo su se dogovorili i oko praktične primene nove vrste sinteze. FM sinteza je zvanično patentirana 1975. Godine (nosilac patentnih prava bio je Stanford), a neposredno nakon toga licencirana od strane Yamaha-e. Zanimljivo je da je prva komercijalna implementacija koju je Yamaha upotrebila bila zasnovana na faznoj modulaciji, a ne direktno na metodi frekvencijske modulacije. Činjenica da je postupak FM sinteze poprilično teško realizovati i kontrolisati u analognoj izvedbi, uslovio je da pravi komercijalni probaj na tržište ovaj tip sinteze doživi sa početkom ere digitalnog audija, koja je vezana za osamdesete godine XX veka. Prva verzija sintisajzera Yamaha DX-7, koja je u potpunosti bazirana na FM sintezi, i koju je Yamaha proizvodila u periodu od 1983-86, doživela je ogroman komercijalni uspeh, svrstavši ovaj model u jedan od najprodavanijih i najčuvanijih modela sintisajzera ikad. Yamaha je nakon 1986. godine nastavila sa razvojem DX7 modela, izbacujući na tržište unapređene verzije (DX7II, DX7S). Razvijeniji algoritam FM sinteze, koju je se na tržištu pojavio pod oznakom AFM (*Advanced Frequency Modulation*), Yamaha je koristila u svojim SY/TG serijama sintisajzera. Godine 1998. Yamaha je na tržište izbacila i svoj ultimativni model FM sintisajzera pod oznakom FS1R, u čijem dizajniranju su bila iskorišćena sva dotadašnja iskustva i nagli razvoj tehnologije.

Godine 1995. je isteklo patentno pravo koje je na FM sintezu polagao Stanford. Stanford je u tom periodu od patentnog prava inkasirao 20 miliona dolara.

3.2 Osnovni principi funkcionisanja FM sinteze

FM sinteza je sinteza kod koje se izlaz iz jednog oscilatora koristi za modulaciju osnovne učestanosti drugog oscilatora. Izlazni signal oscilatora kojim se osnovni signal moduliše se naziva modulator, dok se osnovni signal koji biva modulisan naziva nosilac. Na opisani način se osnovna učestanost nosioca menja na osnovu amplitude modulatora.

Ako se signal prvog oscilatora, modulatora, predstavi formulom:

$$m(t) = A_m \sin(\omega_m \cdot t) \quad (3-1)$$

a signal drugog, nosioca, formulom:

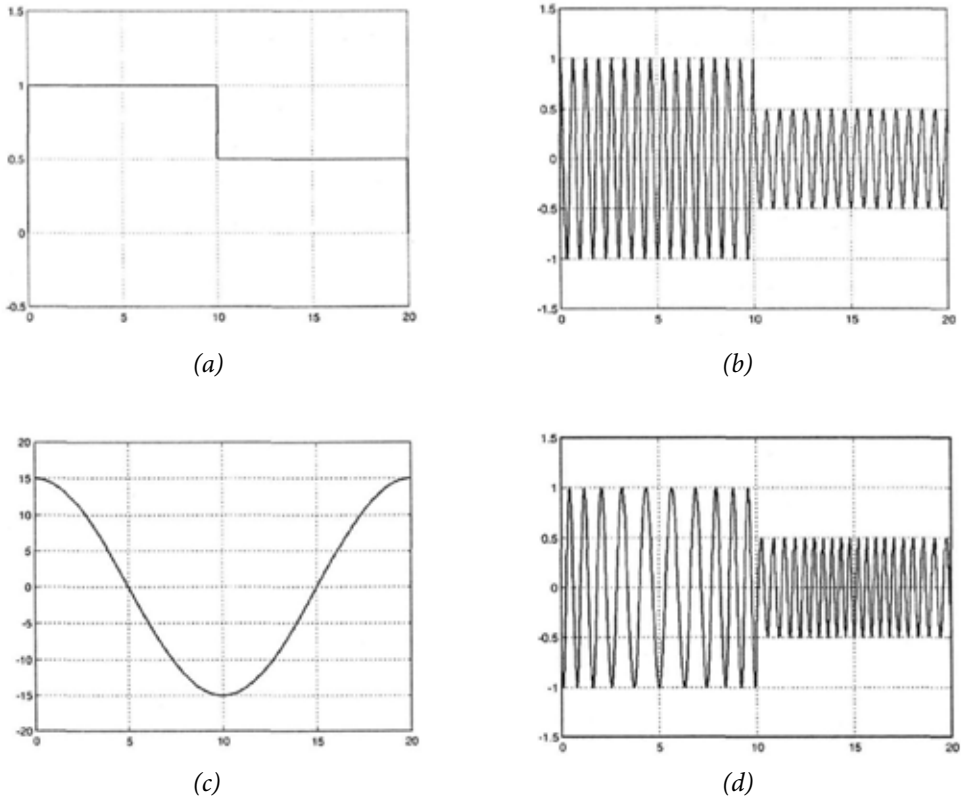
$$c(t) = A_c \sin(\omega_c \cdot t) \quad (3-2)$$

Tada je konačni, frekvencijsko modulisani signal dat formulom:

$$r(t) = A \sin(\omega_c + A_m \sin(\omega_m t)) \quad (3-3)$$

Ako pretpostavimo da A_c izgleda kao na slici 1(a), tada $C(t)$ izgleda kao na slici 3.1(b). Ukoliko vremenski oblik signala modulatora $M(t)$ izgleda kao na slici 3.1(c), tada rezultujući signal $R(t)$ izgleda kao na slici 3.1(d). Dakle, osnovna promena nivoa signala u vremenu ostala je očuvana, ali je sam frekvencijski sadržaj signala promenjen, što se na slici 1 uočava razlikom u toku rezultujućeg sinusoidalnog signala predstavljenog na slici 3.1(d) (obratiti pažnju na različito trajanju periode sinusnog signala predstavljenog na slici 3.1(d)). Informacija o ritmu promene koju sa sobom nosi signal modulatora (3-1) je na ovaj način postala direktno utisnuta u vremenski oblik signala nosioca, čineći konačan oblik signala (3-3). Ova promena frekvencije nosioca, diktirana oblikom modulatora jeste matematička predstava procesa frekvencijske modulacije.

Frekvencijska modulacija, dakle, menja učestanost nosioca po zakonu modulišućeg signala. Frekvencijom modulatora se moduliše signal nosioca. Iako je zbog jasnoće prikaza procesa frekvencijske modulacije na slici 3.1 dat relativno prost oblik amplitude nosioca A_c , u muzičkoj sintezi ovaj oblik može imati proizvoljno kompleksan oblik, sa svim karakteristikama koje se koriste u analizi zvuka tipičnog instrumenta: attack, decay, sustain i release delove signala (ADSR forma vremenskog predstavljanja audio signala). Dokle god je frekvencija modulatora niska, ovaj tip modulacije se slušno ne detektuje kao promena vrste zvuka, već kao specifičan modulacijski efekat koji se naziva vibrato – promena frekvencije osnovnog tona nosioca u ritmu promene frekvencije signala modulatora.

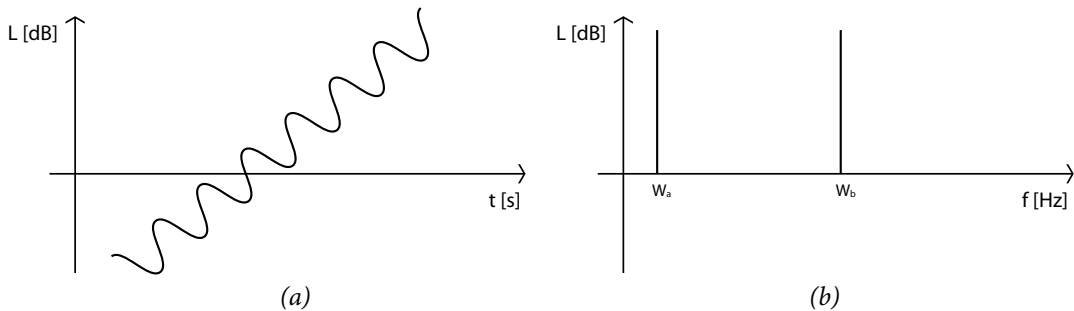


Slika 3.1: Grafička predstava vremenskih oblika signala: (a) – Promena amplitude nosioca, (b) – signal nosioca, (c) – signal modulatora (LFO), (d) – izlazni, modulirani signal

Oscilatori, koji se u ovom procesu sinteze koriste kao početni generatori zvučnog signala, su kao po pravilu kontrolisani naponom. To su tzv. VCO (*Voltage Contolled Oscilators*), ili naponski kontrolisani oscilatori. Signal modulatora, koji se za potrebe kreiranja vibrato efekta generiše upotrebom oscilatora niskih frekvencija moduliše naponski oscilator nosioca i čini da njegova osnovna učestanost raste i pada, stvarajući na taj način vibrirajući zvuk – vibrato efekat. Povećanje amplitude LFO-a doprinosi da vibracije postaju dublje i pliće (Ratio parametar), dok povećanje brzine LFO-a dovodi do ubrzanja ciklusa promene frekvencije (*Speed parametar*).

FM sinteza, u smislu mogućnosti generisanja kvalitativno novih tonova, nastaje onog trenutka kada se frekvencija modulatora izdigne dovoljno da ne utiče samo na „ljudljanje“ osnovne frekvencije nosioca. Pri upotrebi modulatornih oscilatora koji generišu više frekvencije, koje podpadaju u čujni opseg, dolazi do pojave „utiskivanja“ informacije koju sa sobom nosi modulator u vremenski oblik nosioca na nivou izmene njegove osnovne strukture

vremenske predstave, a ne samo osnovne frekvencije. Ovaj tip promene u vremenskom domenu ilustrovan je na slici 3.2, na kojoj je predstavljen znatno uvećan segment koji prikazuje izgled dela linije sinusoide nosioca modulisanog signalom modulatora visoke frekvencije, koja više nije „glatka“ već postaje talasasta. Ovakva promena u vremenskom domenu se čujno više ne percipira kao vibrato efekat, već kao ton kvalitativno novih karakteristika, sa novim harmonskim sadržajem spektra.



Slika 3.2: (a) – Prikaz vremenskog izgleda dela sinusoide FM modulisanog signala, (b) – Pozicije nosioca i modulišućeg signala u spektru.

Ako analiziramo spektar signala generisanog postupkom frekvencijekse modulacije, možemo zaključiti sledeće: ako je M učestanost nosioca, a C učestanost modulatora, njihova kombinacija određuje koje će učestanosti biti prisutne u spektru. Razvojem izraza (3-3) u Beselov red, dobija se sledeći matematički oblik frekvencijski modulisanog signala:

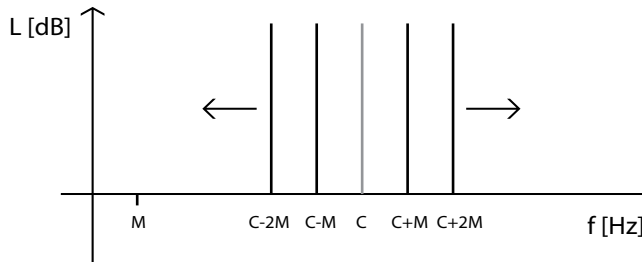
$$\begin{aligned} \sin((\omega_c t + A_m \sin(\omega_m t))) = & J_0(A_m) \sin(\omega_m t) - J_1(A_m)[\sin(\omega_c - \omega_m)t - \sin(\omega_c + \omega_m)t] \\ & + J_2(A_m)[\sin(\omega_c - 2\omega_m)t + \sin(\omega_c + 2\omega_m)t] - J_3(A_m)[\sin(\omega_c - 3\omega_m)t \\ & - \sin(\omega_c + 3\omega_m)t] + J_4(A_m) \dots \end{aligned} \quad (3-4)$$

U ovom izrazu se lako uočava postojanje potpuno novih komponenti u spektru, koje su definisane konkretnim vrednostima učestanosti signala nosioca i modulatora, koje ćemo u daljem tekstu obeležavati sa C i M .

Pravila su sledeća:

1. U spektru je uvek prisutan harmonik nosioca (C)
2. Na učestanostima većim od učestanosti nosioca, postojaće sledeći harmonici: $C+M$, $C+2M$, $C+3M$... Ovaj deo spektra se naziva gornji bočni opseg (*Upper Sideband*)
3. Na učestanostima manjim od učestanosti nosioca, postojaće sledeći harmonici: $C-M$, $C-2M$, $C-3M$... Ovaj deo spektra se naziva donji bočni opseg (*Lower Sideband*)

Dakle, energija modulacije se transformiše u bočne opsege, odnosno grupe harmonika sa obe strane nosioca. Pojava bočnih opsega je uvek u paru sa obe strane nosioca (C). Ovi parovi se razlikuju po svom redu separacije: C+M i C-M su parovi prvog reda, C+2M i C-2M su parovi drugog reda itd.



Slika 3.3: Izgled spektra FM modulacije

Treba primetiti i sledeće:

1. Ako se učestanost C smanji za određeni iznos, tada će se ceo spektar pomeriti ulevo, ka opsegu nižih frekvencija, za isti taj iznos;
2. Ako se učestanost M smanji za određeni iznos (na M'), tada će se harmonici iz bočnih opsega približiti učestanosti C, a i sami biti na odstojanju M' . Promena frekvencije modulatora M tako utiče na širenje i sužavanje razmaka između harmonijskih komponenti u spektru;
3. U jednom trenutku će harmonici višeg reda sa leve strane učestanosti C dostići nultu učestanost, što će se reflektovati u stvaranju novog bočnog opsega.

Dakle, harmonske komponente donjeg bočnog opsega, koje se nalaze na učestanostima $C-n \cdot M$, u jednom trenutku dolaze do vrednosti od 0 Hz, nakon čega se premeštaju u negativni deo spektra. Fizičko tumačenje ove situacije je takvo da ustvari dolazi do osnosimetričnog reflektovanja ovih „negativnih“ harmonika nazad u pozitivan deo spektra, ali sa negativnim predznakom amplitude: faza harmonika je pomerena za 180° . Na taj način se harmonik donjeg bočnog opsega koji se u harmonskom nizu pojavljuje na frekvenciji -100Hz, vraća u pozitivni deo spektra kao dodatna komponenta na frekvenciji od 100Hz, pri čemu je faza te komponente obrnuta, tj. pomerena za 180° . Ovaj fazni obrtaj, dalje, u praksi znači da se amplituda tog preslikanog harmonika pojavljuje kao negativna.

Razmotrimo nekoliko primera. Reflektovani bočni opsezi su označeni zagradama. U ovim primerima dati su harmonici do 6 reda, dok je, naravno, broj harmonika teoretski neograničen. Brojevi u tabeli su koeficijenti kojima možemo množiti tačno određenu učestanost. (5 - $5 \cdot 1$ kHz ili $5 \cdot 440$ Hz iii $5 \cdot 112$ Hz itd.)

M	C	Bočni opsezi					
2	3	5	7	9	11	13	15
		1	(1)	(3)	(5)	(7)	(9)
3	5	8	11	14	17	20	23
		2	(1)	(4)	(7)	(10)	(13)
1	1	2	3	4	5	6	7
		0	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Tabela1: Raspored harmonika modulisanog signala u zavisnosti od M : C odnosa.

Za odnos $M : C = 2 : 3$, reflektovani bočni opseg ima učestanosti koje se podudaraju sa onima u standardnom bočnom opsegu i rezultujuća komponenta se dobija kao zbir standardne i reflektovane. Za odnos $M : C = 3 : 5$, učestanosti reflektovanog bočnog opsega se ne podudaraju sa učestanostima standardnog, pa se, dakle, generišu dodatni harmonici. U trećem primeru, za odnos $M = C$, dobija se skoro ista slika kao u prvom primeru, s tim što postoji komponenta na nultoj učestanosti, koja se, naravno, ne čuje. Kada se učestanosti standardnih i reflektovanih bočnih opsega podudaraju, tada se harmonici nalaze na standardnoj udaljenosti jedan od drugog, dok se u drugom slučaju javlja alternativna raspodela harmonika.

3.3. Indeks modulacije

Tačne amplitude harmonskih komponenti spektra dobijenih u postupku FM sinteze se u izrazu (3-4) pojavljuju kao koeficijenti Beselove funkcije: amplituda n -tog harmonika je određena koeficijentom n -tog reda J_n . Koeficijenti Beselove funkcije su predstavljeni sledećim izrazom:

$$J_{(n)}(\beta) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot \left(\frac{\beta}{2}\right)^{(n+2k)}}{k! \cdot (n+k)!} \quad (3-5)$$

Parametar β koji se pojavljuje u ovom izrazu naziva se indeks modulacije i njegova vrednost iznosi:

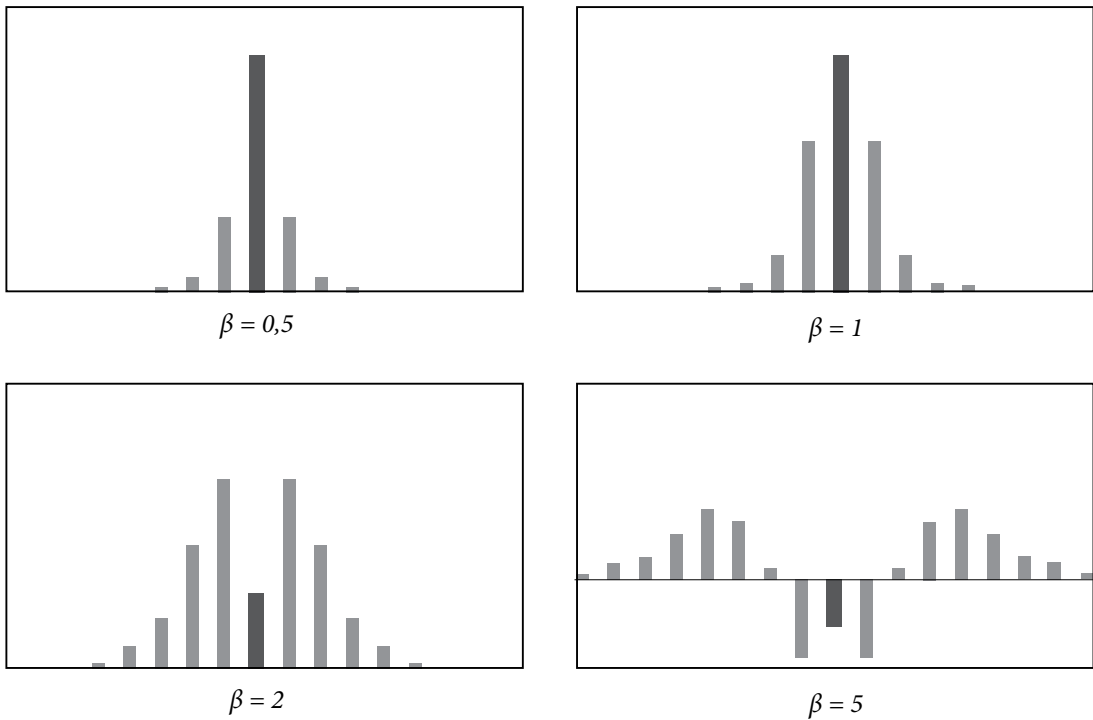
$$\beta = \frac{\Delta W_c}{W_m} \quad (3-6)$$

U brojiocu izraza (3-6) nalazi se vrednost koja označava promenu frekvencije nosioca do koje dolazi u postupku modulacije. Ova vrednost, u skladu sa izrazom (3-3), direktno zavisi od amplitude modulišućeg signala. Dakle, amplituda modulišućeg signala direktno utiče na svaku amplitudu u spektru izlaznog, modulisanog signala.

