

3. Obrada signala

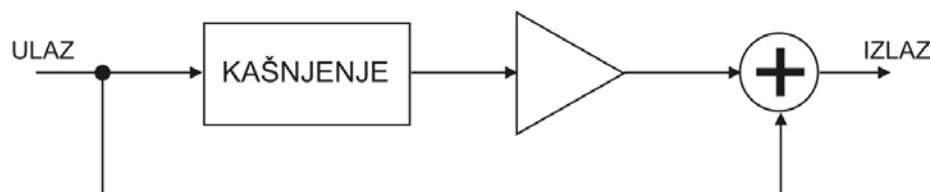
3.1 Vremenska obrada signala

Vremenska obrada signala se odnosi na efekte u vremenskoj domeni. U to spadaju razni efekti bazirani na kašnjenju signala, a to su *delay* (kašnjenje), *reverb* (odjek), *chorus*, *flanger*, *phaser* i *time/pitch shifting*.

Delay (kašnjenje)

U ovom slučaju se radi o najjednostavnijem efektu, koji se iako je jednostavan može dobro iskoristiti ako se pametno upotrebljava. U osnovi je on baza za sve ostale efekte u vremenskoj domeni. Kašnjenje, kako samo ime kaže predstavlja reprodukciju istog signala nakon nekog vremena. Samo kašnjenje nema nikakvog smisla, ako taj ponovljeni signal nemamo s čime usporediti. Zbog toga se zakašnjeli signal uspoređuje s originalnim signalom. Dakle, nakon što je reproduciran originalni signal, njegova "kopija" se ponavlja nakon nekog vremena. Ako mijenjamo vrijeme do trenutka ponavljanja, broj ponavljanja i amplitudu ponovljenog signala mogu se dobiti razni efekti.

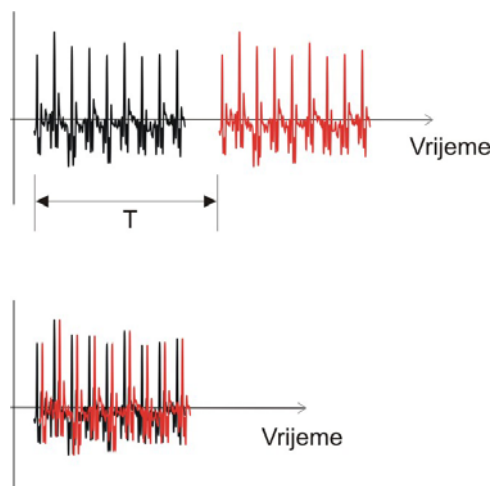
Efekt kašnjenja se može prikazati shemom na slici 3.1. Na njoj se vidi da se zakašnjeli ulazni signal, kojemu se može mijenjati vrijeme kašnjenja i amplituda zbraja s ulaznim signalom. Ovisno o vremenu kašnjenja i amplitudi se dobivaju razni efekti.



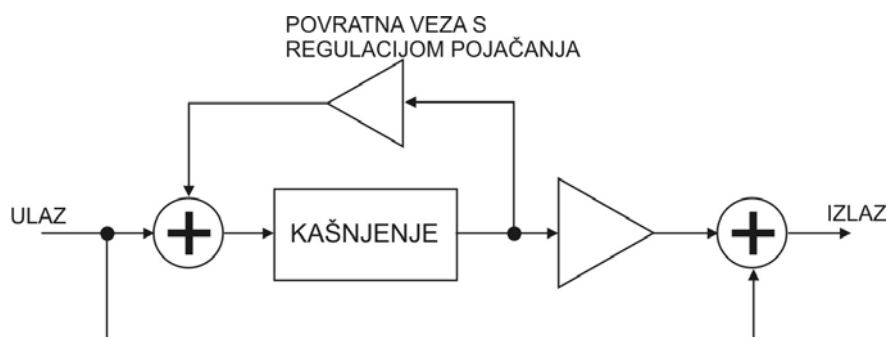
Slika 3.1 Osnovna shema efekta kašnjenja

Na slici 3.2 prikazan je primjer zakašnjelog signala za dva različita vremena kašnjenja, kratko i dugačko. Ako je vrijeme kašnjenja relativno kratko (nekoliko milisekundi) efekt se naziva *slapback*, a ako iznosi sekundu i više dobivamo *echo* efekt. Na ovoj slici je dan primjer kašnjenja samo jedne "kopije" ulaznog signala. Ako u sustav ubacimo povratnu vezu mogu se dobiti dodatni efekti.

Na slici 3.3 je prikazan shema uređaja za kašnjenje signala s povratnom vezom, kojemu se može regulirati pojačanje u grani povratne veze. Signal koji se vraća na početak se zbraja s ulaznim signalom i onda se taj signal ponovo kasni, da bi se tako zbrojeni signal preko povratne veze opet vraćao na početak i tako dalje dok se ne priguši. Većina profesionalnih uređaja za kašnjenje rabi ovu konfiguraciju.

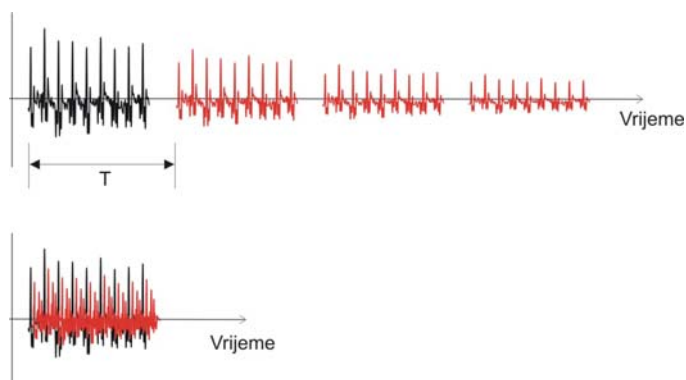


Slika 3.2 Primjer kašnjenja signala s dugim i kratkim vremenom kašnjenja T .



Slika 3.3 uređaj za kašnjenje signala s povratnom vezom.

Primjer jednog tako zakašnjelog signala prikazan je na slici 3.4. Uz dobro odabrano vrijeme kašnjenja i smanjenje amplitude zakašnjelog signala, moguće je dobiti odjek signala, s kojim se mogu simulirati razne prostorije. U principu ponavljanje signala u ovom uređaju traje dok se ne priguši, odnosno dok ne postane dovoljno tih.

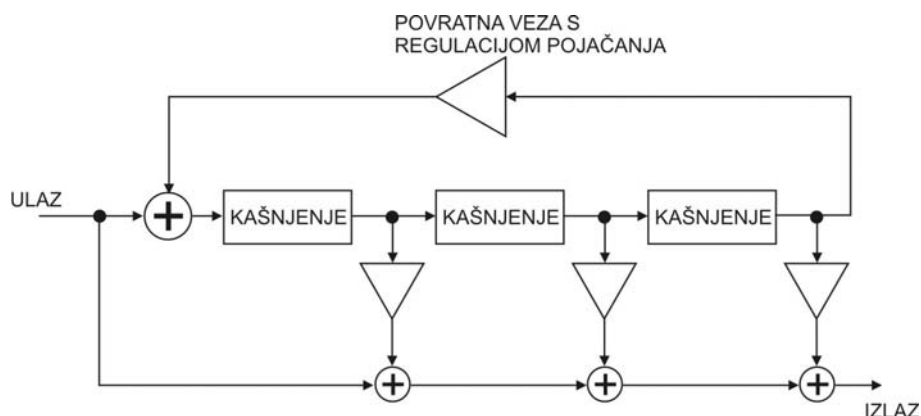


Slika 3.4 Primjer kašnjenja signala u uređaju s povratnom vezom.

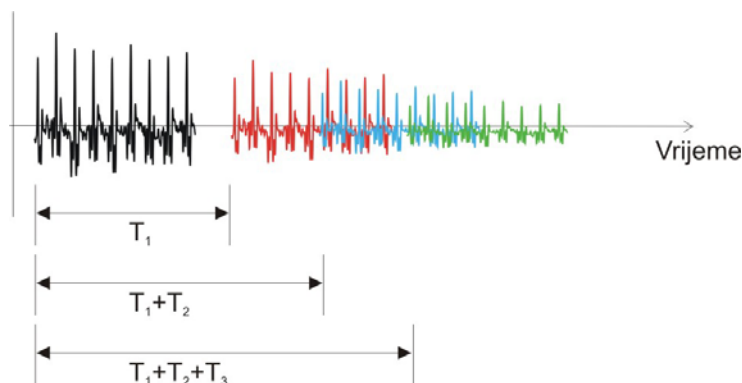
Kao što je spomenuto, kašnjenje signala je vrlo koristan efekt, ako se pravilno rabi. Najčešće se rabi za "popunjavanje" zvuka instrumenata. Ako na pozornici ili u studiju imamo na primjer samo jednu gitaru, uz pravilni odabir vremena kašnjenja broj instrumenata se može povećati, i slušatelj dobije dojam da se na pozornici nalazi više gitara. U tom slučaju se rabi vrijeme kašnjenja do 100 ms. Kako se povećava vrijeme kašnjenja, više se ne radi o