Informacija o tačnoj vrednosti amplitude svakog harmonika u spektru, u praktične svrhe, i nije od preterane važnosti: bitno je znati ukupan bilans, tj. konačan izgled spektra. Svakako je na ovom mestu bitno ukazati da vrednosti indeksa modulacije β direktno određuju amplitude nosioca i harmonika svih redova u bočnim opsezima. Izdizanjem vrednosti indeksa modulacije pojavljuje se više bočnih opsega. Izbor vrednosti indeksa modulacije sa kojim se radi u konkretnoj sintezi određuje, dakle, način na koji se bočni opsezi pojavljuju u konačnom spektru, što daje karakterističan zvuk FM sintezi. Tu se mogu istaći sledeće zakonitosti:

1. Kada nema modulacije, postoji samo učestanost nosioca (bez bočnih opsega),
2. Pri niskim nivoima indeksa modulacije, raspodela amplituda je oblika šatora sa vrhom na učestanosti nosioca C . Porastom indeksa modulacije do srednjih nivoa, raspodela dobija oblik zvona, sa centrom na učestanosti C ,
3. Mala pojačanja modulacije čine oblik zvona širim,
4. Velika pojačanja modulacije menjaju raspodelu na par zvona, sa centralnim učestanostima na učestanosti C .

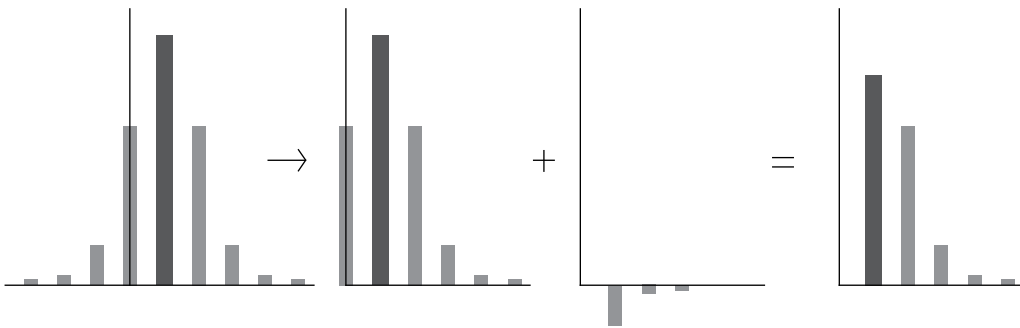
Neke od mogućih raspodela spektra prikazane su na *slici 3.4*.



Slika 3.4: Karakterističan izgled spektra FM signala za različite vrednosti indeksa modulacije β

Razmotrimo praktičan primer mogućnosti generisanja željenog signala upotrebom odgovarajućih vrednosti parametara koji se koriste u ovoj vrsti modulacije. Ukoliko je, naprimjer, $C:M=1:1$ i $\beta=1$, generisani harmonski niz će imati komponente gornjeg bočnog opsega na učestanostima $C+M$, $C+2M$, $C+3M$...dok će u donjem bočnom opsegu biti zastupljene komponente na učestanostima $C-M = 0\text{Hz}$, $-C$, $-2C$, $-3C$ Kao što smo već objasnili, ove negativne komponente u spektru se preslikavaju u pozitivan domen, uz oduzimanje od već postojećih komponentima na odgovarajućim mestima u spektru. Kao rezultat dobija se harmonski niz u kojem je C osnovni harmonik, a sve ostale komponente su celobrojni umnošci C , pri čemu njihove amplitude opadaju sa faktorom $1/n$ kako se pomeramo u spektru. Ovako opisan spektar je spektar testerastog signala, dobijen pravilnim odabirom parametara FM sinteze. Opisana situacija predstavljena je na slici 3.5.

Slično tome, ukoliko koristimo parametre $C : M = 1 : 2$ i $\beta = 1$, u gornjem bočnom opsegu dobijamo komponente $3C$, $5C$, $7C$...dok su komponente donjeg bočnog opsega $-C$, $-3C$, $-5C$... Ovde takođe dolazi do pojave opadajućeg harmonskog niza, ali ovog puta samo sa neparnim harmonicima, što znači da smo ovim putem generisali signal četvrtke.



Slika 3.5: Postupak generisanja testerastog signala postupkom FM sinteze.

$$C : M = 1, \beta = 1$$

Interesantno je primetiti da ukoliko odnos $C : M$ nije celobrojan, dobijeni harmonijski može imati potpuno proizvoljne komponente. Naravno da je broj svih mogućih kombinacija i odnosa parametara praktično beskonačan, odakle se izvodi zaključak da FM sinteza teoretski zaista pruža ogromne mogućnosti za generisanje najrazličitijih tipova signala.

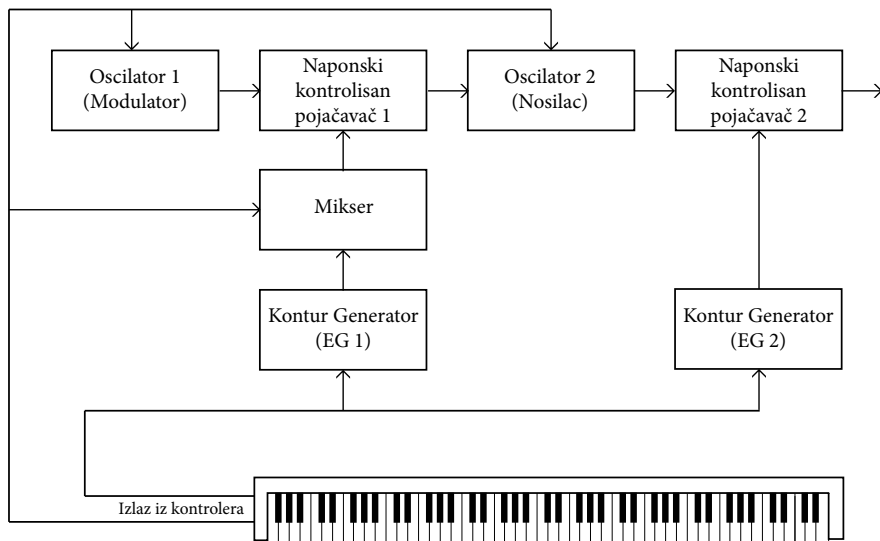
Dakle, konačna boja zvuka generisanog FM sintezom zavisi od tri osnovna faktora: indeksa modulacije (koji u sebi nosi informaciju o nivou amplitude modulišućeg signala), odnosa (*ratio*) između frekvencija dva oscilatora ($C : M$ odnos) i oblika talasa modulacije (*waveform*). Međuodnos ova tri faktora je prilično komplikovan, i zahteva dosta kompleksne matematičke proračune za preciznu predikciju rezultata modulacije. Za praktične potrebe na nivou prve aproksimacije u izvlačenju zaključaka, dovoljno je znati da promena amplitude modulatora dovodi do povećanja kompleksnosti i svetlijeg talasa, odnos $C:M$ definiše međusobno rastojanje među harmonicima u spektru, a talasni oblik (*waveform*) određuje način na koji će se generisani signal menjati. Stariji instrumenti su za osnovni talas uvek imali sinusni talas, a kasnije su počeli da se koriste svi talasi koji je bilo moguće generisati na analognim mašinama, kao i neki novonastali.

3.4. Principi praktične realizacije FM sinteze

U složenijim vidovima FM sinteze kompleksnog signala koristi se veći broj oscilatora, čime se preciznije podešava anvelopa signala, kao i broj i međusobni odnos harmonika u konačno sintetizovanom signalu. FM sinteza je najpre vršena u analognoj tehnici. U cilju maksimalnog iskorišćenja FM sinteze, tj. da bi se dobila mogućnost kontrole procesa u smislu generisanja zvuka koji je približno identičan zvuku originalnih instrumenata, potrebno je imati preciznu kontrolu parametara i u proces sinteze uključiti veliki broj generatora, što u analognoj izvedbi svakako nije praktično rešenje. Kada se u obzir uzme i činjenica da potreba za polifonijom dodatno multiplicira neophodan broj elemenata, nije teško shvatiti zašto je FM sinteza morala sačekati razvoj digitalnih tehnologija kako bi doživela svoju punu implementaciju. Treba napomenuti da se ovaj način sinteze zvuka danas često sreće u jeftinim muzičkim karticama za računar, u kojima je kvalitet opisane sinteze relativno loš, u skladu sa kompleksnošću algoritma koji se u takvim proizvodima koristi.

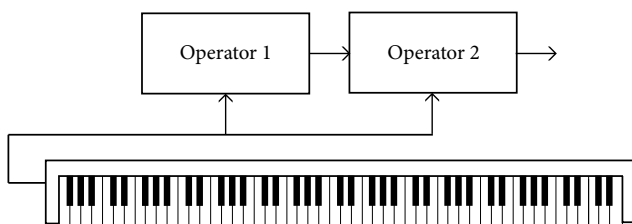
Zamislimo stari analogni sintisajzer sa 2 VCO-a. Kada se svira na klavijaturi, oba VCO-a će emitovati određene talasne oblike osnovnih učestanosti određenih tonova. Zamislimo sada VCO1 kao modulacioni signal na ulazu u VCO2. Kada se svira na klavijaturi, oba oscilatora će, zavisno od pritisnutih dirki, oscilovati, ali će se osnovna učestanost VCO2 menjati u vremenu po oscilacijama oscilatora VCO1. Oscilatori u FM sintezi se nazivaju operatorima. Sintisajzeri, zbog stvaranja bogatijeg spektra, obično imaju 4 ili 6 operatora. Načini povezivanja operatora se nazivaju algoritmima. U svakom povezivanju će nosilac biti poslednji operator, a oni ispred njega - modulatori. Obzirom na njihov broj, može se napraviti veliki broj različitih kombinacija. Izgled bazične FM konfiguracije u kojoj se koriste samo dva neophodna oscilatora, prikazan je na slici 3.6.

Ukoliko parametre elemenata na ovoj slici podesimo tako da su frekvencije oscilatora 1 (M) i oscilatora 2 (C) jednake, dobićemo odnos $C : M = 1 : 1$. Ukoliko sada prvi generator anvelope (EG1) podesimo tako da je njegova vrednost 0 (isključen), a drugi (EG2) tako da su mu parametri 0/0/10/0 (*no attack, no decay, full sustain, instatenous release* - ovaj tip ADSR obvojnice se često naziva *Organ type*), sviranjem nekog tona dobićemo zvuk koji po svojim karakteristikama teži signalu testerastog tipa, što je u potpunosti u skladu sa prethodno opisanim primerom generisanja ovog tipa signala. U ovakvoj konfiguraciji moguće je i fino podešavanje visine i boje sviranog tona podešavanjem nivoa pojačanja prvog naponski kontrolisanog pojačavača VCA1, što je u skladu sa izrazom (3-6) i objašnjenjem datim uz njega.



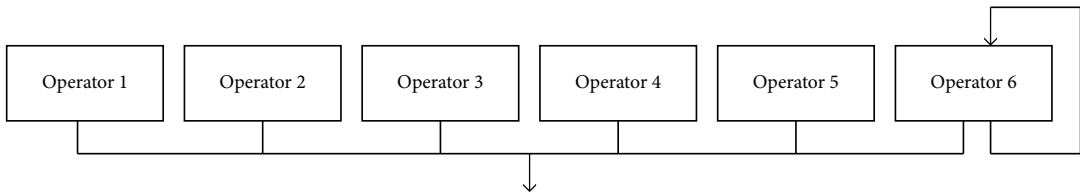
Slika 3.6: Blok šema bazične konfiguracije praktične realizacije FM sinteze upotrebom dva oscilatora i pet dodatnih elemenata.

Potreban broj elemenata koji učestvuju u procesu generisanja FM sinteze, u skladu sa potrebama prakse, drastično raste, te se ovakav prikaz blok-šeme veoma brzo komplikuje i u tom smislu postaje nepraktičan. Upravo to je razlog zbog kojeg je u praksu uveden element blok šeme pod nazivom operator, koji u sebi sadrži oscilator, mikser, VCA i generator anvelope. Blok šemu sa slike 3.6 je, upotrebom operatora, moguće predstaviti na način prikazan na slici 3.7.



Slika 3.7: Blok šema sa slike 3.6 realizovana upotrebom operatora

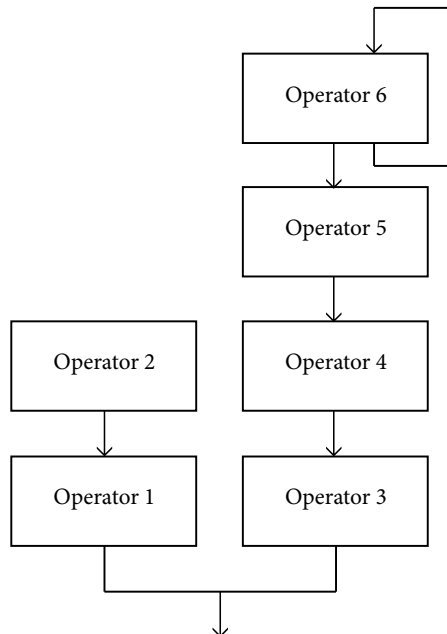
Ovako definisan element – operator, postaje veoma zgodno sredstvo za predstavljanje konkretnih realizacija kola za frekvencijsku modulaciju. Kao primer za jednu od mogućih predstava iz koje se veoma lako može protumačiti šta konkretan sklop praktično radi možemo pogledati primer na slici 3.8.



Slika 3.8: Primer predstave blok šeme upotrebom operatora

U ovom primeru, ni jedan operator nema direktnu vezu, odnosno ne utiče ni na jedan drugi, već se izlazi svih pojedinačno sabiraju. To praktično znači da ne postoji modulacija ni na jednom mestu u kolu, iz čega lako zaključujemo da ovakvom vezom elemenata ne može doći do FM sinteze zvuka.

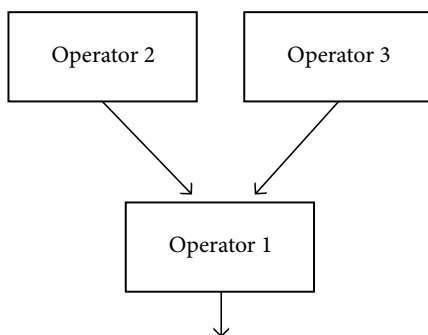
Japanski proizvođač elektronske audio opreme (i mnogo više od toga) Yamaha, koja je polagala pravo na originalnu licencu ovog postupka sinteze je prva uvela prikaz tipa sinteze upotrebom operatora, razradila ovaj sistem do kraja i na njemu bazirala komunikaciju sa krajnjim korisnikom proizvoda. Njihov već pomenuti, prvi komercijalno do kraja uspešni model FM sintisajzera, je na sebi imao operatorski prikaz svih algoritama sinteze koji su dostupni korisniku.



Slika 3.9: Prikaz jednog od algoritama FM sinteze na modelu Yamaha DX7.

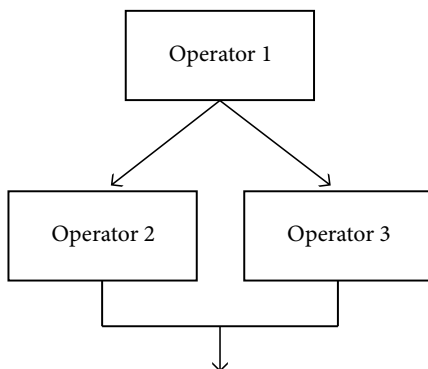
U tumačenju ovog prikaza osnovno je imati na umu da su operatori – nosioci uvek pozicionirani na samom kraju blok šematskog prikaza algoritma, dok su svi ostali operatori operatori – modulatori. Blok šemu prikazanu na *slici 3.8* možemo, u skladu sa tim tumačiti na sledeći način (operator ćemo skraćeno predstaviti oznakom O): O2 je modulator za O1, koji je u ovoj situaciji nosilac. O6 moduliše O5, koji moduliše O4, koji na kraju moduliše nosilac predstavljen kao O3. Izlazi iz O1 i O3 su nakon toga direktno sabrani u nekom prostom mikseru, tako da je konačan rezultat sinteze zbir dva nezavisna modulacijska puta u ovako dizajniranom algoritmu.

Sledeća interesantna mogućnost u praktičnoj realizaciji ovog tipa sinteze je predstavljena na *slici 3.10*.



Slika 3.10: Prikaz modulacije jednog nosioca upotrebom dva modulišuća signala

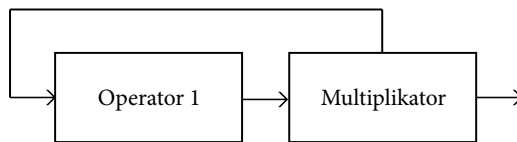
Na prvi pogled se može činiti da ovakav algoritam teško može biti kontrolisan, tj. da je teško predvideti konačan izgled generisanog signala. Pa ipak, ovo nije slučaj, jer izlazni signal praktično predstavlja aritmetičku sumu dva talasna oblika koja bi se dobila upotrebom svakog od modulatora ponaosob. Dakle, ako bi modulacijom nosioca O1 modulatorom O2 generisali četvrtku, a kombinacijom O3 – O1 testerasti signal, kao konačan signal na izlazu blok šeme sa *slike 3.9* bi se pojavio signal koji je tačna suma dva ovako nezavisno generisana signala.



Slika 3.11: Prikaz modulacije dva nosioca upotrebom jednog modulatora

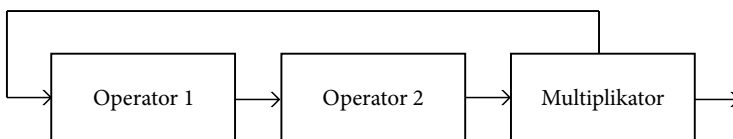
Situacija u kojoj se jednim modulatorom modulišu dva nosioca istovremeno prikazana je na *slici 3.11*. Činjenica da se izlaz iz jednog modulatora vodi na dva mesta ni na jedan način ne utiče na rezultat sinteze – praktično se obavljaju dve nezavisne modulacije, baš kao da modulator moduliše svaki nosilac ponaosob. Na izlazu se, dakle, pojavljuje suma signala dva praktično nezavisna toka FM sinteze.

U generisanju algoritama FM sinteze često se koristi i povratna sprega, čijom upotrebom veoma lako možemo rešiti neke od zahteva. Generisanje testerastog signala na ovaj način, upotrebom sinusnog operatora, predstavljeno je na *slici 3.12*.



Slika 3.12: Prikaz generisanja testerastog signala upotrebom sinusnog operatora

Na *slici 3.13* prikazan je algoritam za generisanje šumova postupkom FM sinteze. Modulacija između O1 i O2 proizvodi bočne opsege. Ovako generisan spektar se povratnom spregom vraća na ulaz O1, čime se generiše signal izuzetno bogatog spektra koji nastavlja da moduliše nosilac O2. U svega nekoliko iteracija, na ovaj način moguće je generisati spektre sa hiljadama pa čak i milionima harmonika, što svakako jesu signali tipa šuma. A kada je šum generisan, kao po pravilu postaje veoma lako, uz upotrebu filtera, proizvesti bilo koji tip perkusivnog zvuka. Dakle, FM sinteza, koja je poznata kao veoma pogodna za generisanje zvukova električnih klavira, orgulja i zvona, jeste veoma pogodna i za sintetisanje perkusivnih zvukova.



Slika 13: Prikaz generisanja šuma FM sintezom upotrebom povratne sprege

REZIME I PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

U ovom poglavlju je predstavljen istorijski kontekst razvoja FM sinteze. Nakon toga su objašnjeni osnovni principi i pojmovi vezani za ovaj postupak. Pojašnjen je uticaj signala nosioca, modulatora i indeksa modulacije na izgled spektra koji se formira. Na kraju poglavlja su predstavljene blok šeme praktične realizacije ovog tipa sinteze bazirane na upotrebi operatora.

1. Objasniti istorijske okolnosti i uslove nastanka FM sinteze.
2. Šta označava skraćenica FM?
3. Objasniti osnovne principe na kojima počiva FM sinteza.
4. Šta je nosilac, a šta modulator?
5. Objasniti na koji način vrednosti nosioca i modulatora utiču na formiranje spektra FM signala.
6. Šta je indeks modulacije i na koji način utiče na formiranje spektra FM signala?
7. Nacrtati blok šemu bazične konfiguracije praktične realizacije FM sinteze upotrebom 2 oscilatora i potrebnog broja dodatnih elemenata.
8. Šta je operator i na koji način se koristi u postupku pojašnjenja postupka FM sinteze?
9. Upotrebom operatora prikazati blok šemu generisanja testerastog signala Postupkom FM sinteze.