suptilnom efektu, nego se vrlo lako mogu razaznati originalni i ponovljeni signal. Ako vrijeme kašnjenja tako podesimo da odgovara ritmu, odnosno taktu sviranja, može se postići efekt popunjavanja nota. Na taj način se glazba može obogaćivati, kao da ubacujemo nove note.

Efekt kašnjenja se može dodatno unaprijediti s *multi-tap* kašnjenjem, kod kojeg postoji više linija za kašnjenje, a kojima se može odvojeno regulirati pojačanje. Na slici 3.5 dana je shema jednog takvog uređaja, koji omogućuje više fleksibilnosti, a rabi se za kompleksnije sheme reprodukcije. Ovakvi uređaji se najčešće rabe kod naknadne obrade signala, a rjeđe u sustavima za ozvučavanje događanja u živo. Na slici 3.6 prikazan je primjer multi-tap kašnjenja signala.

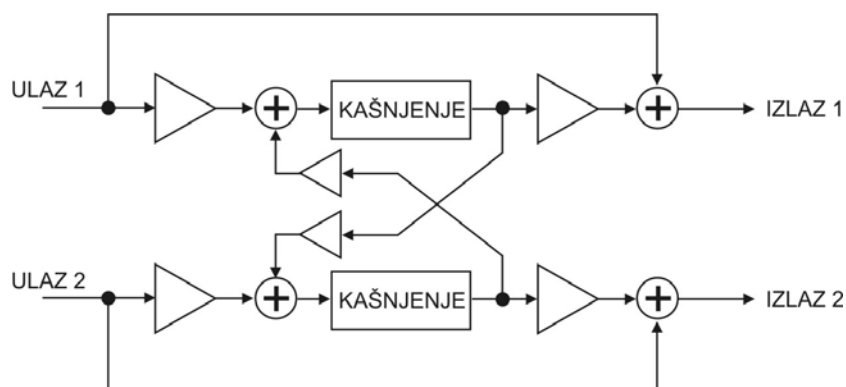


Slika 3.5 Uređaj za multi-tap kašnjenje



Slika 3.6 Primjer multi-tap kašnjenja.

Osim u mono signalu, kašnjenje se može primijeniti na stereo signal. Na taj način se mogu postići razni prostorni efekti, kao što je na primjer ping-pong kašnjenje. Kao i multi-tap kašnjenje, i kašnjenje između dva kanala se rabi samo u specijalnim slučajevima u naknadnoj obradi signala, a rijetko se koristi kod izvedbi u živo. Slika 3.7 prikazuje shemu uređaja za kašnjenje u stereo signalu.

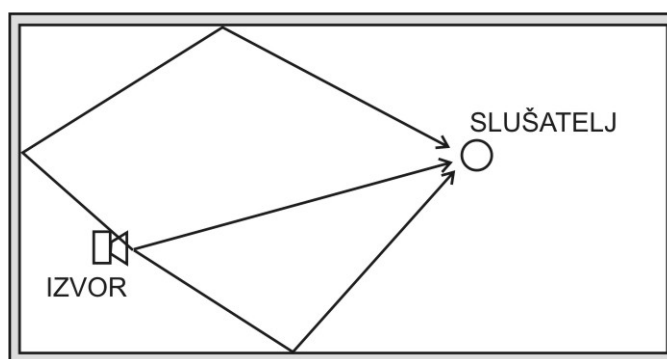


Slika 3.7 Uređaj za kašnjenje u stereo signalu.

Implementacija kašnjenja se danas bazira na digitalnim uređajima. U početku su se koristili analogni uređaji u obliku uređaja za reprodukciju magnetskih traka s više glava za čitanje na različitim položajima. Ovisno o njihovom razmaku i brzini reprodukcije trake, dobivala su se različita vremena kašnjenja. Digitalni uređaji se baziraju na DSP sučelju uz određene memorije ili kružne buffer memorije.

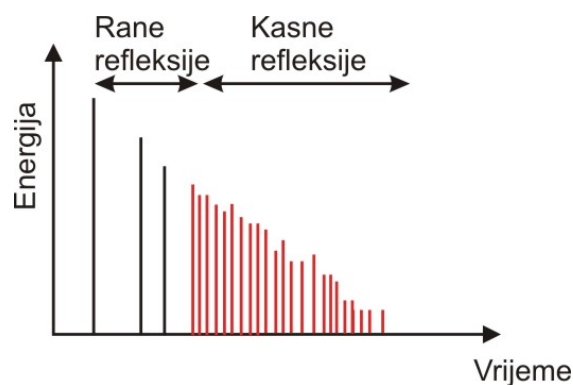
Reverb (odjek)

Efekt odjeka se bazira na širenju zvuka u prostoriji. Ako se u prostoriji nalazi izvor zvuka i slušatelj, onda će do slušatelja osim direktnog zvuka dolaziti i reflektirani zvuk koji se reflektira od zidova, poda i stropa. Te refleksije mogu biti rane i kasne, ovisno o tome koliko puta se signal reflektirao od određene površine. Slika 3.8 prikazuje shemu jedne takve situacije u nekoj prostoriji.



Slika 3.8 Primjer refleksija u prostoriji.

Način refleksija, količina i njihov intenzitet ovisi o karakteristikama prostorije. Ako se na zidovima nalaze apsorpcijski materijali, onda će refleksije biti prigušene. Također, apsorpcija zvučne energije tih materijala ovisi o frekvenciji signala, tako da će odjek ovisiti i o frekvenciji. Osim toga važan je i oblik prostorije, te njen volumen. Kada se svi ti signali zbroje na mjestu slušatelja, on to percipira kao odjek zvučne energije. Na slici 3.9 prikazan je vremenski dijagram tako percipiranog zvuka na mjestu slušatelja. Dakle, na mjestu slušatelja se u vrlo kratkom vremenu pojavljuju zakašnjeni i ponovljeni signali, a vrijeme kašnjenja se kreće do 300 ms.



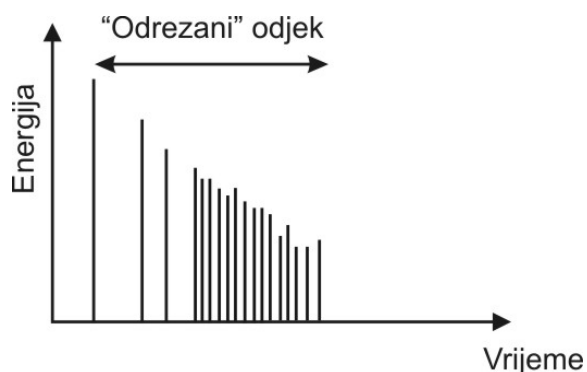
Slika 3.9 Vremenski dijagram širenja zvuka u prostoriji.

Kao što se može vidjeti na tom dijagramu, refleksije se pojavljuju u različito vrijeme i uz različiti intenzitet, te se mogu podijeliti na rane i kasne refleksije. Odnos vremena pojave ranih i kasnih refleksija, te njihov intenzitet je određen karakteristikama prostorije. To znači da mi, regulacijom kašnjenja i glasnoće originalnog signala može dobiti dojam da se originalni signal reproducirao u nekoj prostoriji. Tako dodani efekt se naziva "umjetni odjek". Razlika između odjeka i echo efekta je u vremenu kašnjenja. Kod echo efekta vrijeme kašnjenja je točno definirano i uvijek je jednako za svaki ponovljeni signal. Kod odjeka, vrijeme kašnjenja se stalno mijenja ovisno o frekvenciji signala, karakteristikama prostorije, i drugim parametrima. Osim toga vrijeme kašnjenja kod odjeka je vrlo kratko, ovisno o vrsti refleksija, dok je kod echo efekta vrijeme kašnjenja relativno veliko i može trajati nekoliko sekundi.