KLJUČNE REČI

FM sinteza, nosilac, modulator, indeks modulacije, operator

WAVETABLE SINTEZA

IV deo

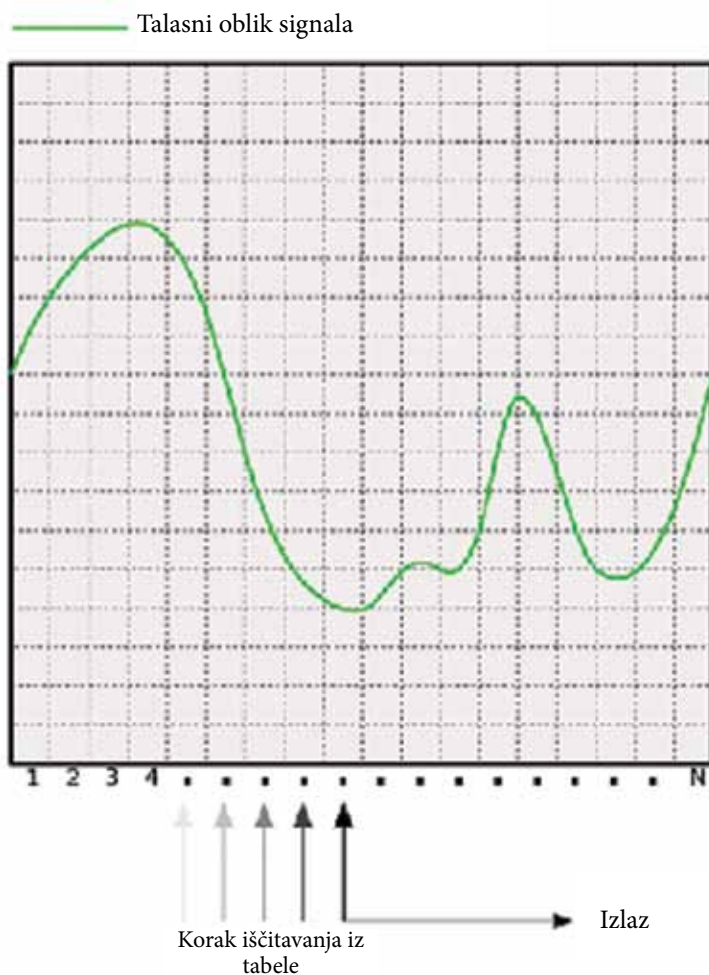
Četvrto poglavlje uvodi u oblast Wavetable sinteze detaljno informišući studenta o sledećim temama:

- 1. Tabela talasnih oblika*
- 2. Osnovni principi upisa i iščitavanja iz tabele talasnih oblika*
- 3. Uticaj brzine iščitavanja iz tabele na promenu frekvencije talasnog odbirka*
- 4. Sample Looping procedura*
- 5. One-shot zvuci*

Kao što je već napomenuto, u predigitalnom dobu razvoja sintisajzera, oscilatori koji su korišćeni kao osnova za dalje kreiranje zvuka su bili ograničeni, kako po svom broju, tako i po vrsti. Tek razvojem digitalne tehnologije postalo je moguće u igru uvesti praktično bilo koji talasni oblik kao osnov za dalju sintezu zvuka. Kao jedno od prvih praktičnih rešenja u tom smislu pojavila se PPG *Wavetable* serija sintisajzera, čiji je tvorac bio nemački naučnik Wolfgang Palm, čime je po prvi put u oblast sinteze zvuka bio uveden pojam tzv. *Wavetable* digitalnih „oscilatora“. Termin oscilator je namerno stavljen pod znake navoda, zato što ova tehnika ne podrazumeva postojanje oscilatora kao elektronskih sklopova u klasičnom smislu, već njihovu funkciju preuzimaju proizvoljni talasni oblici koji se smeštaju u tzv. *Look-Up* tabelu, namensku tabelu talasa, odakle i potiče generalni naziv ovog tipa sinteze – *Wavetable*.

Na taj način je po prvi put u istoriji razvoja sintisajzera dizajnerima na raspolaganju bilo znatno više od uobičajenih nekoliko tipova početnih talasnih oblika (četvrtka, trougao, testera, sinus, šum...). U namenske tabele bilo je moguće smestiti bilo koji tip digitalno kreiranog talasnog oblika. Tabele su na početku bile organizovane sa po 64 talasna oblika u svakoj, pri čemu su često na raspolaganju bile po minimum 32 tabele. Talasnim oblicima, tj. poljima u tabeli se pristupalo i dalje manipulisalo sa kontrolne površine sintisajzera.

Jedno polje u tabeli talasa u suštini predstavlja predefinisani niz od N vrednosti, gde se vrednostima od 1 do N predstavlja jedan ceo ciklus talasnog oblika smeštenog u tabelu (*slika 4.1*). To praktično znači da svaka od N vrednosti predstavlja talasni oblik u tačno definisanom, diskretnom trenutku vremena tokom trajanja jednog ciklusa.



Slika 4.1: Prikaz jednog polja unutar tabele talasa

U tabelu je, naravno, moguće postaviti ne samo namenski, digitalno kreirane, već i prethodno sniljene talasne oblike. Na ovom mestu treba napomenuti da, i pored ove vrste sličnosti, ovaj tip sinteze ni na jedan način ne treba brkati sa kasnije razvijenom *sampling* sintezom zvuka. Jedna od osnovnih razlika leži u činjenici da se u poljima talasnih tabela nalaze isključivo pojedinačni ciklusi kreiranih talasnih oblika, a nikako celokupni zvučni uzorci, što je slučaj u procesu tzv. *sampling* sinteze.

Čitanje iz tabele se obavlja upotrebom čitača (eng. *Read Pointer*). Čitač se ciklično kreće kroz tabelu, pri čemu brzina tog kretanja, tj. iščitavanja može biti promenljiva.

U procesu čitanja se kao rezultat na izlaz prosleđuje vrednost trenutno pročitano odbirka talasnog oblika, pri čemu se čitanje vrši ciklično, što podrazumeva vraćanje čitača na početak polja tabele nakon trenutka čitanja poslednjeg (N-tog) odbirka.

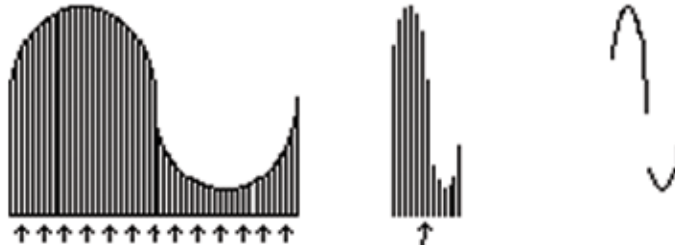
Osnovnu brzinu iščitavanja iz tabele definišu dužina polja tabele (N) i frekvencija odabiranja koja se koristi. Ukoliko imamo tabelu talasa definisanih sa $N = 1024$ odbirka, i koristimo radni takt od $f = 44.100$ Hz, lako ćemo zaključiti da je vreme potrebno da se iščita jedan ciklus iz tabele $t = N / f = 1024 / 44100 = 0.023$ s. Na osnovu ovoga se definiše osnovna frekvencija iščitavanja iz tabele talasa, kao $F = 1 / t = 1 / 0.023 = 43.5$ Hz. Upravo ova vrednost definiše osnovnu učestanost talasnog oblika koji se iščitava.

Naravno da bi generisanje različitih osnovnih učestanosti za svaki talasni oblik pohranjen u tabeli bilo dosta zametno ukoliko bi ta, za neometanu sintezu potrebna stavka, podrazumevala posebno mesto za talas svake frekvencije ponaosob. Ovakvo rešenje bi bilo krajnje nepraktično i podrazumevalo bi neophodnost postojanja tabele sa hiljadama polja samo za jednu istu vrstu talasnog oblika. *Wavetable* sinteza omogućava promenu osnovne učestanosti, tako da se na osnovu odbiraka jedne note pohranjene u tabeli, dobija veliki broj ostalih nota. Na taj način dolazi do minimizovanja memorije koja je potrebna za sintezu. Tako, na primer, ako su u memoriji prisutni odbirci srednje note C akustičkog klavira, isti odbirci se mogu koristiti i za sintezu note Cis ili za sintezu note D pomoću algoritma promene osnovne učestanosti. Prethodno izloženom analizom brzine iščitavanja iz tabele lako možemo doći do zaključka da ovaj način tretiranja talasnih oblika omogućava relativno laku promenu osnovne učestanosti talasa koji se iščitava, tzv. *Pitch Shifting*. Za tako nešto dovoljno je promeniti ili osnovnu dužinu polja tabele (N) ili radni takt iščitavanja iz nje (f). Promena radnog takta je problematična u svakom smislu, kako sa aspekta programiranja, tako i sa aspekta praktične, hardverske realizacije. Kao dodatni razlog nepraktičnosti ovakvog načina promene učestanosti treba napomenuti i činjenicu da bi radni takt za generisanje visokih osnovnih učestanosti talasnih oblika morao biti izrazito velik, što je u vreme razvoja ovog tipa sinteze bio popriličan problem.

Sve to su razlozi iz kojeg je u postupku promene učestanosti u okviru Wave table sinteze odabrano rešenje bazirano na promeni koraka iščitavanja iz tabele. Tako ukoliko u prethodnom primeru iščitavamo tek svaki peti odbirak iz tabele, osnovna frekvencija će biti $F_5 = 5F = 217.5$ Hz.

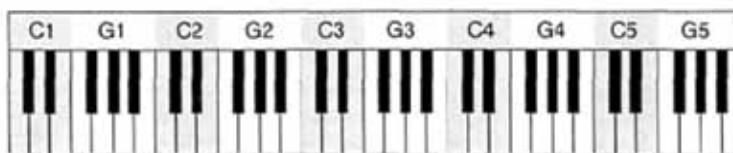
Daljom analizom, lako dolazimo do zaključka da se korak iščitavanja S, potreban da bi se generisao talasni oblik željene učestanosti F može izračunati po prostoj formuli $S = NF / f$, gde je N dužina tabele, F željena frekvencija a f korišćena frekvencija iščitavanja iz tabele. Ilustracija ovog postupka je prikazana na slici 4.2. Naravno da ovako prost način definisanja osnovne učestanosti talasnog oblika podrazumeva neke dodatne probleme o kojima se mora

voditi računa. Vrednost koraka ne mora biti ceo broj, a sam čitač se ovakvim načinom čitanja neće uvek vratiti na početak tabele. Ovo za sobom povlači potrebu za uvođenjem postupaka zaokruživanja ili interpolacije u proces iščitavanja.



Slika 4.2: Prikaz postupka promene osnovne frekvencije tona kontrolom iščitavanja iz talasne tabele

Kada se prilikom izvođenja određene note promeni osnovna učestanost načinima za menjanje osnovne učestanosti prethodno opisanim, menja se i prirodnost, odnosno kvalitet originalnog instrumenta. Ovaj efekat je manje primetan kod malih promena osnovne učestanosti (do nekoliko polutona), dok je kod većih promena očigledan. Da bi se održala prirodnost zvuka, određeni odbirci zvuka će se koristiti za regenerisanje samo ograničenog notnog opsega. Za obuhvatanje ukupnog notnog opsega koristi se nekoliko različitih grupa odbiraka, od kojih se svaka koristi za generisanje ograničenog broja polutona. Za ovako generisani notni opseg instrumenta kaže se da je *Multisampled instrument*. Ova tehnika se može posmatrati kao tehnika razdvajanja klavijature na notne regione, po kojoj se note iz svakog regiona rekonstruišu na osnovu grupe odbiraka vezanih za taj region.



Slika 4.3: Prikaz razdvajanja klavijature na notne regione

Osim razdvajanja ukupnog notnog opsega na podopsege, vrši se i razdvajanje pritisaka na dirke klavijature. Tako, ako se dirka pritisne naglo, zvuk se rekonstruiše iz jedne grupe odbiraka, a ako se pritisne nežno, rekonstruiše iz druge. Podela dirki klavijatura se može izvršiti i na sledeći način: pritiskom dirki na nižim oktavama može se generisati zvuk iz odbiraka basa, a obzirom da bas ne postoji na višim učestanostima, pritiskom dirki na višim oktavama može se generisati zvuk iz odbiraka, recimo, vibrafona.

U zvuku instrumenta se prilikom procesa rekonstruisanja odbiraka, radi povećavanja osnovne ucestanosti, može pojaviti aliasing šum. Generisanje aliasing šuma, takođe, može ograničiti broj polutonova koji se mogu rekonstruisati iz određene grupe odbiraka. Postoje instrumenti bogati visokim harmonicima i kod njih će biti izraženiji aliasing šum. Zato se nakon postupka menjanja osnovne učestanosti, novodobijeni odbirci moraju propustiti kroz digitalni filter niskih učestanosti.

Vibrato i tremolo efekti su česti u zvukovima akustičkih instrumenata. Vibrato predstavlja niskofrekvencijsku modulaciju osnovne učestanosti note, dok je tremolo modulacija amplitude zvuka. Ovi efekti se simuliraju u sintisajzerima primenom oscilatora niskih učestanosti (*Low Frequency Oscillator* - LFO), koji se koriste da modulišu osnovnu učestanost ili amplitudu sintetizovanog zvuka. Prirodni vibrato i tremolo efekti najviše dolaze do izražaja kada je nota koja se izvodi u sustain delu. U sintisajzeru se ovaj efekat izvodi povezivanjem generatora anvelope sa oscilatorom niskih učestanosti. Tako, na primer, zvuk flaute ima tremolo efekat odmah nakon početka izvođenja note, koji se naglo pojačava do nekog maksimalnog nivoa, gde ostaje do trenutka kada nota prestaje da se izvodi.

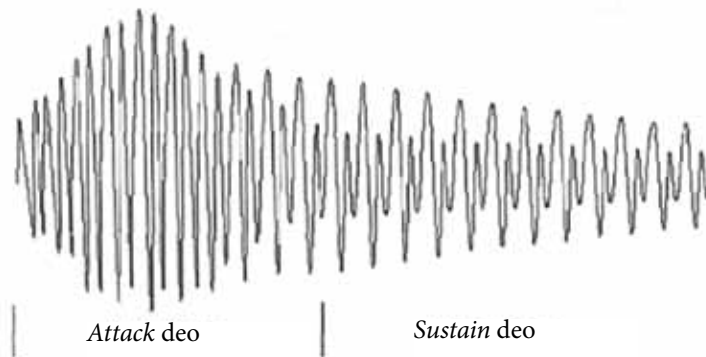
U postupku wavetable sinteze, koji je u potpunosti digitalan, se često upotrebljavaju digitalni filteri. Oni se upotrebljavaju i kod opisanog dodavanja efekata tremola i vibrata. Ako bi ovaj tip efekata naglo isključivali nakon prestanka sustain dela, tada bi zvuk bio neprirodan. To se rešava dinamičkom promenom karakteristike filtera između ova dva dela anvelope zvuka. Isto tako, digitalni filteri mogu generisati i efekte koji nisu prisutni u akustičkim instrumentima. Tako na primer, *Wan - Wah* efekat se izvodi propuštanjem signala kroz filter sa jako izraženom rezonantnom učestanošću. Ova učestanost je obično blizu granične učestanosti i ona može dovesti do samooscilovanja filtera.

Kod mnogih akustičnih instrumenata boja tona menja se drastično u funkciji amplitude generisanog tona. Tako, na primer, ton akustičkog klavira može biti vrlo jasan kada se na instrumentu svira energično, a isto tako i “razvodnjen” kada se svira lagano. Tada se koristi princip sinteze zvuka iste note iz različitih grupa odbiraka, za različite načine sviranja. Međutim, isti efekat se može rekonstruisati primenom digitalnog filtera niskih učestanosti za svaku notu ponaosob, čija se granična učestanost može menjati kao funkcija pritiska na dirku klavijature.

Digitalno filtriranje takođe uslovljava omekšavanje prelaska sa nota koje se nalaze na granicama grupa različitih odbiraka. Kao što je ranije opisano, ukupan notni opseg se deli na nekoliko ograničenih podopsega. Ako, recimo, želimo da odsviramo prvo notu koja se rekonstruiše iz jedne grupe odbiraka, a zatim notu koja se rekonstruiše iz druge grupe odbiraka, uvo će registrovati razlike u spektrima, kao da sviraju dva različita instrumenta. Ovaj problem se rešava primenom digitalnog filtriranja koje koristi note za podešavanje karakteristika filtera.

Tako se može izvesti i tabela karakteristika filtera na osnovu notnih pozicija.

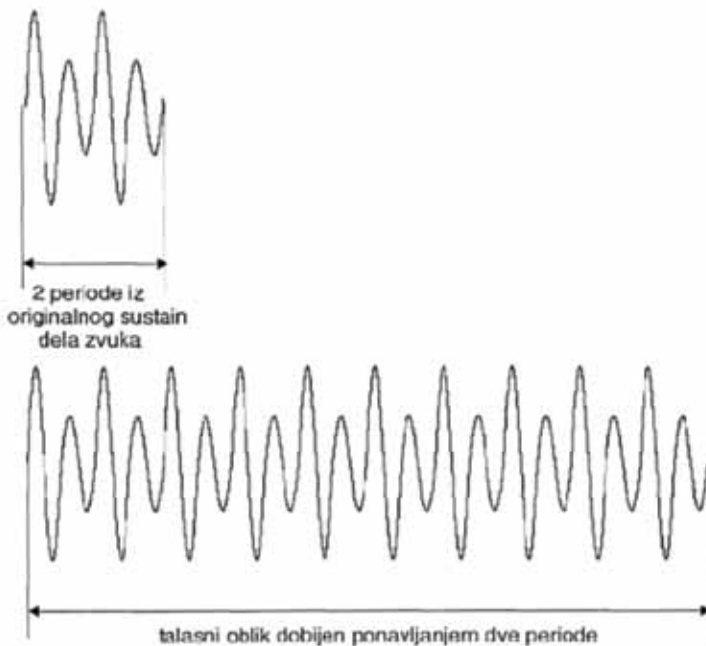
Jedna od primarnih tehnika koja se upotrebljava u wavetable sintezi, a rezultuje uštedom u broju odbiraka u raspoloživoj memoriji, je korišćenje petlje nad segmentom zvučnih odbiraka. Kod većine instrumenata zvuk se može modelirati tako da se sastoji od dva glavna dela: napad (*attack*) i zadržavanje (*sustain*). *Attack* deo predstavlja početak zvuka, i tu se amplituda i spektar zvuka menjaju naglo. *Sustain* deo je iza dela *attack*, i ovde se karakteristike zvuka menjaju sporije. Na slici 4.4 prikazani su pomenuti delovi.



Slika 4.4: Prikaz korišćenja tehnike petlje nad segmentom zvučnih odbiraka

U ovom primeru je pretpostavljeno da se ne menja spektar signala. U realnom slučaju promena spektra i amplitude je prisutna u oba dela, ali u cilju razumevanja postupka sinteze pretpostavićemo da je spektar konstantan. Isto tako, pretpostavićemo da amplituda signala u sustain delu opada po skoro linearnom zakonu. U *wavetable* sintezi može se uštedeti veći deo memorije ukoliko se umesto kompletnog *sustain* dela u memoriju smesti samo jedan njegov segment, koji se kasnije može reprodukovati neprestanim ponavljanjem. Na slici 4.5 p pokazane su dve periode segmenta *sustain* dela talasnog oblika sa slike 4.4 iz kojih se ponavljanjem može rekonstruisati pomenuti deo. Ukoliko je originalni zvuk imao približno konstantan spektralni sadržaj i amplitudu za vreme sustain dela, onda se ponavljanjem ovih perioda može dobiti prilično tačna reprodukcija originalnog zvuka.