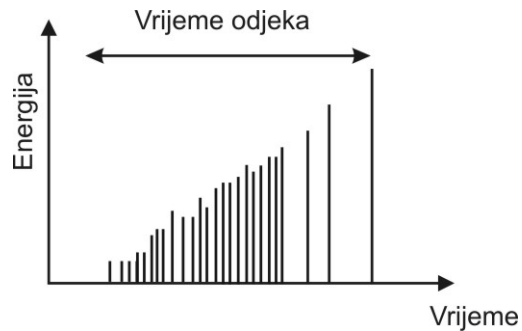
Dodavanjem umjetnog odjeka možemo poboljšati kvalitetu reprodukcije. Zvuk koji je reproduciran bez nikakvog odjeka djeluje suho i umjetno. Ljudsko uho je naviklo na odjek i šum, tako da je zvuk snimljen u gluhoj komori, gdje nema nikakvog odjeka, neugodan za slušanje. Dodavanjem malog odjeka može se uvelike unaprijediti kvaliteta slušanja. U tu svrhu se rabe razne vrste oblika umjetnog odjeka.

Prvi od njih je *gate reverb*, kod kojega je vrijeme odjeka fiksno. Dakle, vrijeme odjeka se podesi na neku vrijednost i svaki signal koji prođe kroz takav uređaj će biti zakašnjen vrlo kratko vrijeme, biti će ponavljan puno puta, ali će vrijeme trajanja takvog signala biti ograničeno. Slika 3.10 prikazuje primjer *gate reverb* efekta. Gate reverb efekt se najčešće rabi na bubnjevima.

Drugi efekt na bazi odjeka je *reverse reverb*, koji kako ime kaže označava efekt kod kojega reflektirani signali s vremenom postaju glasniji. I ovaj efekt se rabi za poboljšanje kvalitete reprodukcije. Slika 3.11 prikazuje primjer takvog efekta.



Slika 3.10 Primjer gate reverb efekta.



Slika 3.11 Primjer reverse reverb efekta.

Za namještanje efekta odjeka rabe se razni parametri, koji se mogu naći na profesionalnim uređajima. Redom to su:

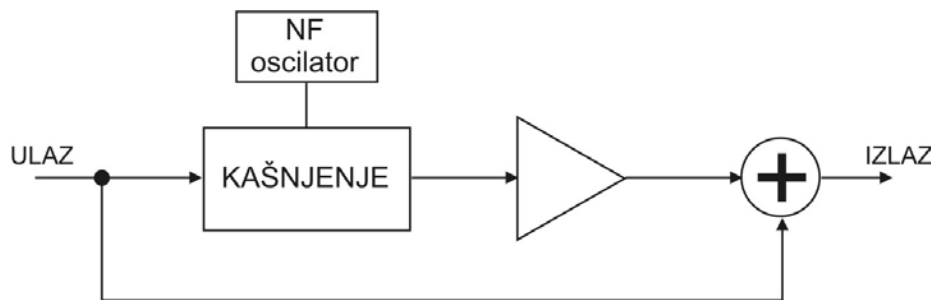
- Predelay – određuje početno kašnjenje; vrijeme ranih i kasnih refleksija
- Reverb decay – trajanje signala nakon prestanka reprodukcije izvora signala
- Gate time – vrijeme trajanja odjeka
- Gate decay time – brzina opadanja intenziteta signala
- Gate threshold – prekid odjeka prema određenoj razini signala, a ne vremenu.

Implementacija efekta odjeka se u početku provodila analognim uređajima i posebnim mehaničkim pretvaračima. U početku se do radilo u odječnim komorama, odnosno prostorijama koje su tako konstruirane da imaju veliko vrijeme odjeka. U prvim gitarskim pojačalima, za dobivanje odjeka su se rabile opruge s posebnim električko-mehaničkim pretvaračima. Električni signal iz gitare se dovodio do pretvarača koji je struju pretvarao u mehaničko titranje opruge. Na drugom kraju opruge se nalazio mehaničko-električki pretvarač koji je titranje opruge ponovo pretvarao u električku struju. Vrijeme odjeka i intenzitet odjeka ovise o karakteristikama opruge. Primjenom različitih opruga, te njihovim prigušenjem moglo se mijenjati parametre odjeka. Na sličan način su se rabile i odječne ploče, koje su prenosile mehaničke titraje s jednog kraja na drugi.

Danas se u većini slučajeva rabe digitalni procesori s memorijama, koji omogućuju puno više fleksibilnosti i nude više parametara za namještanje.

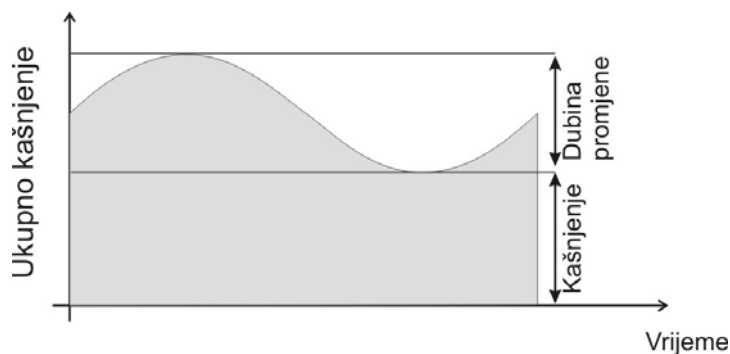
Chorus

Još jedan efekt koji je baziran na kašnjenju signala. U doslovnom prijevodu njegov naziv znači "zbor", a koristi se za obogaćivanje zvuka, "dodavanjem" vokala ili instrumenata. Kada slušamo zbor kako pjeva, svi pjevači ne pjevaju u glas, nego postoje mala kašnjenja između pojedinih pjevača, koja su čas kratka, čas duga ili ih nema. Dakle, kašnjenje se mijenja u nekom ritmu ili slučajno. Na tom principu radi *chorus* efekt. Vrijeme kašnjenja je relativno kratko, između 20 ms i 30 ms, s time da se vrijeme kašnjenja mijenja u ritmu neke frekvencije, recimo 3 Hz. Shema uređaja za chorus efekt je dana na slici 3.12. Na element za kašnjenje je spojen NF oscilator, koji mijenja vrijeme kašnjenja u ritmu određene frekvencije. Dakle vrijeme kašnjenja je u jednom trenutku 20 ms, pa raste, dođe do 30 ms, pa pada i opet se vrati na 20 ms.



Slika 3.12 Shema uređaja za chorus efekt.

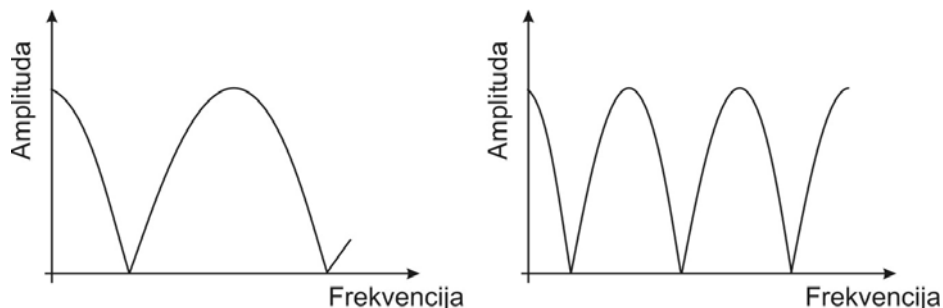
Slika 3.13 prikazuje shemu kašnjenja chorus efekta. Parametri koji se mogu mijenjati su početno kašnjenje, dubina promjene kašnjenja, te oblik signala promjene kašnjenja. Signal promjene kašnjenja može biti sinusni, pilasti ili logaritamski. Dodavanjem više linija za kašnjenje, može se povećati broj "glasova", odnosno zakašnjelih signala, te dodatno obogatiti zvuk. Isti efekt se može primijeniti na stereo signal, kod kojega se postiže "širi" zvuk, odnosno dojam prostornosti.



Slika 3.13 Shema promjene kašnjenja kod chorus efekta sa sinusnim signalom.