Spektralne karakteristike zvuka mnogih instrumenata za vreme sustain dela su skoro konstantne, dok amplituda signala opada. Ovo se može simulirati, kao što je ranije pokazano, ponavljanjem izdvojenih perioda, ali i množenjem ovako dobijenih funkcija određenim opadajućim faktorom pojačanja. Na taj način dobija se željena anvelopa. Amplituda celokupnog signala se može modelovati pod pretpostavkom da se sastoji od nekoliko linearnih segmenata. U te svrhe se i u ovom tipu sinteze koristi klasična ADSR anvelopa signala koja se sastoji iz četiri dela: *Attack-Decay-Sustain-Release*.



Slika 4.5: Prikaz generisanja produženog trajanja sustain dela tona

Obično se u tabeli talasnih oblika čuvaju odbirci attack dela, i nekoliko perioda iz sustain dela. Ovi delovi se mogu nazvati inicijalnim zvukom i ponavljanim zvukom. Inicijalni zvuk se reprodukuje jednom, dok se ponavljani vrti u petlji sve dok ne stigne komanda za prestanak note. Generator anvelope konstruiše anvelopu svakog instrumenta ponaosob, i ova anvelopa se javlja na samom izlazu za vreme reprodukcije.

Reprodukovanje inicijalnog zvuka počinje kada stigne komanda o početku sviranja određene note, i trajanje ovog dela je fiksno i određeno brojem odbiraka u tom segmentu. Za svaki instrument trajanje ovog dela je različito. Reprodukovanje zvuka koji se ponavlja traje sve dok ne naiđe komanda o isključivanju note. Za vreme trajanja petlje, zavisno od instrumenta amplituda može biti sporo opadajuća ili konstantna. Kada stigne komanda o isključivanju note, generator anvelope kontroliše način generisanja promene amplitude *release* dela. Deo dela signala koji se ponavlja meri se brojem odbiraka i njegova dužina treba da bude celobrojni umnožak perioda osnovne učestanosti zvuka koji se generiše. Ukoliko to nije slučaj, javiće se neželjene promene osnovne učestanosti u trenutku kada počinje *sustain* deo. Praktično, dužina segmenta koji treba da se ponavlja za akustične instrumente može biti i nekoliko desetina, pa i stotina perioda osnovne učestanosti. Ako zvuk instrumenta sadrži prirodne efekte, kao što su *vibrato* ili *chorus*, tada je poželjno da uzorak za ponavljanje sadrži i ceo broj perioda tih efekata.

Naravno, postoje i instrumenti kod kojih se ne može izvršiti reprodukcija po opisanom sistemu generisanja anvelope i uzimanja uzoraka. Tako, na primer, zvuk koji generiše bubanj je kratak i njegove karakteristike se u vremenu menjaju dinamički. Zvuk takvih instrumenata ne možemo regenerisati ponavljanjem bilo kog dela iz njegovog originalnog signala. Tada se u memoriji moraju zapamtiti odbirci celokupnog talasnog oblika. Zvuk ovakvih instrumenata naziva se *one - shot* zvuk.

Za vreme regenerisanja zvuka originalnih instrumenata, proces sinteze se ne vrši prostim "lepljenjem" delova koji sačinjavaju regenerisani zvuk. Potrebno je izvršiti i procesiranje odbiraka pripremljenih za sintezu. Kada treba da se izvrši spajanje jednog dela sa drugim mora se voditi računa o spektralnim karakteristikama završnice prvog dela i početka drugog dela. Ukoliko se spektralne karakteristike u momentu spajanja razlikuju, uvo će čuti ove skokove, pa tako procesor mora da ove karakteristike u momentu spajanja skoro izjednači. Isto tako, promene amplituda na mestima spajanja pomenutih delova moraju biti kontinualne.

Odnos signal - kvantizacioni šum je za digitalni signal ograničen brojem bitova po odbirku i amplitudom digitalizovanog signala. Većina akustičkih muzičkih instrumenata dostiže vršnu vrednost vrlo brzo, a onda amplituda sporo opada. Uvo se automatski prilagođava ovim razlikama nivoa. Kako vremenom jačina signala slabi, a nivo maskiranja opada, uvo počinje da čuje kvantizacioni šum. Ovaj problem se rešava povećavanjem broja bitova po odbirku, ali postoji granica do koje se i u ovom postupku može ići.

Razne kompresione tehnike mogu poboljšati odnos signal - kvantizacioni šum. Ove tehnike smanjuju dinamički opseg odbiraka zvukova koji se čuvaju u memoriji. Za vreme reprodukcije, signal dobijen ovakvim odbircima se dekomprimuje i na taj način se vraća dinamika originalnom signalu. Korišćenje kompresije uslovljava smanjivanje broja bitova po odbirku i na taj način se štedi memorija. Naravno, prilikom upotrebe ovih tehnika treba voditi računa o opisanim neželjenim efektima koji bi mogli da nastanu za vreme regenerisanja muzičkog signala.

REZIME I PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

U ovom poglavlju je objašnjen pojam tabele talasnih oblika, kao i načina na koji se u nju upisuju i na koji se iz nje iščitavaju talasni oblici. Opisan je postupak promene osnovne frekvencije talasnog oblika u zavisnosti od načina iščitavanja iz tabele. Uvedeni su i objašnjeni pojmovi petlje nad segmentom zvuka i *one-shot* zvukova. Na kraju poglavlja su pojašnjene neke metode koje se koriste za izdizanje odnosa signal/kvantizacioni šum.

1. Objasniti pojam i principe upisa i čitanja iz tabele talasnih oblika.
2. Na koji način se vrši promena osnovne frekvencije signala u postupku Wavetable sinteze.
3. Objasniti razloge i principe razdvajanja klavijature na notne regione.
4. Objasniti postupak petlje nad segmentom odbiraka.
5. Šta su to "one-shot" zvuci? Navesti primere.
6. Koje su metode za poboljšanje odnosa signal/kvantizacioni šum u postupku Wavetable sinteze.

KLJUČNE REČI

Tabela talasnih oblika, čitač iz tabele, promena osnovne učestanosti, petlja nad segmentom odbiraka, odnos signal/kvantizacioni šum

MIDI PROTOKOL

V deo

Peto poglavlje sadrži šest podpoglavlja koja uvode studenta u izučavanje oblasti MIDI protokola: Istorijski razvoj (5.1), Povezivanje MIDI uređaja (5.2), MIDI kontroleri (5.3), Struktura MIDI protokole (5.4), Sistemske poruke (5.5) i MIDI Time Code (5.6). Student će detaljnije biti informisan o sledećim temama:

- 1. Istorijski razvoj MIDI protokola*
- 2. Povezivanje MIDI uređaja*
- 3. MIDI lanac i MIDI petlja*
- 4. Tipovi MIDI konekcija*
- 5. MIDI i računari*
- 6. Kompleksni MIDI sistemi*
- 7. Sekvenceri*
- 8. MIDI kontroleri*
- 9. Struktura MIDI protokola*
- 10. Kanalne poruke zvuka*
- 11. Sistemske poruke*
- 12. MIDI Time Code*

5.1 Istorija razvoja MIDI protokola

MIDI je skraćenica od engleskog izraza **Musical Instrument Digital Interface** koja označava industrijski standardizovan protokol koji omogućava komunikaciju i sinhronizaciju između elektronskih muzičkih instrumenata, kompjutera i ostale elektronske opreme. MIDI je moćan alat koji omogućava veću kreativnost u izvođenju i stvaranju muzike. Praktična realizacija MIDI protokola je proistekla iz sve veće potrebe za fleksibilnošću upotrebe elektronskih muzičkih uređaja, koji su svoju ekspanziju počeli da proživljavaju od kraja 60-ih godina XX veka, i potpuno je neodvojiva od stanja na tržištu tog tipa audio opreme u tom vremenskom periodu. Razmotrimo stoga, u cilju potpunijeg sagledavanja konteksta nastanka i razumevanja suštine MIDI protokola, istorijske okolnosti koje su dovele do njegovog razvoja.

Prvi elektronski muzički instrumenti, bazirani dobrim delom na primeni mehaničkih rešenja, prisutni su još od kraja devetnaestog veka. Uređaji pod imenom *Music Telegraph* (1876.), *Singing Arc* (1899) ili *Telharmonium* (1902) datiraju još iz perioda ranog razvoja primenjene elektrotehnike, dok se u prvim decenijama XX veka, prateći nagli razvoj elektrotehnike, u primeni našlo još nekoliko vrsta elektronskih muzičkih instrumenata, od francuskog *Ondes-Martenot*-a (1928) ili nemačkog *Pianorad*-a (1926), pa sve do ruskog *Theremin*-a (1919). Kao vrhunac te prve faze razvoja elektro-mehaničkih instrumenata razvijene su i danas rado korišćene *Hammond* orgulje (1929).

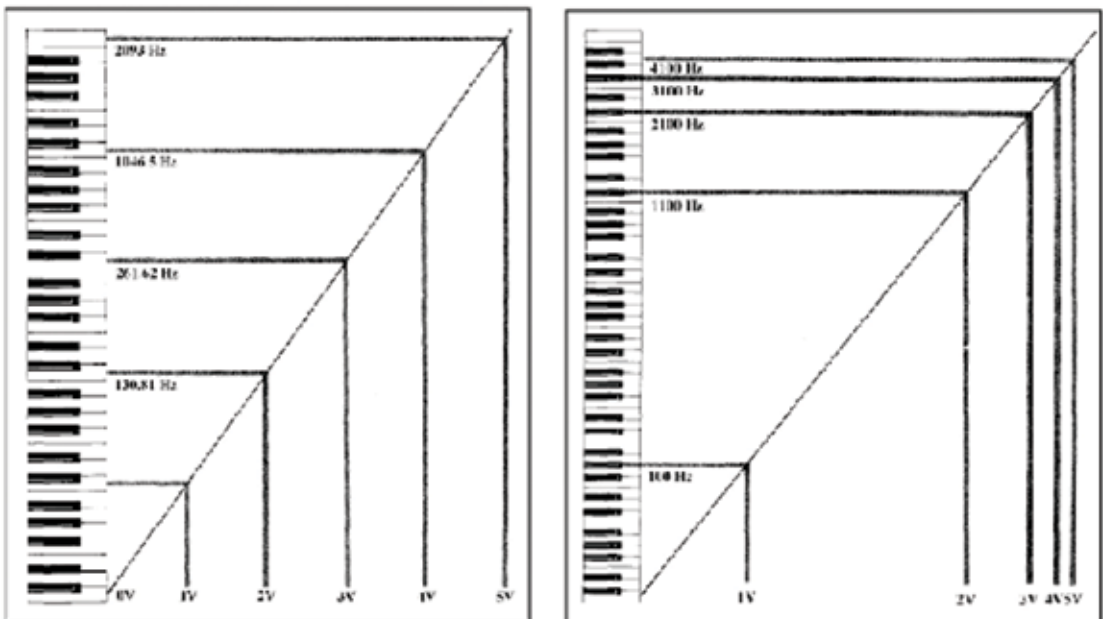
Pojam „sintisajzer“, koji označava elektronski muzički uređaj, je u upotrebu uveden početkom 50-ih godina prošlog veka, kada se pojavljuje uređaj kompanije RCA pod imenom *Electronic Music Synthesizer*, koji je bio veličine jedne osrednje sobe, i čija je realizacija koštala u to vreme basnoslovnih pola miliona dolara. Kompanija RCA je 1957. godine napravila i prvi programabilni elektronski muzički uređaj pod imenom *Mark II Sound Synthesizer*, nakon čega je termin sintisajzer i definitivno uveden u zvaničnu terminologiju audio tehnike. Isti termin, bez ikakvog prevođenja, koristi se i u našem jeziku. Ubrzani razvoj nauke i tehnologije, kao i sve veće interesovanje tržišta za ovaj tip muzičkih instrumenata, je doveo do njihovog brzog razvoja zahvaljujući pre svega pionirskim radovima vizionara kao što su *Robert Moog*, *Don Buchla*, *Harold Bode*, *Pete Zinovieff* i *Dave Cockerell*.

Najviše zahvaljujući toj generaciji audio inženjera, muzičara i entuzijasta, sintisajzeri su izašli iz univerzitetskih laboratorija i stigli u ruke muzičara. Ubrzani razvoj popularne muzike tokom 60-ih godina prošlog veka (u to vreme je bio izuzetno popularan album “*Switched on Bach*” *Walter-a Carlos-a* (1968), koji je ukazao na sve mogućnosti upotrebe sintisajzera u domenu do tada nedodirljive klasične muzike), i pojave praktičnih i pristupačnih modela na tržištu, poput *MiniMoog-a* (1970), sami muzičari kao i publika postaju sve više zainteresovani za ovaj tip instrumenata koji je otvarao potpuno nove horizonte u kreiranju i sviranju muzike. Sintisajzeri bazirani na upotrebi analogne elektronike i ranih integrisanih kola, kao što su *Moog*, *ARP* i *EMS*, su zaista otvorili vrata nadolazećoj industriji, ali se tek pojavom japanskih kompanija poput, *Korg-a*, *Rolanda-a* i *Yamaha-e* sredinom 1970-tih potencijal sintisajzera pretvorio u kvalitet i kvantitet, dodatno im uvećavajući dostupnost i popularnost. Nije daleko od istine ako se kaže da su 70-te godine XX veka u istoriji razvoja muzike dobrim delom obeležene i naglim uplivom sintisajzera u sve oblike muzičkog izraza.

Svi sintisajzeri iz te epohe su bili zasnovani na upotrebi tada jedino dostupne analogne tehnologije koja je imala svoja jasna ograničenja u smislu mogućnosti koje je pružala. Instrumenti pravljeni u to doba reprodukovali su relativno proste zvuke, često siromašne harmonicima. Mogućnosti dodatnih manipulacija su takođe bile svedene. Većina sintisajzera iz tog perioda je bila monofona, što znači da se u jednom trenutku mogao generisati samo jedan ton. Muzičari su, naravno, time bili frustrirani: nemogućnost upotrebe višezvučja u sviranju je prilično ograničenje na koje muzičari jednostavno nisu navikli. Taj problem je često rešavan sviranjem više od jednog sintisajzera u jednom trenutku, što je ubrzo dovelo do pojave tzv. “*Wall of Synthesizers*”, što je izraz koji označava pojavu da se muzičari okružuju velikim brojem sintisajzera koje sviraju po potrebi, i iza kojih se često nisu mogli ni videti. Bitno ograničenje je bila i nemogućnost razdvajanja kontrolne površine – klavijature, od ostatka instrumenta, kao i nemogućnost “pamćenja” odsvirane sekvence i njenog naknadnog reprodukovanja. Kao poseban problem koji se sve više nametao je bila i potpuna nekompatibilnost između uređaja koje su na tržište izbacivali različiti proizvođači. Sve to je bilo zatečeno stanje u osvit razvoja

digitalne tehnologije, koja je svoju primenu i te kako našla u ovom domenu, nudeći rešenja za praktično sve navedene probleme.

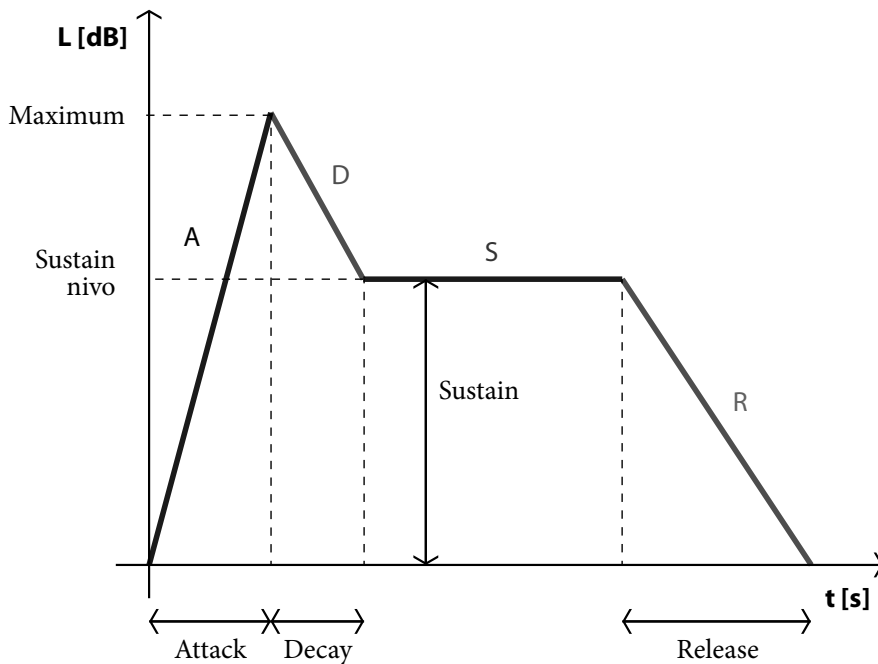
Zvuk koji se u analognim sintisajzerima generisao nastajao je pomoću naponski kontrolisanih oscilatora (*Voltage Control Oscillator* - VCO). Naime, pritiskom na dirku klavijature generisao se prvo određeni napon, da bi se zatim u zavisnosti od tog napona pobuđivao oscilator koji je generisao ton čija je osnovna učestanost bila dodeljena tom naponskom nivou. Najčešće korišćen standard je bio da se naponi između oktava razlikuju za po 1V. Tako, na primer, srednje C generisalo je napon od 2V, sledeća polunota CIS generisala je napon od $2 + 1/12$ V, D - $2 + 2/12$ V itd. Pritiskom dirke note C u sledećoj oktavi, generisao se napon od 3V. U isto vreme na tržištu su postojali i sintisajzeri kod koji je naponska razlika od 1V bila vezana za frekvencijsku razliku od 1000 Hz (*slika 5.1*). Naravno da ova dva tipa standarda ni na jedan način nisu bila kompatibilna, što je u startu onemogućavalo povezivanje dva takva uređaja.



Slika 5.1: Dva standarda dodeljivanja naponskih nivoa klavijaturama sintisajzera:
1V po oktavi i 1V za svakih 1000 Hz

Činjenica je da su se proizvođači i u to vreme trudili da sve te probleme na neki način prevaziđu. Dva instrumenta koja su koristila isti naponski standard su teoretski mogla biti povezana, na taj način da je jedna dirka mogla da kontroliše dva oscilatora - jedan na matičnom uređaju i drugi na priključenom. Sintisajzer koji je proglašen za master morao je imati izlazni priključak za svoj VCO, dok je slave uređaj imao isti takav ulazni priključak. Na taj način, pritiskom dirke na klavijaturi master uređaja, preko priključka i kabla, generisani napon je mogao da se prenese do oscilatora drugog, slave sintisajzera sa ulaznim priključkom.

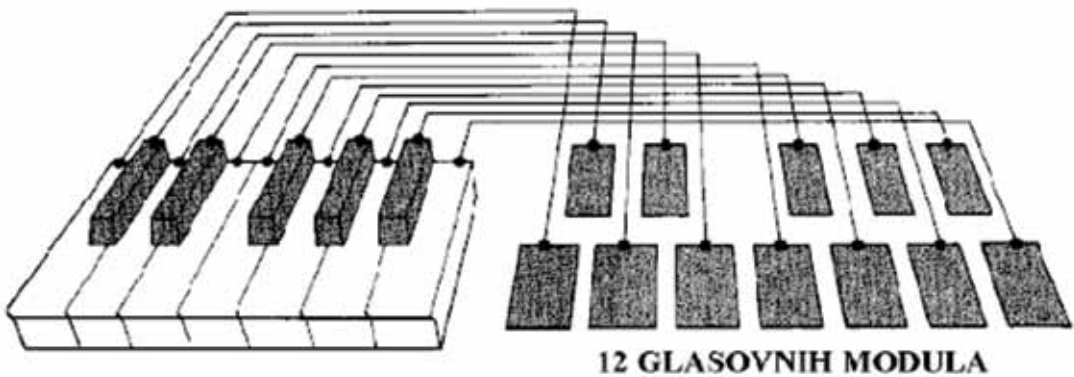
Dodatne mogućnosti su nuđene i u formi generisanja dva nezavisna napona pritiskom na jednu dirku klavijature: pomenuti napon za kontrolu oscilatora (VCO) i napon za kontrolu pojačanja (*Voltage Controlled Amplifier* - VCA). Napon VCA se najčešće kretao u granicama od 0V do 10V. Naponom od 0V isključivao se audio pojačavač, a naponom od 10V dobijalo se maksimalno pojačanje. Iz navedenog se jasno da zaključiti da je jačina zvuka zavisila od jačine pritiska dirke na klavijaturi, čime je omogućena kontrola dinamike sviranja, u smislu generisanja različite glasnoće zvuka u zavisnosti od pritiska kojim se deluje na dirku.