Flanger

Flanger efekt se bazira na kratkom kašnjenju signala od 1 ms do 10 ms. Shema uređaja odgovara osnovnoj shemi za kašnjenje signala. Ovako kratko kašnjenje signala uzrokuje da na određenim frekvencijama i višekratnicima tih frekvencija dolazi do poništavanja signala. Ako signal zakasnimo za određeno kratko vrijeme i zbrojimo s ulaznim signalom, ta dva signala će biti u protufazi na frekvenciji čiji period odgovara vremenu kašnjenja. Ako je amplituda ta dva signala jednaka, poništavanje će biti potpuno. S druge strane ako je amplituda zakašnjelog signala niža, neće doći do potpunog poništavanja nego samo do prigušenja na određenoj frekvenciji. Slika 3.14 prikazuje frekvencijsku karakteristiku flanger uređaja, za razna vremena kašnjenja. Ovaj oblik frekvencijske karakteristike odgovara takozvanom "češljastom" filtru.

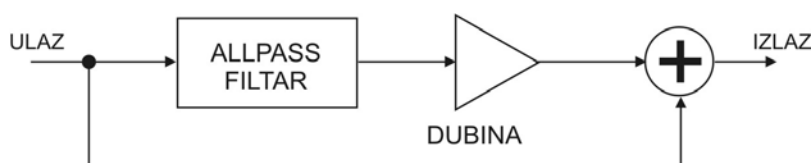


Slika 3.14 Frekvencijska karakteristika flanger uređaja.

Parametri flanger efekta uključuju dubinu promjene vremena kašnjenja, oblik signala s kojim reguliramo promjenu kašnjenja te naravno početno vrijeme kašnjenja. Ako odaberemo duže kašnjenje, poništavanje će se pojaviti na nižoj frekvenciji, a ako odaberemo kraće vrijeme kašnjenja, poništavanje će se pojaviti na višoj frekvenciji. S dodavanjem povratne veze u uređaj za kašnjenje mogu se postići dodatni efekti, a ponekad se koristi i stereo flanger efekt.

Phaser

Phaser efekt je sličan flanger efektu, samo u ovom slučaju nema kašnjenja signala, barem ne u pravom smislu riječi. Slika 3.15 prikazuje shemu phaser uređaja. Ulazni signal se propušta kroz široko pojasni filter, koji ima ravnu frekvencijsku karakteristiku pojačanja, ali mu se faza linearno mijenja s frekvencijom. Propuštanjem signala kroz takav filter doći će do promjene faze na određenim frekvencijama, a kada se takav signal zbroji s ulaznim doći će do prigušenja na tim frekvencijama.



Slika 3.15 Shema phaser uređaja.

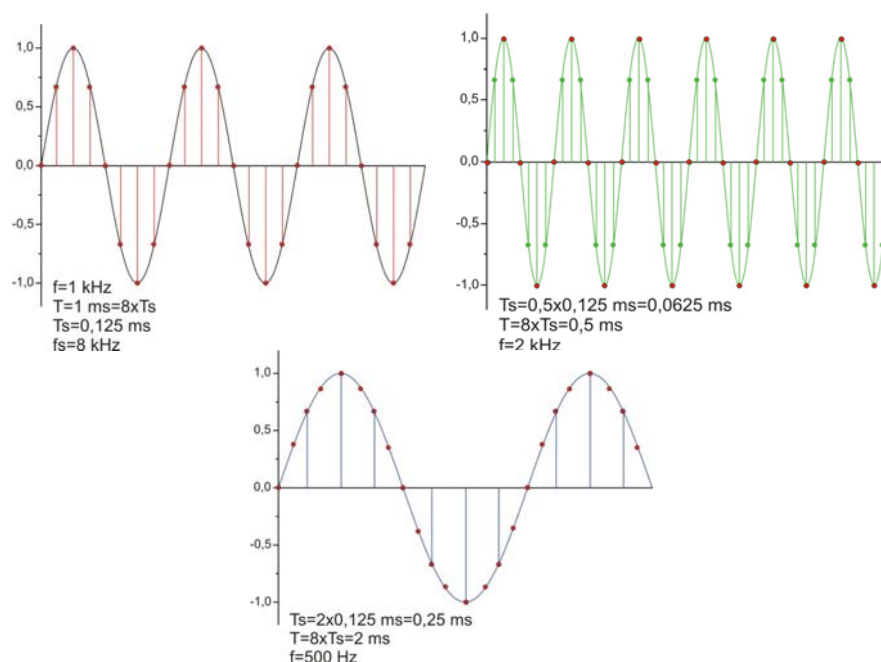
Kao i kod flanger efekta može se mijenjati dubina promjene, odnosno razina poništavanja, te brzina (ritam) pomicanja udubina. S povratnom vezom se mogu dobiti dodatni efekti, kao i kod stereo signala.