Slika 5.2: Standardan izgled oblika ADSR anvelope

Dodatno poboljšanje kvaliteta samog tona koji se generiše, kao i njegove sveukupne dinamike je ostvareno uvođenjem tzv. generatora anvelope. Ovaj generator ima 4 osnovna parametara: uspon tona (*attack*), inicijalno slabljenje (*decay*), nivo na kojem se ton zadržava (*sustain level* - koji se održava sve dok je prst na dirki klavijature) i vreme otpuštanja (*release time* - vreme od trenutka otpuštanja dirke do potpunog nestajanja tona). Po početnim slovima svakog od ovih delova – *Attack*, *Decay*, *Sustain*, *Release*, ovaj tip generatora je poznat kao ADSR generator. Ideja iza uvođenja baš ovakvog oblika generatora anvelope signala je bila u omogućavanju preciznijeg podražavanja tona prirodnih instrumenata. Naime, analizom načina na koji se tonovi pojedinih muzičkih instrumenata razvijaju, traju i nestaju u vremenu se došlo do zaključka da ovakav izgled grafika dovoljno dobro opisuje realno stanje stvari: tonovi različitih instrumenata se mogu prilično tačno okarakterisati različitim trajanjem i nivoima svakog od ova četiri segmenta.

Razvoj analogne tehnologije i pad cena komponenti omogućio je i pojavu polifonih sintisajzera. Potpuna polifonija, koja je podrazumevala postojanje zasebnih glasovnih modula za svaku dirku ponaosob (*slika 5.3*) je bila nepraktična i preskupa.



Slika 5.3: Princip funkcionisanja potpune polifonije

Znatno korišćenije i praktičnije rešenje je bilo projektovanje polifonih sintisajzera na principu tzv. dodeljivanja glasovnih modula. Ovaj princip se bazira na razmišljanju da muzičar ne može držati sve dirke pritisnute u jednom trenutku, te da je broj istovremeno reprodukovanih glasova moguće ograničiti. Ovakvo rešenje je podrazumevalo postojanje kontrolne logike – procesora, koja je prvi slobodan glasovni modul dodeljivala trenutno pritisnutoj dirki. Primer principa realizacije ovako zamišljenog sintisajzera koji omogućava istovremeno generisanje 6 glasova je prikazano na *slici 5.4*.



Slika 5.4: Princip rada šest polifonog sintisajzera

Pojava polifonih sintisajzera je dodatno naglasila i usložnila problem povezivanja instrumenata. Još veći problem u povezivanju uređaja nastao je pojavom sekvencera i ritam mašina. Vremenom su konstruisani sve moćniji i moćniji uređaji, čiji napredak tada korišćena tehnologija njihovog povezivanja nije mogla da isprati.

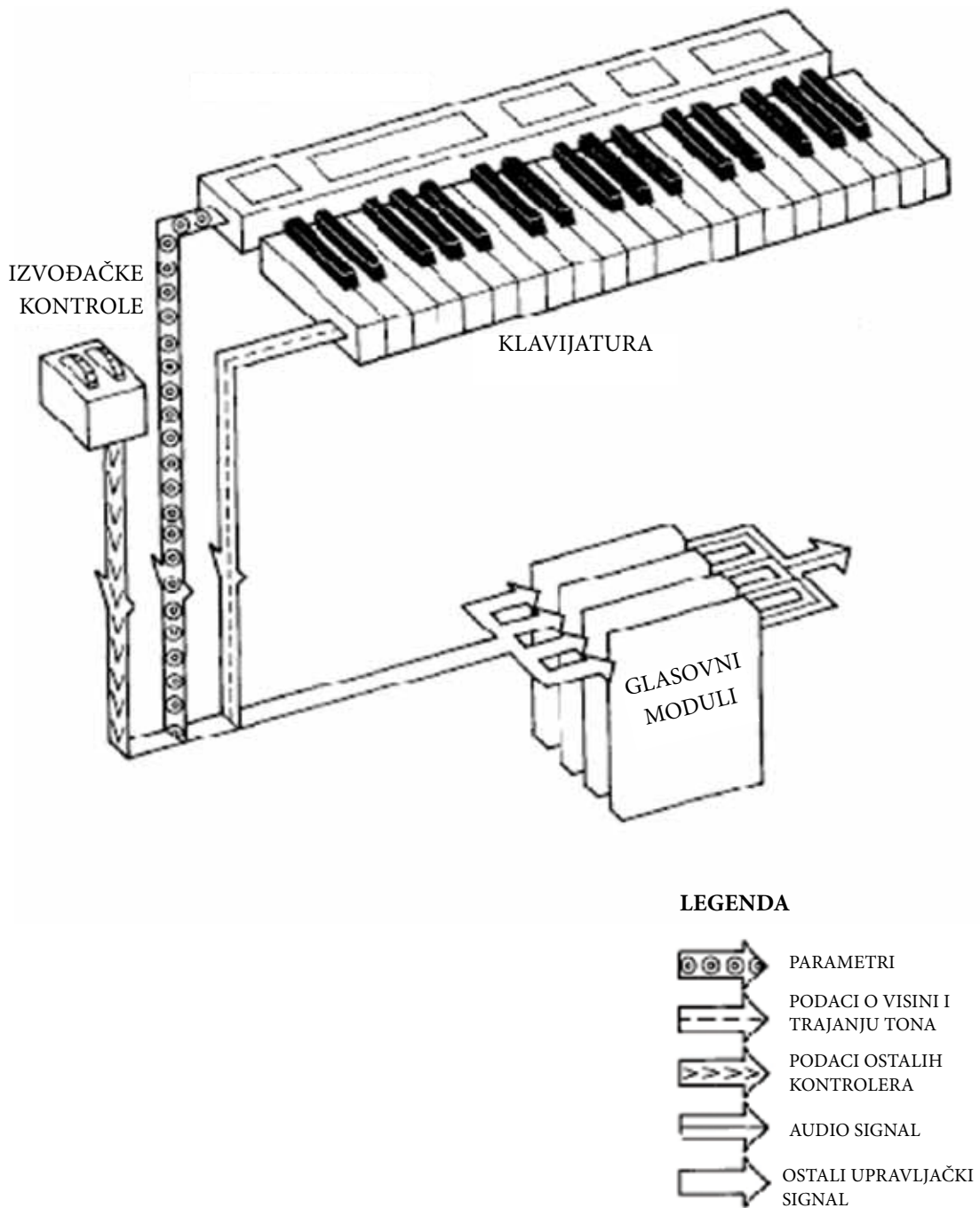
Problem povezivanja je sve vreme podrazumevao i rešavanje problema sinhronizacije. Naime, svaki uređaj posedovao je svoj unutrašnji takt, koji je u jednakim vremenskim intervalima emitovao povorku najčešće pravougaonih impulsa. Da bi se izvršila sinhronizacija više uređaja, došlo se na ideju da je dovoljno startovati (inicijalizovati) njihove taktove istovremeno. Međutim, to nije dovelo do željenog rezultata, obzirom da su generatori takta u svakom uređaju ponaosob vremenski prilično neujednačeni. Tempo je varirao u vremenu usled raznih električnih problema, poput napajanja, nestabilnosti korišćenih komponenata, temperaturnih koeficijenata i sl. Ovo su sve bili realni i nedopustivi problemi: ako uređaji ne bi startovali u istom trenutku, tj. ako bi jedan kasnio za drugim samo za 15ak milisekundi u radu je bilo moguće detektovati veoma neprijatnu pojavu eha.

Taj problem je prevaziđen tako što su svi uređaji sinhronizovani jednim generatorom takta - taktom tzv. *master* uređaja. Prilikom uključivanja ritam mašine ili sekvencera, takt je obično bio stopiran, a za svaki slučaj postojale su i kontrole kojima se takt mogao zaustaviti. Ritam mašine su bile programirane tako da je takt na početku bio isključen, a uključivanje takt generatora vršilo se pedalom. Ako bi svi uređaji imali ulaz za generator takta, sinhronizacija bi se izvršila jednostavno. Brzina takta se definiše kao broj impulsa po četvrtini note. Postoje različite brzine: 24, 48, 96, pa čak i 384 impulsa po četvrtini note. To znači da su odgovarajuće brzine za 4/4 vremena: $4 \times 24 = 96$, $4 \times 48 = 192$, ..., $4 \times 384 = 1536$ impulsa.

U memoriji ritam mašina na različitim adresama smešteni su pokazivači na odbirke (semplove) određenih udaraljki (timpan, doboš, činela, konga ...). U svakom taktu procesor ritam mašine obiđe sve adrese i proverava da li je predviđeno da se neka od udaraljki na tim adresama čuje u tom trenutku. Kada se na nekoj od adresa ustanovi da određena udaraljka treba da se čuje, generiše se impuls koji u bazi nalazi odgovarajuće odbirke koje preko generatora zvuka šalje na izlaz. Ukoliko bi želeli da programiramo ritam u vremenskoj podeli na četvrtinu note – jedan impuls po četvrtini bi bio dovoljan. Međutim, tako generisan zvuk je prilično robotizovan. Povećanjem rezolucije (više impulsa po četvrtini note) omogućava se prirodnija, spontanija ritmička sekvenca.

Kao dodatan problem javljala se i sinhronizacija elektronskih muzičkih instrumenata sa ostalim karikama audio lanca koje su korišćene u praksi. Iz tog razloga je u to vreme često korišćena metoda da se takt impulsi snime na magnetnu traku i da se kasnije u studijskom radu koriste za sinhronizaciju. Ova metoda je bila prilično problematična i nikada nije do kraja zaživela u praksi jer je takt nestajao na mestima gde je traka izgužvana, vremenom se dešavalo da zapis "bledi" a sama sinhronizacija je uvek morala da počne od početka trake. Nešto bolji način za snimanje takta na traku bio je da se umesto snimanja pravougaonih impulsa snimaju dve različite učestanosti - jedna za postojanje pravougaonog impulsa i druga kada impuls ne postoji. Ovaj način kodovanja poznat je pod imenom kodovanje sa promenom učestanosti (eng. *Frequency Shift Keying* - FSK). Ni ova ideja nije nikada zaživela do kraja jer proizvođači nisu imali standard za učestanosti koje se koriste. Standard koji bi snimljeni FSK prevodio u neki univerzalni format, mogao je da reši problem, ali je realizacija te ideje bila jako skupa. Uočene probleme povezivanja uređaja proizvođači su pokušavali da reše, ali uvek i iznova samo u okviru palete uređaja koju su nudili tržištu svaki od njih pojedinačno. Tako je Roland razvio svoj digitalni interfejs pod nazivom *Digital Control Buss* – DCB, Yamaha je imala svoj tzv. *Key Code* interfejs, *Oberheim* je pak imao svoj standard itd.

Pravu malu revoluciju u načinu tretiranja svih navedenih problema je uveo čovek pod imenom *Dave Smith*, projektujući svoj polifoni sintisajzer *Prophet 5*. On je u praksu uveo tzv. *Sound Producing Engine* čiji se rad zasniva na činjenici da se svi parametri pojedinačnih glasova digitalno kontrolišu. Sve promene pojedinačnih parametara se digitalizuju i kao takve mogu biti korišćene za kontrolu više glasovnih modula istovremeno. *Prophet 5* je prvi sintisajzer kod kojeg je postojao mikroprocesor koji je sve vreme pratio i digitalizovao sve promene kontrolnih parametara generisanih dirkama klavijature. Dve su bitne posledice proizašle iz ovakvog načina digitalizovanja kontrolnih parametara: sve promene postalo je moguće pamtit (sintisajzeri sa memorijom, presetima i sl.), a kontrolne površine (klavijature, pedale i sl.) više nisu bile neodvojivi deo analognog kola za generisanje signala, čime je otvoren put za korišćenje danas veoma popularnih kontrolera. Ovakav način tretiranja problema u toku signala unutar jednog elektronskog muzičkog instrumenta je prikazan na slici 5.5.



Slika 5.5: Principska šema funkcionisanja sintisajzera sa kontrolama i glasovnim modulima kao nezavisnim elektronskim celinama

Ovakva situacija je dovela do potrebe za definisanjem standardnog protokola za komunikaciju između kontrolera i kola za generisanje zvuka. *Dave Smith* je, nakon uspeha ostvarenog sa *Prophet 5* sintisajzerom, sistematski počeo da se zalaže za omogućavanje konekcije ulazno/izlaznih parametara na svim uređajima, uz istovremeno standardizovanje protokola na nivou bitnih proizvođača, kao neophodnog preduslova da cela stvar uspe. S obzirom na opisanu haotičnu situaciju na tržištu, raspoloženje proizvođača da se stvari napokon standardizuju, te očekivanja krajnjih korisnika, ove Smith-ove ideje su naišle na opštu podršku i odobravanje.

Nakon dogovora na relaciji američkih i japanskih proizvođača opreme, strukovnih audio inženjera i firme *Sequential Circuits Inc.* koju je predvodio *Dave Smith*, predložena je prva verzija standarda na AES konvenciji u *New York-u* 1981. godine. U januaru 1983. godine na sajmu audio opreme u *Los Angeles-u* *Dave Smith* je uspešno i po prvi put demonstrirao povezivanje dva uređaja različitih proizvođača, koji ostvaruju punu komunikaciju. U istoriji razvoja audio tehnike ostaje zabeleženo da je prva komunikacija putem MIDI protokola ostvarena između sintisajzera *Prophet 600* i *Roland JP-600*. Iste godine u avgustu objavljena je zvanična specifikacija standarda pod imenom MIDI 1.0. Na taj način, MIDI je i zvanično rođen.

Usvajanje MIDI protokola i početak njegove primene veoma brzo i konkretno se osetio i na tržištu audio opreme. Potreba za postojanjem pomenutog “zida sintisajzera” je prestala da postoji, ta vrsta uređaja je počela sve više da se pravi u tzv. “rack mount” verzijama, što je podrazumevalo da se više nezavisnih zvučnih modula smeštenih u odgovarajući rek orman kontrolišu jednim zajedničkim kontrolerom. Iste godine kada je MIDI 1.0 standard usvojen isti protokol ratifikuju i tadašnji vodeći proizvođači kompjuterske opreme, kao što su Apple, Commodore, Amiga i IBM. Atari ST je prvi računar koji se pravio sa već ugrađenim MIDI priključcima, što ga je već u drugoj polovini 80-ih godina pozicioniralo kao neophodan deo studijske opreme. U to vreme se, na početku kao hardverski uređaji, na tržištu sve više pojavljuju tzv. sekvenceri, koji imaju mogućnost snimanja, editovanja i naknadnog reprodukovanja MIDI, a nešto kasnije i audio sekvenci. Sa razvojem računarske tehnologije su počeli da se pojavljuju i sekvenceri u softverskoj verziji, koji danas predstavljaju verovatno najrasprostranjeniji i najčešće upotrebljavan oblik softvera koji se koristi za namenski rad sa zvukom. Pomenuti problemi sa sinhronizacijom različitih elektronskih uređaja u audio lancu su takođe rešavani upotrebom MIDI protokola, koji je definisao tzv. *MIDI Time Code*, koji se u literaturi označava skraćenicom MTC. MTC je neka vrsta podprotokola u okviru MIDI protokola koja je imala osnovnu nameru da sinhronizuje istovremeni rad više MIDI sekvenci ili uređaja u MIDI lancu. MTC se u praksi pokazao kao veoma pouzdan način sinhronizacije, tako da se i danas, 30 godina od početka njegove implementacije veoma često koristi kao osnova za sinhronizaciju digitalnih audio uređaja.

Praksa upotrebe MIDI 1.0 standarda tokom 80-ih godina prošlog veka je ukazala na jedan praktičan problem. Naime, u to vreme nisu postojali standardni zvuci za različite vrste sintisajzera koji su bili kontrolisani putem MIDI-ja. To je za posledicu imalo da je MIDI sekvenca odsvirana na jednom instrumentu potpuno drugačije zvučala prilikom reprodukovanja na drugom tipu sintisajzera. Ovo je odstupalo od početne ideje unifikacije i standardizacije zvučanja instrumenata povezanih MIDI protokolom, tako da se pojavila potreba za uvođenjem seta standardnih zvukova koje bi posedovali svi sintisajzeri na tržištu. Iz tog razloga je 1991. uveden General MIDI (GM1) standard koji je standardizovao 128 tipova zvuka zajedničkih za sve sintisajzere: postavljen je standard zvučanja i "mesta" na kojem se ti zvuci nalaze unutar same interne memorijske strukture sintisajzera. U to vreme (1995.) je formirana i asocijacija proizvođača opreme bazirane na upotrebi MIDI protokola, MIDI Manufacturer Association (MMA), koja je na sebe preuzela brigu o daljem razvoju i primeni protokola.

MIDI protokol je svoju ulogu našao i u okviru interneta, pre svega zahvaljujući svojoj sveukupnoj robustnosti i izuzetno malim bitskim protocima koje koristi. Sama činjenica da MIDI poruke sa sobom ne nose direktnu informaciju o zvuku, već samo instrukcije sintisajzeru koji zvuk i na koji način da reprodukuje, omogućile su tako superiorne bitske protoke. Dok je za audio zapis standardnog CD kvaliteta (44.1 KHz, 16 bita) potrebno obezbediti protok koji je reda veličine 10 Mb/min., prenos MIDI poruka zahteva bitski protok od svega nekoliko desetina Kb/min., što je izuzetno pogodovalo potrebama prenosa informacija putem interneta u ranoj fazi njegovog razvoja. Ukoliko ste na prijemu imali računar sa zvučnom karticom koja na sebi ima sintisajzer, povlačenjem MIDI poruka sa interneta ste u realnom vremenu mogli čuti zvuk. U tom trenutku, samo je MIDI bio u stanju da obezbedi takav komfor. Čitava industrija pravljenja tzv. MIDI fajlova je u pravom smislu te reči procvetala, kao način da se informacije i zapisi o muzici prenose i razmenjuju putem interneta.

5.2 Povezivanje MIDI uređaja

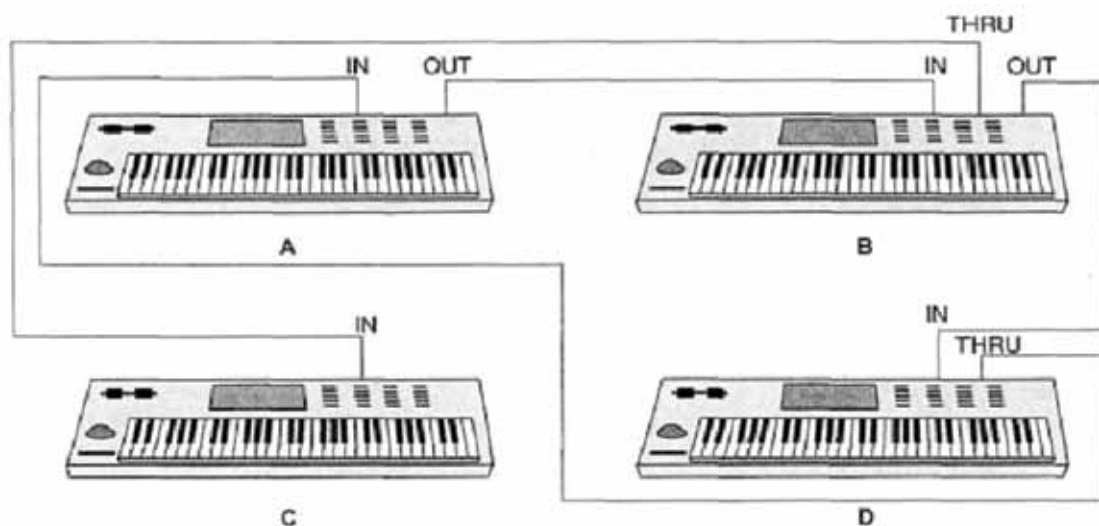
MIDI lanac i petlja

MIDI protokol se prenosi kablom koji povezuje specijalne (MIDI) portove na uređajima. Svaki uređaj ima tri MIDI porta i to: MIDI IN, MIDI OUT i MIDI THRU. Na portu MIDI IN vrši se primanje MIDI poruka, na portu MIDI OUT slanje, a port MIDI THRU omogućava ulaz i prosleđivanje MIDI poruka nadalje bez promene ulaznih podataka. Poželjno je da kabal za povezivanje ovih portova bude dug oko 20 stopa (oko 6 - 7 metara), dok se komercijalno ovi kablovi proizvode u dužinama od 5 stopa (1,5 - 1,8 m) i 10 stopa (3 - 3,3 m). MIDI 1.0 standardom je definisan petopolni DIN konektor kao tip konektora koji se koristi u ove svrhe, dok se danas MIDI konekcija u najvećem broju slučajeva ostvaruje preko USB porta.

Najprostije povezivanje sastoji se u priključivanju MIDI OUT porta jednog uređaja za MIDI IN port drugog. U ovoj konfiguraciji pritiskanje dirke na klavijaturi prvog uređaja usloviće pojavu zvuka na oba uređaja. Međutim, pritiskanje dirke na drugoj klavijaturi usloviće pojavu zvuka samo na torn uređaju.

MIDI lanac sastoji se od više priključenih uređaja. OUT port prvog uređaja se priključuje na IN port drugog, THRU port drugog na IN trećeg, THRU trećeg na IN četvrtog itd. Ako su svi uređaji podešeni da primaju podatke na istom kanalu, pritiskanje dirke na prvom rezultovaće zvukom na svim uređajima. Međutim, isto kao i ranije, pritiskanjem dirke na bilo kom drugom uređaju usloviće da se zvuk čuje samo na njemu. Kao što je ranije rečeno, MIDI THRU port prenosi iste podatke nadalje onako kako ih primi na MIDI IN portu. Moguće je vršiti i povezivanje u petlju. MIDI OUT port prvog uređaja se povezuje sa MIDI IN portom drugog, a MIDI OUT port drugog sa MIDI IN portom prvog. Obzirom da MIDI OUT port ne prenosi podatke koji dolaze na ulazu u MIDI IN port, ne može se stvoriti beskonačna petlja. Na ovaj način pritiskanje dirke na bilo kojem uređaju usloviće pojavu zvuka na oba uređaja.

Povezivanje uređaja u petlju korišćenjem sva tri porta postaje praktično neizvodljivo već i kod malog broja uređaja. Tako, na primer, ako port MIDI OUT uređaja A povežemo sa portom MIDI IN uređaja B, port MIDI THRU uređaja B sa portom MIDI IN uređaja C, port MIDI OUT uređaja B sa portom MIDI IN uređaja D i MIDI THRU port uređaja D sa portom MIDI IN uređaja A, rezultat je sledeći: ako pritisnemo dirku na uređaju A, čuju se i uređaji B i C. Sviranje na uređaju B čuje se i na uređajima D i A, dok se sviranje na uređajima C i D čuje samo na tim uređajima. Prethodno opisani način povezivanja prikazan je na *slici 5.6*.



Slika 5.6: Povezivanje više uređaja u petlju korišćenjem sva tri porta

MIDI i računari

Proizvođači računara su brzo došli do zaključka da bi računar mogao biti izvanredan uređaj za MIDI povezivanje, jer komunicira sa okolinom preko digitalnih informacija. Kako brzina kojom se prenose podaci preko MIDI protokola (31.25 kBaud) nije standardna brzina za računar, trebalo je konstruisati interfejs preko kojeg bi se razmenjivale informacije između računara i MIDI uređaja. Apple Computers i Commodore su bili prvi računari upotrebljeni u ovu svrhu. Rolland je konstruisao prve kartice za IBM kompatibilne računare, dok je Atari konstruisao kompletno nov računar sa ugrađenim MIDI portovima. Danas postoje različiti MIDI interfejsi za skoro sve tipove računara.

Da bi računar mogao da posluži ovoj nameni morao je, naravno, da se programira određeni softver. Prvo su izrađeni računarski programi za sekvencere. Obzirom da su sekvenceri uređaji koji mogu da izvrše snimanje, kako u internoj memoriji tako i na prenosnom medijumu, i kasnije reprodukuju muziku, vrlo brzo je uočena pogodnost računara za tu vrstu primene. Prvi programi su bili relativno prosti, ali su vremenom prerastali u veoma moćne softverske pakete u kojima postoji mogućnost da se pogrešno odsvirana melodija na klavijaturi u programu ispravi, da se vremenski resinhronizuju melodije u odgovarajućem taktu itd. Takođe, danas postoje programi koji imaju čitave biblioteke boja različitih instrumenata i muzičkih efekata, tako da omogućavaju pripremanje muzičkog materijala korišćenjem samo jedne klavijature kao kontrolera.

Danas je računar moćniji od bilo kog sintisajzera, obzirom da može da generiše boje prisutne u skoro svakom sintisajzeru, dok svaki sintisajzer ima ograničen broj boja. Računar na interfejsu ima sva tri porta i može se priključiti u lancu ili u petlji, kao svaki drugi MIDI uređaj. Specifičnost računara u odnosu na ostale muzičke uređaje je u tome što računar može da pošalje i primi podatke po svih 16 MIDI kanala simultano, čime računar postaje moćan muzički instrument koji se često može tretirati kao kompletan elektronski muzički orkestar.

Kompleksni MIDI sistemi

Kompleksni MIDI sistemi su audio sistemi koji se sastoji iz više računara i hardverskih uređaja koji su međusobno povezani putem MIDI ili Ethernet LAN protokola u jedan veliki lanac. U ovom poglavlju biće opisane vrste i principi povezivanja kompleksnih MIDI sistema, konfiguracije računara i hardverskih kontrolera potrebnih za realizaciju jednog ovakvog sistema, kao i osnovne vrste softvera neophodnih za rad u ovakvim sistemima.

Postoje tri vrste kompleksnih MIDI sistema: softverski, hardverski i kombinovani. Softverski MIDI sistemi su najkompleksniji i mogu se podeliti u tri podvrste:

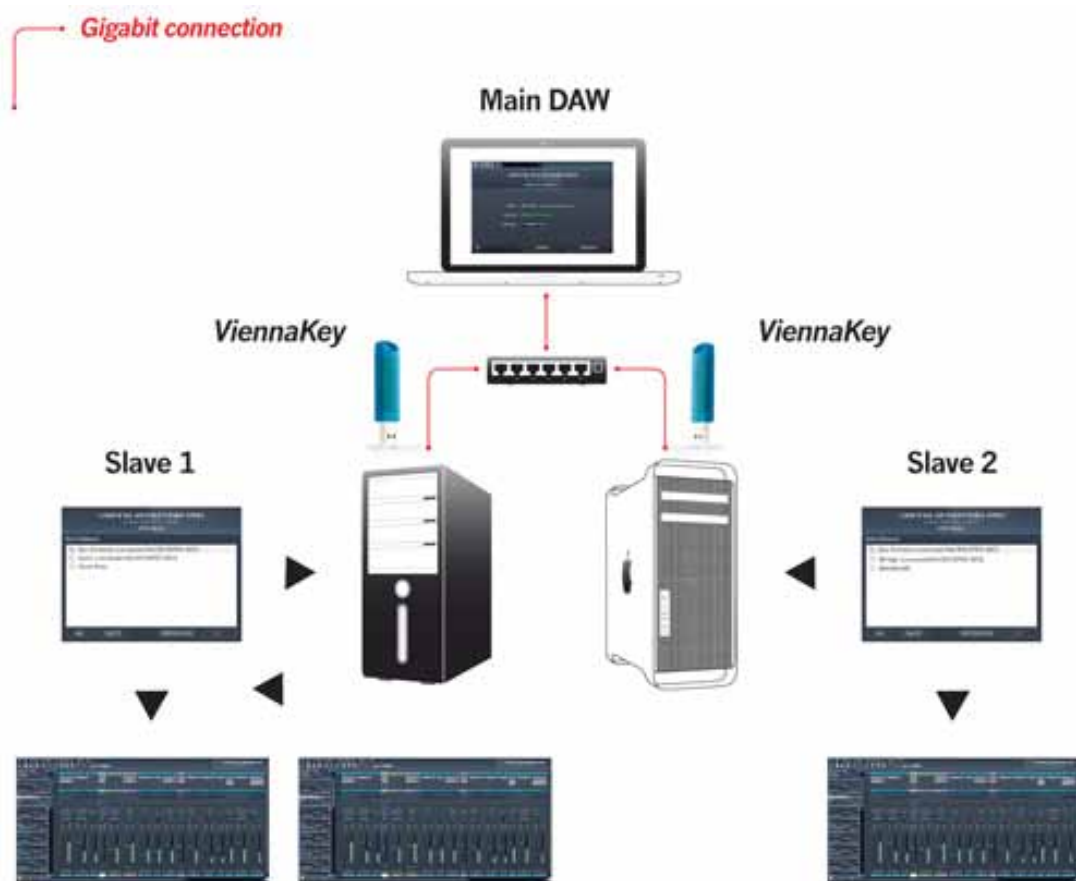
1. Interni MIDI sistemi.
2. LAN MIDI sistemi.
3. ReWire MIDI sistemi.

Interni MIDI sistemi se realizuju na jednom računaru uz pomoć više softverskih semplera i sintisajzera koji imaju više izlaza i ulaza koji se stiču u jednom sekvenceru. Po standardu svaki današnji sempler ima maksimalno 16 izlaza. Prednosti ovakvih sistema su jednostavnost povezivanja i korišćenja, kao i činjenica da se u radu koristi samo jedan računar na kojem se nalaze svi virtuelni instrumenti i banke zvukova. Najveća i verovatno jedina praktična mana ovog sistema je ograničenje radnog takta procesora i količine RAM memorije, što dovodi do ograničenosti istovremenog korišćenja više polifonih instrumenata i njihovog sviranja polifonih melodija. Dosta je ograničena i mogućnost korišćenja velikog broja virtuelnih instrumenata. Mogućnosti rada, dakle, direktno su limitirane snagom centralnog procesora računara i konkretnim tipom korišćene računarske konfiguracije.

LAN MIDI sistemi su realizovani uz pomoć više računara koji su međusobno povezani putem lokalne LAN mreže, i koji rade na „master – slave“ principu. Na glavnom, master računaru je postavljen master sekvencer, a na pomoćnim računarima se nalaze VST Host aplikacije koje putem LAN mreže šalju signale po kanalima na glavni računar. Najveća prednost ovakvog sistema je praktična neograničenost istovremenog sviranja polifonih

instrumenata usled činjenice da se koristi više računara, što automatski smanjuje opterećenje procesora i RAM memorije na svakom računaru pojedinačno, dok je osnovna mana ovakvog sistema komplikovanost povezivanja i održavanja.

Kako se u praksi povezuje jedan LAN MIDI sistem? Na glavni računar se instalira željeni sekvencer u kojem se snima muzika. Na sekundarne, slave računare se instaliraju VST Host aplikacije koje omogućavaju slanje audio signala u glavni računar. Na glavni računar se onda instalira ista ta aplikacija, ali u vidu plug-in dodatka koji treba da omogući komunikaciju između master i slave mašine. Potrebno je imati i internet ruter koji će omogućiti vezu između glavnog i sekundarnih računara. Kada se ostvari takvo povezivanje, putem IP adresa se mogu povezati sekvencer sa glavnog računara i host aplikacije sa sekundarnih. Adrese sa sekundarnih računara se upisuju u plug-in host aplikacije u sekvenceru glavnog. Od velike je važnosti da sve adrese budu tačno upisane, inače će doći do gubitka veza između računara.



Slika 5.7: Šema povezivanja LAN MIDI sistema

ReWire MIDI sistemi se realizuju uz pomoć dva sekvencera na jednom računaru. Rade na softverskom „master-slave“ principu. Glavne prednosti ovakvog načina povezivanja su zajedničko korišćenje više sekvencera istovremeno i simultano korišćenje njihovih različitih opcija. Mane su, slično kao i kod internih MIDI sistema, limitiranost korišćenja različitih opcija i mogućnosti koje stoje na raspolaganju usled ograničenosti radnog takta procesora i RAM memorije računara. Ovaj tip sistema se povezuje putem sledećeg niza relativno prostih koraka:

1. Aktivira se glavni sekvencer.
2. Aktivira se ReWire sekvencer koji se automatski postavlja u “slave mod”.
3. U glavnom sekvenceru napravi se MIDI traka i kao izlaz te trake odaberemo instrument iz ReWire uređaja.

Nakon toga, ovakav sistem je spreman za neometan rad.

Hardverski MIDI sistemi se realizuju uz pomoć računara i više hardverskih semplera i sintisajzera. Povezuju se putem MIDI kablova preko eksternih višekanalnih MIDI interfejsa. Obično u sistemu postoji master klavijatura koja je povezana sa sekvencerom na računaru za snimanje i preko koje se kontrolišu ostali uređaji u sistemu. Prednosti ovakvog sistema su takve da su memorija i procesor računara potpuno rasterećeni usled korišćenja eksternih hardverskih instrumenata. Jedina mana sa kojom se mnogi suočavaju i danas je ta što ovakve postavke zauzimaju dosta fizičkog prostora u studiju i iziskuju dodatna novčana sredstva za kupovinu više zasebnih uređaja koji se koriste u sistemu.



Slika 5.8: Šema povezivanja hardverskog MIDI sistema

Za potrebe snimanje, ovakvi sistemi se povezuju i analogno i digitalno. Na računaru na kojem je sekvencer mora biti priključen audio interfejs (zvučna karta) sa više ulaza i eksterni MIDI interfejs sa više ulaza i izlaza. Pored toga, master klavijatura mora biti priključena na računar preko DIN ili USB veze. Hardverski sintisajzeri se povezuju i analogno i digitalno. Na ulaz instrumenta dovodi se MIDI kabl iz izlaza MIDI interfejsa koji je na glavnom računaru povezan sa master klavijaturom, a izlazi instrumenata, koji su najčešće analogni, preko TRS konektora, kojih ima dva zbog stereo izlaza iz instrumenta, se povezuju na analogne ulaze audio interfejsa koji je povezan sa računarom.

Kombinovani MIDI sistemi su, kao što im samo ime kaže, kombinacija opisanih softverskih i hardverskih sistema. Imaju praktično neograničene mogućnosti korišćenja, ali umeju biti izuzetno skupi. Ovakvi sistemi, pored LAN softverskih, se najčešće sreću u profesionalnoj filmskoj muzičkoj produkciji, koja predstavlja verovatno najzahtevniji oblik produkcije koji se danas pred ovakve sisteme može postaviti.

Softver za međusobnu komunikaciju računara

Ovakvi softverski paketi su srž kompleksnih MIDI sistema o kojima je bilo pomena u prethodnom poglavlju. Oni omogućavaju komunikaciju virtuelnih instrumenata na različitim računarima koji su povezani u sistemu. Takvi softverski paketi se drugačije nazivaju i VST Host aplikacije.

Softveri tog tipa koji se danas najčešće koriste u svakodnevnoj praksi su Steinberg V-Stack, FX Max Teleport, AudioPort Universal, IPMidi, Plogue Bidule i Vienna Ensemble Pro.

Steinberg V-Stack je jedan od prvih softvera te namene koji su se pojavili na tržištu. Ima ograničene mogućnosti usled činjenice da maksimalno može koristiti 16 virtuelnih instrumenata koje povezuje sa sekvencerom. Kada se koristi samostalno (stand-alone mode), pretvara računar u muzičku radnu stanicu koja se često koristi za žive nastupe. Isključivo je dizajniran za PC računare i Steinberg Nuendo i Cubase sekvencere.

FX Max Teleport je dizajniran od strane FX Max kompanije i veliki plus mu je podržavanje VST 3 standarda koji je odlikuje visokim kvalitetom zvuka i izrazito malim latencijama. Relativno je jeftin i vrlo je jednostavan i dobro osmišljen za korišćenje i povezivanje.

AudioPort Universal je samostalna aplikacija kompanije Audio Impressions, koja je dizajnirana da omogući višekanalno slanje signala iz VST Host aplikacije sa sekundarnog

računara u sekvencer na glavnom računaru. Moguće je koristiti više ovih aplikacija istovremeno i svaka od njih može da šalje do 32 audio kanala u master sekvencer.

IP Midi je dizajniran od strane kompanije *Nerd.de* i specijalno je namenjen *Macintosh* računarima. Vrlo je jednostavan za korišćenje i ima podršku za rad sa do 20 kanala.

Plogue Bidule je dizajniran po istom principu kao i *AudioPort Universal*, ali ima mogućnost povezivanja i slanje neograničenog broja kanala u sekvencer na glavnom računaru. Ovo je jedna od najčešće korišćenih *Host* aplikacija za pravljenje zahtevnih orkestralnih MIDI postavki.

Vienna Ensemble Pro je verovatno najkvalitetniji i najpopularniji softverski paket u svetu filmske muzike. Dizajniran od strane *Vienna Symphonic Library* kompanije, namenjen je pre svega za rad na realizaciji filmske i slične orkestarske muzike. Na sekundarnom računaru radi samostalno kao *VST Host*. Grafički interfejs mu je dizajniran tako da podseća na miks pult, pa tako svaki kanal ima svoj instrument. Instrumenti sa više izlaza se mogu povezivati na posebne kanale u *Vienna Ensemble Pro*. Na glavnom računaru u sekvenceru se koristi kao *plug-in* i povezuje se na MIDI kanale. Ima mogućnost povezivanja neograničenog broja kanala.

Sekvenceri

Kao što je već rečeno, sekvenceri su programi koji omogućavaju snimanje zvuka, njegovo čuvanje na računaru, kao i sve oblike naknadnih manipulacija sa tako formiranim zapisom. U današnjem radu sa zvukom na računarima oni su svakako najbitniji i najkorišćeniji tip softvera koji se koristi. Postoji ih mnogo, od kojih je nekoliko najpopularnijih: *Avid Pro Tools*, *Steinberg Cubase/Nuendo*, *Apple Logic Pro*, *MOTU Digital Performer*, *PreSonus Studio One*, *Cakewalk Sonar*.

Avid Pro Tools je takozvani „veliki brat“ u muzičkoj produkciji jer je istorijski verovatno prvi masovno korišćen softverski sekvencer, koji je od samog početka bio baziran na specijalizovanoj hardverskoj podršci za koju su mnoge prestižne firme pisale namenske softvere. Usvojen je kao standard od strane filmske industrije, upravo zbog svoje nezavisnosti od snage centralnog procesora računara, i velike namenske procesorske snage koja mu je stajala na raspolaganju. Posедуje izuzetno napredne opcije za post produkciju zvuka i muzike. Trenutno aktuelna verzija 10 je učinila napredak sa *AAX Plug In* standardom koji sada svaki *Pro Tools* HDX sistem koristi. Pored svih ovih naprednih opcija za audio, ovaj sekvencer nikada nije važio za tip sekvencera optimizovan za rad u MIDI okruženju.

Steinberg Cubase/Nuendo su dva veoma slična, a opet i različita sekvencera nemačke kompanije *Steinberg*. *Cubase* je tržišno pozicioniran kao sekvencer namenjen muzičkoj produkciji, dok je *Nuendo* baziran na audio post produkciju za video. Imaju veoma sličan grafički interfejs i opcije, s tim što je *Cubase* nešto optimizovaniji za rad u MIDI okruženju.

Apple Logic Pro je jedan od sekvencera koji je dizajnirala kompanija *Apple*. Obiluje velikom količinom opcija za MIDI i mnogi se slažu da je možda i najbolji za rad u MIDI okruženju, između ostalog i zbog toga što poseduje jako kvalitetne instrumente koji se dobijaju u paketu prilikom njegove kupovine.

MOTU Digital Performer je ne toliko rasprostranjen među *Apple* korisnicima kao *Logic*, ali poseduje neke od naprednijih opcija za MIDI u odnosu na *Logic*.

PreSonus Studio One je trenutno najmlađi sekvencer na tržištu. Stvorila ga je kompanija *PreSonus* tako što je zaposlila otpuštene radnike iz *Steinberg* i *Apple* kompanija koji su dizajnirali hibridni sekvencer koji je baziran na iskustvima iz oba ova sveta. Na tržištu je pozicioniran kao hibrid *Pro Tools*, *Logic* i *Cubase* sekvencerski rešenja. Interfejs mu je baziran na rešenjima iz *Logic*-a, MIDI opcije su mu slične kao kod *Logic* i *Cubase*, opcije za audio kao kod *Pro Tools*, a organizacija opcija i podataka kao kod *Cubase*.

Cakewalk Sonar je dizajniran od strane kompanije *Cakewalk*, koja je ogranak kompanije *Roland*. Ovaj sekvencer je dosta popularan među kompozitorima avangardne i ambijentalne muzike zbog svojih MIDI opcija, a i zbog činjenice da je *Roland* danas jedan od najvećih proizvođača klavijatura, aranžera i sintisajzera.

5.3 MIDI kontroleri

Klavirski kontroleri

Ovi kontroleri su rađeni po modelima standardnih akustičnih klavira. Kada je pritisnuta dirka, *Note On* ili *Note Off* MIDI poruka je poslata uređaju koji je prima (*master device*), recimo sempleru, govoreći mu koju notu da reprodukuje. U gotovo istom trenutku, poslata je poruka koja govori o nivou, odnosno koliko jako je određena dirka pritisnuta.

U poređenju sa pravim klavirom, većina ovih kontrolera ima male dirke i uobičajeno pružaju opseg od samo par oktava. Zbog ovog razloga profesionalni muzičari favorizuju veće, i teže klavijature nalik *Kurzweil K2600* (slika 5.9), da bi dobili celokupni opseg i veće nijanse za svoju izvedbu.



Slika 5.9: Kurzweil K2600

Da bi muzičari imali što veću kontrolu nad svojim softverskim sekvencerima, većina profesionalnih sintisajzera ima set MIDI kontrola, slajdera koji mogu biti dodeljeni bilo kojoj od 127 CCs kontinualnih kontrola (continuous controllers), koje su sadržane u MIDI specifikaciji.

Na primer, slajder može biti dodeljen CC#7, za kontrolu promene nivoa, drugi može biti dodeljen CC#74 (frequency cut-off), da bi se dobila živost u zvuku. Kao dodatak ovih osam slajdera, Kurzweil K2600 ima i točkić osetljiv na dodir koji omogućuje dodatnu kontrolu. Ovaj vrhunski uređaj omogućava muzičarima slanje kontinualnih MIDI poruka jednostavnim pomeranjem prsta po točkiću.

Naravno, postoje i mnogo jeftiniji uređaji na tržištu koji su namenjeni široj paleti korisnika. Mnogi muzičari koriste male desktop kontrolere, za kontrolu svojih muzičkih softvera i hardvera u realnom vremenu. Jedan ovakav kontroler je, jako popularni *M-Audio USB Oxygen* (slika 5.10).



Slika 5.10: M-Audio USB Oxygen

Gitarski kontroleri

Postoje dve poznate metode prenosa MIDI podataka preko gitare. Jedan od njih predstavlja korišćenje specijalno proizvedenog MIDI instrumenta poput Ztar-a, firme Starrlabs. Na konvencionalnoj gitari, selektovanje nota se vrši levom rukom, i to pritiskom prstiju na pragove koji se nalaze na vratu gitare. Na Ztar MIDI gitarskom kontroleru, selektovanje note se vrši pomoću tastera osetljivih na dodir. Dok se sa desnom rukom okida deo nalik žici, koji se nalazi na trupu gitare. Ipak, uprkos brzom odzivu i izvanrednoj kontroli, ovakvi uređaji su jako skupi i od korisnika se zahteva učenje novih tehnika sviranja.

Druga mnogo jeftinija metoda, je MIDI gitara koja funkcioniše po principu pitch tracking-a. Specijalna heksofonična tonska ručka je postavljena na gitaru, i ona nezavisno detektuje pič svih šest žica i konvertuje ih u MIDI podatke. Jedna od firmi koja se bavi proizvodnjom ovih tonskih pomagala je i, Blue Chip Music Tehnology. Ova firma proizvodi ovakve ručke za gitare i bas gitare, i na njima implementira Axon AX-100 konvertor koji je u stanju da prepozna tačan pič note istog trenutka kad je nota odsvirana. Mogućnost da čujemo i snimamo konvencionalnu gitaru uz pomoć MIDI-ja je velika prednost i pruža mnoge zanimljive mogućnosti.

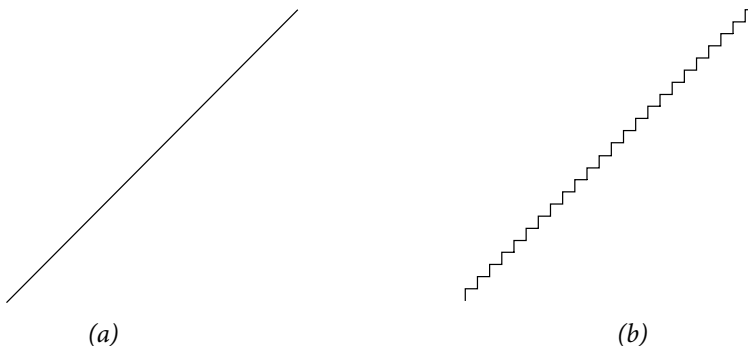
Kontroleri za udaraljke (ritam mašine)

Većina ranijih bubnjarskih kontrolera se sastojala od analognih padova koji su posedovali sopstvene zvukove. Međutim ovi padovi su bili skloni habanju, senzori nisu bili naročito osetljivi i mnogi semplovi su bili lošeg kvaliteta. Ustvari bili su jako sirovi i loši u odnosu na današnje uređaje ovog tipa. Moderni uređaji, poput Rolanda-a SPD-20, imaju visok kvalitet reprodukcije i sposobni su za prenos MIDI podataka jako kvalitetno i brzo. Firma Roland je vodeća na tržištu u proizvodnji drum mašina, sa svojim V-Drums proizvodima koji sadrže velike komplete zvukova, od realističnih cimbala, doboša i tomova, kao i posebne bubanj module. Semplovi imaju širok dinamički opseg i čak uključuju trigerovanje *rim shot*-ova. Takođe, *hi-hat* semplovi zvuče veoma prirodno.

Kontroleri duvačkih instrumenata

Zvuk kod ove vrste instrumenata nastaje uduvavanjem vazduha i korišćenjem facijalnih mišića oko usta svirača. Kontroleri duvačkih instrumenata koriste senzore za konvertovanje daha i pritiska usana u MIDI podatke. Najpoznatiji i najuspešniji, rani model ovih kontrolera, pojavio se sedamdesetih godina i bio je produkt firme *Lyricson*. Baziran na principu pravog akustičnog instrumenta, u sebi je sadržao i sintisajzer i kontrolni modul. Kada je prestala proizvodnja Lyricson-a, Akai je došao na scenu sa svojim dorađenim EWI instrumentima (electronic wind instruments) kao i EVI instrumentima (*electronic valve instruments*). Od proizvodnje EVI-ja se na kraju odustalo, ali EWI je nastavio da postoji i do današnjeg dana se smatra za najbolji uređaj ove vrste.

Glavni razlog ove tvrdnje je da ovaj uređaj, za razliku od digitalnih kontrolera, gde su podaci kvantizovani u diskretnim koracima, tj. step kvantizaciji (*step-quantised*), EWI koristi naponsku kontrolu. Prenos podataka teče glatko, i performanse su veoma izražajne.



Slika 5.11: Prikaz naponske kontrole (a) i step kvantizacije (b)

Za razliku od Akai-ja, Yamaha je proizvela pravi duvački MIDI kontroler. Model WX5 (slika 5.12), ima dva moda, može raditi kao saksofon ili kao flauta, sa izborom jednog piska (za muzičare koji sviraju saksofon ili clarinet), ili kao tip za snimanje piskova. Nije zgodan kao EWI, ali je zato moguće konektovati ga direktno na MIDI ton generatore. Takođe veoma je lak za korišćenje pa ga mogu koristiti i početnici.



Slika 5.12: Model WX5



Slika 5.13: Primer jednog MIDI kontrolera

Nožne pedale (*foot pedals*)

MIDI kontroleri nisu ograničeni samo na prenos MIDI podataka o samom sviranju. Nožne pedale su primer velikog pomagala, pogotovo gitaristima, u smislu unapređivanja izvedbe i kontrole efekata. Sa pedalama, moguće je zaustaviti sviranje u sred neke solo deonice, i “igrati” se sa postojećim presetima. Korišćenje pedale čini nastup na sceni mnogo lakšim, jer je moguće unapred pripremiti efekte i tajming njihovog pojavljivanja. Takođe sa nožnom pedalom moguće je kontrolisati više MIDI kanala. Uz to moguće je i menjati pojačanje sviranja kao i nebrojano mnogo drugih efekata.

Kontrolerske konzole

Muzički softveri su u mnogome olakšali i unapredili muzičko stvaralaštvo. Ali za mnoge, fina kontrola kliznih (*fader*) i rotirajućih (*knob*) potencijometara uz pomoć kompjuterskog miša je dosadan i naporan posao. Naravno, ovaj problem se najlakše rešava korišćenjem MIDI kontrolerskih konzola sa pravim, fizičkim potencijometrima, koji omogućavaju znatno veći komfor i brzinu rada.

5.4 Struktura MIDI protokola

Nosioci informacija u MIDI protokolu su bajtovi. Kombinovanjem bajtova više informacija se može preneti iz jednog u drugi uređaj. Svaka MIDI poruka ima tačno određenu sekvencu bajtova. Prvi bajt poruke je uvek tzv. statusni bajt, koji govori MIDI uređaju koju funkciju da odradi. U statusnom bajtu se nalazi i informacija o kanalu po kojem se poruka prenosi. MIDI protokol definiše postojanje 16 logičkih kanala koji su numerisani brojevima od 0 do 15. MIDI uređaji će prihvatiti ili ignorisati statusni bajt u zavisnosti od toga na kojem kanalu je uređaj podešen da radi. Svi ostali bajtovi se kasnije prenose tim kanalom, dok se ne primi naredni status bajt.

U zavisnosti od sadržaja status bajta, sledi povorka ostalih bajtova različitih dužina i tipova informacija koje oni nose. Tako, na primer, ako status bajt nosi informaciju o uključivanju note, za njim slede dva bajta. Prvi nosi informaciju o noti koju uređaj treba da svira, a drugi o jačini te note. Ista je struktura i komande za isključivanje note. Status bajt može nositi i npr. informaciju o promeni instrumenta koji se proziva, u kom slučaju kompletnu poruku sačinjavaju status bajt koji promenu najavljuje i bajt koji pokazuje redni broj instrumenta u bazi instrumenata u uređaju.

Sve MIDI poruke se dele na Kanalne poruke (*Channel messages*) i Sistemske poruke (*System messages*). Kanalne poruke su one koje se odnose na specifičan kanal i u status bajtu ovih poruka uvek mora biti naveden broj kanala po kojem se komunicira. Sistemske poruke se ne odnose na pojedinačne kanale, već komuniciraju na nivou celog uspostavljenog sistema. U njihovom status bajtu nije prisutna informacija o broju kanala. Kanalne poruke se nadalje mogu podeliti na Kanalne poruke zvuka (*Channel Voice messages*) i Poruke režima (*Mode Messages*). Kanalne poruke zvuka zauzimaju najveći deo bitskog protoka i najčešće se koriste u MIDI prenosu podataka. One nose informacije o načinu izvođenju nota. Poruke režima pokazuju kako treba da reaguje instrument kome su upućene kanalne poruke zvuka. Razmotrimo sada detaljnije strukturu najčešće korišćenih poruka MIDI protokola.

Channel Voice Messages

Kanalne poruke zvuka se koriste kako bi prenele informacije o načinu sviranja zadatih nota. Poruke koje se ubrajaju u ovu kategoriju su: uključivanje note, isključivanje note, polifonični pritisak na dirke klavijature, pritisak dirke po kanalu, promena osnovne učestanosti, promena instrumenta i promena kontrole.

Note On i Note Off poruke

U MIDI sistemu, aktiviranje određene note i prestanak sviranja iste note se posmatraju kao dva zasebna događaja. Prilikom pritiska dirke na klavijaturi, generiše se poruka uključivanja note (Note On) na MIDI OUT portu. Na klavijaturi se može podesiti po kom kanalu se prenosi poruka o pritisnutoj dirki, pa je u status bajtu prisutna i informacija o odabranom rednom broju kanala. Pomenuta poruka, osim status sadrži još dva bajta. Prvi nosi informaciju o noti koja se izvodi, a drugi kojom jačinom treba da se reprodukuje ta nota. Na osnovu status bajta, generator zvuka vrši izbor uređaja koji treba da odsvira željenu notu, a koji se nalazi na određenom kanalu. Drugi bajt određuje koju notu će generator zvuka odsvirati, a treći koje amplitude. Poruka koja nosi informaciju o prestanku sviranja određene note sastoji se od status bajta, u kojem se nalazi komanda “isključi notu”, i informacija o rednom broju kanala u kojem treba isključiti notu, i još dva bajta. Prvi od pomenuta dva bajta nosi informaciju koju notu treba isključiti, dok se drugi bajt se pri ovoj naredbi zanemaruje.

Poruka o uključivanju note, kao što je rečeno, počinje status bajtom, čija prva četiri bita imaju vrednost 1001. Sledeća četiri bita mogu imati bilo koju vrednost koja pokazuje po kom se kanalu treba izvršiti sinteza zvuka. Ta četiri bita se koduju na sledeći način:

0000 - Kanal 1
 0001 - Kanal 2
 0010 – Kanal 3
 ...
 ...
 1111 - Kanal 16

Bajtovi podataka mogu imati vrednosti od 0 do 127, tj. od 00000000 do 01111111. Kodovanje notne lestvice u prvom bajtu prikazano je u *tabeli 1*:

Oktava	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
2	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
3	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
4	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
5	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
6	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
7	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
8	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
9	120	121	122	123	124	125	126	127				

Tabela 1: Kodovanje nota različitih oktava

Na osnovu prethodno navedenog, može se lako dekodovati sledeća 'Note On' poruka sledeće strukture:

1001 1110 0011 1100 0001 0011

Niz 1001 u statusnom bajtu pokazuje da se radi o poruci uključivanja note, a 1110 pokazuje da tu notu treba da odsvira instrument na 15-om kanalu. Sledeći bajt nosi informaciju da treba odsvirati notu broj 60 (u tablici 1 se vidi da je to nota C4), dok poslednji bajt pokazuje da tu notu treba odsvirati jačinom 19. Ukupan raspon jačina je, u skladu sa osmобitnom rezolucijom, podeljen na 128 diskretnih nivoa.

Status bajt isključivanja note počinje četvorkom: 1000. Tako poruka u obliku

1000 1110 00111100 00010011

znači: isključiti notu C4 na kanalu broj 15.

Polyphonic Key Pressure i Channel Pressure poruke

Neke MIDI klavijature su osetljive na pritisak koji trpe dirke za vreme sviranja. Ova informacija koja se često u MIDI žargonu naziva *aftertouch* - nakon dodira, može se u odgovarajućem formatu poruke prenositi do generatora zvuka. Ako klavijatura ima senzore pritiska za svaku dirku, onda se prilikom sviranja akorda mogu preneti informacije o pritisku na svaku dirku ponaosob preko Poruke o polifoničnom pritisku na dirke - *Polyphonic Key Pressure Messages*. U ovim porukama su prisutna po dva bajta za svaku dirku - prvi od njih označava notu, a drugi pritisak na dirku te note. Neke klavijature ne poseduju mogućnost da prenesu informacije o pritisku na svaku dirku već prenose poruke o jačini pritiska na nivou cele klavijature.

Tako poruke tipa *Channel Pressure* - Kanalni pritisak, prenose samo u jednom bajtu informaciju o pritisku izvršenom na dirke klavijature. Prva četiri bita u status bajtu u *Polyphonic Key Pressure* poruci su 1010, a u *Channel Pressure* poruci 1101.

Tako, na primer, poruka:

10100011 0011 1100 0100 1100

znači da je izvršen polifonični pritisak na dirke i da na kanalu broj tri treba odsvirati notu C4 pritiskom u iznosu od 76. Ovo je poruka *Polyphonic Key Pressure* tipa i ona se generiše čim se promeni pritisak na dirku klavijature.

Poruka:

11010100 00111100

znači da note koje se već sviraju na kanalu broj 4 treba odsvirati pritiskom 60. Ovo je poruka *Channel Pressure* tipa.

Pitch bend

Poruke o promeni osnovne učestanosti se generišu kada se točkić (*wheel*) za ovu namenu na kontroleru izvede iz ravnotežnog položaja. Ova poruka ima za cilj da promeni osnovnu učestanost svih nota koje se trenutno sviraju na zadatom kanalu. Osim statusnog bajta, koji sadrži informaciju o kanalu u kojem treba promeniti osnovnu učestanost, poruka sadrži još dva bajta. Da promena osnovne učestanosti ne bi bila skokovita, odnosno da bi se mogla menjati kontinualno, ova dva bajta nose 14 - bitnu informaciju o stepenu promene osnovne učestanosti. U prvom bajtu se nalazi 7 informacionih bitova manje težine (tzv. *Least Significant Byte* - LSB), a u drugom 7 informacionih bitova veće težine (tzv. *Most Significant Byte* - MSB). Ravnotežno stanje (kada je točkić u ravnotežnom položaju) odgovara sledećim vrednostima za LSB i MSB: 0000 0000 i 0100 0000 respektivno, što predstavlja polovinu skale od 14 bitova.

Prvi bit u oba bajta je uvek jednak nuli. Status bajt ovog tipa poruke počinje četvorkom 1110. Tako na primer poruka:

1110 0101 0000 0000 0100 0000

znači da je točkić za kontrolu promene osnovne učestanosti sa kanala 5 vraćen u ravnotežni položaj.

Program change

Kada se želi promena instrumenta na određenom kanalu, generiše se poruka ovog tipa. Poruka osim statusnog bajta sadrži još jedan bajt koji pokazuje na redni broj instrumenta u tablici instrumenata. Prva 4 bita status bajta su 1100. Ono što je bitno da znamo jeste pripadnost odgovarajućih vrednosti grupama instrumenata, što je prikazano u *tabeli 2*.

Prema prethodno napisanom sledeća MIDI poruka:

1100 0101 0000 0001

informiše generator zvuka da na kanalu 5 treba da se generiše zvuk velikog akustičnog klavira.

Redni brojevi	Grupa instrumenata	Redni brojevi	Grupa instrumenata
1-8	Klaviri	65-72	Duvački instrumenti 1
9-16	Metalne udaraljke	73-80	Duvački instrumenti 2
17-24	Orgulje	81-88	Sinteiz. instrumenti
25-32	Gitare	89-96	Sinteiz. prigušeni instr.
33-40	Basovi	97-104	Sinteiz. efekti
41-48	Simf. žičani instr.	105-112	Etnički instrumenti
49-56	Ansambli	113-120	Udarački instrumenti
57-64	Brass	121-128	Zvučni efekti

Tabela 2: Opsezi rednih brojeva po grupama instrumenata definisanih GM standardom

Control change

Kontrolne poruke se u MIDI protokolu upotrebljavaju za kontrolu mnoštva različitih funkcija u sintisajzeru. Kao i druge Kanalne poruke i poruke ovog tipa utiču samo na naznačeni kanal. Pored statusnog bajta u poruci su prisutna još dva bajta. Prvi nosi informaciju o rednom broju kontrole, a drugi o vrednosti za tu kontrolu. Redni broj kontrole pokazuje koju funkciju sintisajzer treba da kontroliše po prijemu ove poruke. Kontrole su sledećeg tipa: jačina zvuka u kanalu, balans kanala (levi, desni), stisnuta ili opuštena nožna pedala, stepen modulacije zvuka, vremena pojedinih sekcija u ADSR anvelopi i slično.

Za svaku od kontrola vrednost poslednjeg bajta pokazuje koliko treba uticati na tu kontrolu. Nisu sve vrednosti poslednjeg bajta u opsegu od 0 - 127 dozvoljene za svaku kontrolu. Tako, na primer, pojedine kontrole mogu imati samo dve vrednosti: 0 i 127 za stanja ON i OFF (uključeno, isključeno), dok se vrednosti 1-126 ne upotrebljavaju. Za neke druge kontrole vrednosti u opsegu 0-63 mogu značiti isključivanje, a 64 - 127 uključivanje kontrole, kao na primeru kontrole sa brojevima 64 - 69 koje označavaju razne vrste pedala (videti tabelu Control change poruka). Međutim, postoje i kontrole kod kojih je informacija u jednom 7-bitnom bajtu mala da opiše za koliko treba promeniti određenu kontrolu.

Kako većina kontrola ima dva različita redna broja u tabeli kontrolnih brojeva - jedan za slanje bajta manje i jedan za slanje bajta veće važnosti, tada se šalju dve poruke od kojih je u trećem bajtu prve poruke bajt veće važnosti, a u trećem bajtu druge bajt manje važnosti ukupne 14 - bitne informacije. Prva četvorka bitova u statusnom bajtu za ovu grupu je 1011.

Poruka koja se sastoji iz 6 bajtova

10110110 0000 0111 0000 1000 / 10110111 0010 0111 0100 0000

se može podeliti u dve poruke: prva koja obaveštava da se na kanalu 6 pojačanje mora postaviti na vrednost $8 * 27 = 1024$ i druga da pojačanju na istom kanalu treba dodati vrednost 64, pa će ukupno pojačanje kanala 7 biti 1088. Drugi bajt prve poruke označava promenu pojačanja preko 7 bitova veće važnosti, dok drugi bajt druge poruke označava promenu pojačanja preko 7 bitova manje važnosti.

Posebno je interesantna još jedna namena poruka za promenu kontrola. Kontrola pod rednim brojem 0 je tzv. Bank Select kontrola i njome se prenosi bajt veće važnosti. Bajt manje važnosti se prenosi pod rednim brojem 32. Kako porukom Program Change generator zvuka može da se izabere jedan od ponuđenih 128 instrumenata, što je mali broj, upotrebom poruke za promenu kontrola pod rednim brojem 0 i 32 moguće je izvršiti izbor još $128 * 16384$ instrumenata (14 bitova ima ukupno $2^{14} = 16384$ kombinacija). Instrumenti koji se ne nalazi u prvih 128 kanala definisanih po GM standardu može se izabrati tako što će se poslati dve poruke različitog tipa - poruka za promenu programa i iza nje dve poruke za promenu kontrole sa kontrolnim brojevima 0 i 32.

Obzirom da po MIDI standardu nije definisan raspored instrumenata po pomenutim bankama zvuka, proizvođač može rasporediti instrumente po svom nahodenju. Tako su Roland (sa standardom GS) i Yamaha (sa standardom XG) usvojili za svoje proizvode sopstvene rasporede instrumenata.

Tabela sa svim porukama ovog tipa su date u prilogu 1. Prazna polja u tabeli omogućavaju slobodu korisniku da sam definiše poruke u skladu sa svojim specifičnim potrebama.

Channel Mode Messages

Poruke režima kanala se nalaze na rednim brojevima 121 - 127 poruka za promenu kontrola. To znači da je prva četvorka bitova status bajta 1011, i da u prvom sledećem bajtu, gde se nalaze redni brojevi kontrola, poruke ovog tipa zauzimaju vrednosti 0111 1001 do 0111 1111. Poruke ovog tipa utiču na reagovanje sintisajzera na MIDI poruke. Tako, kontrolni broj 121 se upotrebljava da resetuje sve kontrolere (uglavnom klavijature), kontrolni broj 122 se koristi da omogući ili onemogući lokalnu kontrolu. Naime, u sintisajzerima su spojena dva MIDI uređaja - MIDI kontroler (klavijatura) i MIDI generator zvuka. Podrazumeva se da je prilikom uključivanja sintisajzera povezanost kontrolera sa generatorom zvuka omogućena.

Međutim, ova povezanost se može onemogućiti. Tako, na primer, ako želimo da na kanalu 5 onemogućimo da se čuje zvuk, dok pritiskamo na dirke klavijature, generisaće se poruka:

1011 0101 0111 1010 0000 0000

dok se ova veza ponovo omogućuje porukom:

1011 0101 0111 1010 0111 1111.

Redni brojevi kontrola od 124 do 127 se koriste za izbor uključivanja i isključivanja tzv. Omni režima i za izbor Mono ili Poli režima. Kada je uključen Omni režim, sintisajzer će reagovati na MIDI poruke za sve kanale. Kada je isti režim isključen, sintisajzer će reagovati samo na određeni MIDI kanal. Kada se izabere Poli režim sintisajzer će na svaku poruku o uključivanju note reagovati tako što će je svirati polifonično. To znači da poruka o uključivanju note uključuje zaseban generator zvuka za tu notu i ne remeti sviranje ostalih nota. Međutim, kada je uključen Mono režim, ukoliko je ranije svirala neka druga nota, pri dolasku poruke o uključivanju druge note, generator prestaje sa sviranjem prethodne i svira sadašnju notu na torn kanalu. Simultano sviranje nekoliko nota je ovim onemogućeno. Obično je sintisajzer podešen da bude u režimima Uključen Omni i Poli režim (*Omni On/Poly*) i tada svira po svim kanalima polifonično. Ukoliko se želi povezivanje u lanac preko *MIDI THRU* porta više sintisajzera, gde bi svaki svirao samo po jednom kanalu tada se vrši izbor Isključen Omni i Poli režim. Na tabeli 3. su prikazane pomenute *Channel Mode* poruke.

Poruka	Bajt rednog broja kontrole		Vrednost
Isključena lok. kontrola	122	0111 1010	0000 0000
Uključena lok. kontrola	122	0111 1010	0111 1111
Isključene sve note	123	0111 1011	0000 0000
Isključen Omni režim	124	0111 1100	0000 0000
Uključen Omni režim	125	0111 1101	0000 0000
Uključen Mono režim	126	0111 1110	0zzz zzzz
Uključen Poli režim	127	0111 1111	0000 0000

Tabela 3: Sadržaj Channel Mode poruka

Kada je Omni režim uključen podrazumevana vrednost za Mono režim je 0000 0001. U opštem slučaju vrednosti za 0zzz zzzz su od 0000 0001 do 0000 1111 i predstavljaju broj kanala koji su u Mono režimu. Ove vrednosti su aktivne u slučaju kada je isključen Omni i uključen Mono režim, dok se u svim ostalim slučajevima se ignorišu.

5.5 Sistemske poruke

Sistemske poruke se dele na sistemske zajedničke poruke (System Common Messages), sistemske poruke o realnom vremenu (System Real - Time Messages), i sistemske ekskluzivne poruke (System Exclusive Messages). Zajedničke poruke su usmerene svim MIDI uređajima u sistemu. Poruke o realnom vremenu su namenjene za sinhronizaciju MIDI uređaja, kojima je neophodna informacija o taktovanju. Ekskluzivne poruke su one koje sadrže identifikacioni broj proizvođača i namenjene su za prenos određenih informacija u formatu definisanom od strane tog proizvođača.

System Common Messages

Do sada definisane sistemske poruke su: *MTC Quarter Frame*, Izbor pesme (*Song Select*), pokazivač trenutnog položaja u pesmi (*Song position pointer*), Zahtev za resetovanjem oscilatora (*Tune request*) i poruka za Kraj ekskluzivnog bloka (*End of Exclusive*). *MTC (Midi Time Code) Quarter Frame* poruka je deo MIDI informacije za taktovanje i upotrebljava se za sinhronizaciju MIDI opreme i druge opreme kao što su video i audio mašine sa magnetnim trakama. Ova se poruka sastoji iz dva bajta, od kojih je prvi 1111 0001, a drugi, koji definiše određeni vremenski kod, može imati vrednost od 0 do 127,...

Song Select poruka se koristi u MIDI uređajima kao što su sekvenceri ili ritam mašine, koje mogu sačuvati i kasnije reprodukovati sačuvane pesme. Ova poruka ima dva bajta, od kojih je prvi 1111 0011, a drugi može imati proizvoljnu vrednost od 0 do 127 i ona označava redni broj pesme. *Song position pointer* poruka se koristi kako bi u sekvenceru pesma mogla da se nastavi iz određenog položaja u pesmi. Ova poruka ne zahteva od sekvencera da započne emitovanje Channel Voice poruke, već samo da se pozicionira u delu pesme i očekuje komandu za nastavak. Prvi bajt ove poruke je 1111 0010 i slede ga dva bajta koja sadrže 14-bitnu vrednost koja pokazuje redni broj MIDI takta u pesmi. Prvo se šalje bajt niže, a zatim bajt više vrednosti. Jedan MIDI takt u ovoj informaciji podrazumeva jednu šesnaestinu note.

Tune request poruka se koristi da bi uređaj koji je primi izveo kalibraciju oscilatora. Koristi se kod analognih sintisajzera, a vrlo retko ili gotovo nikako kod digitalnih. Poruka se sastoji od jednog bajta - 1111 0110.

End of Exclusive poruka se koristi kako bi se definisao kraj ekskluzivne poruke. Ova poruka se sastoji od jednog bajta oblika 1111 0111.

System Real - Time Messages

Poruke ovog tipa se koriste za sinhronizaciju svih MIDI uređaja kojima je sinhronizacija potrebna, kao što su sekvenceri i ritam mašine. Većina ovih poruka se obično ignoriše od strane sintisajzera. Da bi se osiguralo izvođenje kompozicije u tačnim vremenskim trenucima, poruke ovog tipa imaju prednost nad ostalim porukama. Ove poruke, koje se sastoje od samo jednog bajta, se mogu pojaviti bilo u bilo kojem delu niza podataka MIDI protokola. Tako, na primer, Real - Time poruka se može pojaviti i između status bajta i ostalih bajtova nekih drugih MIDI poruka. Poruke ovog tipa su: *Timing Clock* (1111 1000), *Start* (1111 1010), *Continue* (1111 1011), *Stop* (1111 1100), *Active Sensing* (1111 1110) i *System Reset* (1111 1111).

Timing clock poruka je glavna poruka za sinhronizaciju. Ova poruka se šalje 24 puta po četvrtini note, dok poruke *Start*, *Stop* i *Continue* služe za kontrolu izvođenja sekvence u sekvencerima i ritam mašinama. *Active sensing* poruka se generiše u slučaju kada je zbog neke greške u kablju ili na neki drugi način “zaglavila” neka nota. Tako, na primer, ako bi se izvukao kabal koji povezuje kontroler sa generatorom zvuka, komanda o isključivanju odgovarajućih nota ne bi nikad stigla do generatora i sviranje ne bi prestalo, kada ne bi bilo ovog tipa poruke. *System reset* poruka, kako i ime kazuje, služi da resetuje sve uređaje u MIDI sistemu. Ova poruka se ne generiše automatski, već je mora generisati korisnik.

System Exclusive Messages

Poruke ovog tipa se koriste za razmenu podataka kao što su parametri instrumenta, odbirci talasnog oblika, itd. Proizvođači MIDI opreme mogu da definišu sopstveni format za slanje podataka različitog tipa u okviru ovih poruka. Svaki proizvođač je dobio jedinstven identifikacioni broj (ID) koji je prisutan u porukama ovog tipa. Tako, na primer, Rolandov ID broj je 0100 0001, Yamaha ima ID 0100 0011, Kawai 0100 0000, Kurzweil 0000 0111 itd. Iza bajta sa identifikacijom proizvođača, može da bude proizvoljan broj bajtova, a kraj poruke ovog tipa je definisan ranije pomenutom End of Exclusive sistemskom zajedničkom porukom.

Proizvođači su obavezni da objave format svojih ekskluzivnih naredbi, kako bi te podatke koristili i drugi proizvođači. Svaka od ovih poruka počinje Begin System Exclusive bajtom (1111 0000). Obično se iza ovog i ID bajta nalazi bajt koji pokazuje kom modelu proizvođača je namenjena ova poruka. Neki od proizvođača koriste i bajtove za proveru parnosti. Neki od ID brojeva su rezervisani za specijalne protokole. Među njima je i tzv. Sample Dump Standard preko kojeg se prenose odbirci talasnih oblika instrumenata, MIDI show control, MIDI machine control i drugi. Poruke ove vrste se nazivaju Univerzalnim SysEx

porukama. U takvoj standardizaciji ID sa brojem 0111 1111 označava da se primljena poruka mora izvršiti u realnom vremenu, a poruka sa ID brojem 0111 1110, da se poruka ne mora izvršiti u realnom vremenu.

SysEx poruke pružaju, pored ostalog, i mogućnost uključivanja i isključivanja General Midi tabele instrumenata. Ukoliko muzički uređaji mogu da koriste odbirke proizvoljnih instrumenata u tablici od 128 instrumenata, tada oni mogu da po želji uključe ili isključe GM tablicu. To se postiže sledećim nizom bajtova: 1111 0000 (početak *SysEx* poruke), 0111 1110 (poruka nije u realnom vremenu), 0111 1111 (recimo 128. instrument), 0000 1001 (podešavanje uključenosti GM), 0000 0001 (uključiti GM na torn kanalu, sve nule pokazuju da GM treba isključiti), 1111 1111 (kraj *SysEx* poruke).

Isto tako se, preko *SysEx* poruke može podesiti i tzv. *Master Volume*, tj. jačina kompletno generisanog zvuka. Preko standardnih MIDI poruka mogu se podešavati jačine zvuka za svaku notu ili za svaki kanal posebno, na način kao što je to već objašnjeno.

5.6 MIDI Time Code (MTC)

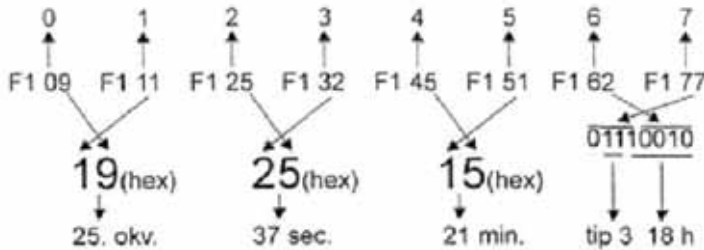
Ovo je podprotokol unutar MIDI protokola. Njegov zadatak je da održava vremensku sinhronizaciju između dva uređaja koji simultano rade. To je, u osnovi, SMPTE sinhronizacija koja je prilagođena prenosu preko MIDI kanala. Standardne MIDI poruke za sinhronizaciju, kao što su MIDI takt i pokazivač položaja u pesmi su zasnovani na broju muzičkih taktova (beats) od početka kompozicije. Međutim, za mašine koje treba sinhronizovati, kao i za inženjere, lakše je sinhronizaciju uspostaviti po apsolutnom vremenu. Postoji nekoliko MIDI poruka koje sačinjavaju MTC protokol, od kojih su sve izuzev jedne SysEx poruke.

Quarter Frame

Quarter Frame (četvrtina okvira) je najvažnija poruka koja pripada MTC i ona nije SysEx poruka. Sastoji se iz status bajta 0xF1 i još jednog bajta podataka. Ova poruka se šalje periodično kako bi održavala proces sinhronizacije. Poruke se šalju 4 puta u jednom SMPTE okviru. Tako, na primer, ukoliko je u jednoj sekundi prisutno 30 okvira, poruke se šalju svakih $1/(30 \cdot 4) = 8,3$ ms. Ova poruka sadrži informaciju o SMPTE vremenu koje je izraženo u časovima, minutama, sekundama i okvirima. Očigledno je da je informacija o vremenu suviše velika da bi se prosledila preko jednog bajta podataka, pa se tako jednom porukom prosleđuje samo deo ukupne poruke o vremenu. Da bi mašina koja treba da se sinhronizuje dobila ukupnu informaciju o vremenu, mora da primi 8 poruka ovog tipa. Dakle, dva okvira treba da prođu kako bi sinhronizovana mašina iz pomenutih poruka sastavila delove koje nose poruke i odredila tačno vreme. Od 8 poruka, prve dve prenose nižu i višu četvorku bitova (nibble), koji nose informaciju o okviru, treća i četvrta prenose nižu i višu četvorku bitova o sekundama, peta i šesta o minutama i sedma i osma o časovima. Osma poruka sadrži i informaciju o tipu SMPTE sinhronizacije (24, 25, 30 "drop" i 30 okvira/sekund). Pomenutih osam poruka sadrže bajtove podataka formata Onnn dddd, gde su nnn tri bita koja predstavljaju redni broj poruke (000 - niža četvorka bitova okvira, 001 - visa četvorka bitova okvira, 010 - niža četvorka bitova sekundi, 011 - visa četvorka bitova sekundi, 100 - niža četvorka bitova minuta, 101 - visa četvorka bitova minuta, 110 - niža četvorka bitova časova i 111 - visa četvorka bitova časova).

Bitovi označeni sa dddd u prvih sedam poruka predstavljaju četvorke nižih i viših bitova podataka, dok u osmoj poruci dddd je formata xydd, gde je x = 0, yy predstavlja tip SMPTE sinhronizacije (00 - 24, 01 - 25, 10 - 30 "drop" i 11 - 30 okvira/sekund) i d bit najveće važnosti informacije o časovima.

Ukoliko je ovaj postupak jasan, nije teško protumačiti *sliku 5.14* na kojoj je dat niz od 8 uzastopnih *quarter frame* poruka i koje nose informaciju o 25 - torn od 30 okvira u 18h 21 min i 37s.



Slika 5.14: Tumačenje niza od 8 uzastopnih “quarter frame” poruka

Redni broj okvira je onaj koji je prisutan kada se generiše prva poruka. Ostalih sedam poruka se koristi radi sklapanja informacije o SMPTE vremenu. To znači da u momentu kada se dobije svih osam poruka, izračunato vreme kasni za realnim za dva okvira. Tako, ako sinhronizovani uređaj ima displej, treba uvek dodati dva okvira primljenom rekonstruisanom vremenu.

REZIME I PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

U ovom poglavlju je objašnjen istorijski kontekst nastanka i razvoja MIDI protokola. Nakon toga su objašnjeni osnovni tipovi konekcija i načini povezivanja MIDI uređaja i lance i petlje. Razmotreni su i kompleksni MIDI sistemi, kao i sekvenceri na kojima se rad ovakvih sistema zasniva. Pojašnjeni su tipovi i uloga MIDI kontrolera. U drugom delu poglavlja je analizirana struktura MIDI poruka, uz detaljnu analizu tipova poruka koje se koriste. Na kraju je objašnjen pojam i način funkcionisanja MIDI Time Code podprotokola.

1. Opisati istorijske okolnosti i razloge nastanka MIDI protokola.
2. Šta označava skraćenica MIDI?
3. Koji su osnovni tipovi MIDI portova?
4. Koji je tip konektora standardizovan za potrebe MIDI konekcije 1.0 standardom?
5. Šta je MIDI lanac, a šta MIDI petlja?
6. Nabrojati i opisati vrste kompleksnih MIDI sistema.
7. Opisati osnovne vrste MIDI kontrolera.
8. Koliko logičkih kanala je definisano MIDI protokolom?
9. Šta su kanalne poruke?
10. Nabrojati i opisati tipove kanalnih poruka.
11. Šta su systemske poruke?
12. Nabrojati i opisati tipove systemskih poruka.
13. Šta je MIDI Time Code?
14. Opisati način funkcionisanja Quarter Frame poruke.

KLJUČNE REČI

MIDI, lanac, petlja, MIDI sistemi, MIDI kontroleri, kanalne poruke, systemske poruke, MIDI Time Code