Vremenski/frekvencijski pomak

Još jedan efekt koji je baziran na promjenama u vremenskoj domeni, ali se u nekim slučajevima promjena vrši i u frekvencijskoj domeni. U engleskoj terminologiji taj efekt se naziva *time/pitch shifting*.

Vremenski pomak se odnosi na efekt promjene trajanja signala bez promjene spektra. Na primjer ako hoćemo ubrzati ritam, odnosno takt sviranja instrumenta, a da ne promijenimo oktavu sviranja, koristiti ćemo ovaj efekt. Ovaj efekt rabe DJ-i kada žele "umiksati" dvije pjesme različitog ritma. Da bi "umiksavanje" bilo dobro, ritam (BPM – beats per minute) te dvije pjesme mora biti ujednačen, ali ne smije doći do promjene spektra audio signala, odnosno promjene harmonijskog odnosa. Da bi se to moglo obaviti, potrebno je prepoznati frekvenciju ritma i spektar signala. Zbog toga se signal prebacuje u frekvencijsku domenu (STFT – Short Time Fourier Transform) gdje se detektira frekvencija ritma, koja je obično na niskim frekvencijama, te se promijenit i signal se vraća u vremensku domenu.

Frekvencijski pomak se odnosi na promjenu spektra (ali uz zadržavanje harmonijskog odnosa) signala uz zadržavanje vremenskog trajanja. Na primjer, kao kada svirač zadrži ritam sviranja, ali svira u višoj ili nižoj oktavi. Frekvencijski pomak se može vrlo jednostavno postići promjenom frekvencije uzorkovanja signala kako je prikazano na slici 3.16.



Slika 3.16 Shema promjene spektra signala promjenom frekvencije uzorkovanja

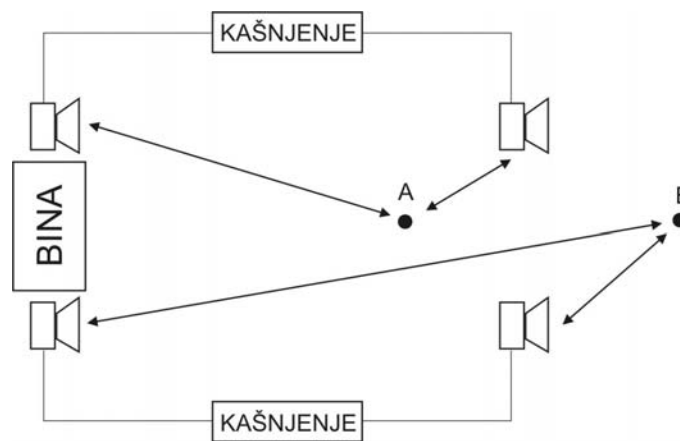
Na primjer, ako imamo signal frekvencije 1 kHz, koji je uzorkovan s frekvencijom od 8 kHz, vrijeme između uzoraka će biti 0,125 ms. Jedan period signala će se sastojati od 8 uzoraka. Ako promijenimo vrijeme trajanja između uzoraka za pola na 0,0625 ms, osam uzoraka će dati frekvenciju signala od 2 kHz. Ako s druge strane povećamo vrijeme između uzoraka za dva puta na 0,25 ms, osam uzoraka će dati frekvenciju signala od 500 Hz. Dakle, ako imamo spremljene uzorke nekog signala, promjenom vremena između pojedinih uzoraka možemo mijenjati frekvenciju signala. Nedostatak ove metode je u tome što se na isti način mijenja i frekvencija ritma, odnosno takta sviranja.

Zbog toga se rabe složeniji uređaji kao što je *Phase vocoder*, koji cijelu obradu signala prebacuje u frekvencijsku domenu sa već spomenutim STFT postupkom. U frekvencijskoj domeni dolazi do promjene amplituda i faza spektralnih komponenata, prepoznavanja frekvencije ritma, a može se promijeniti i frekvencija uzorkovanja spektra. Nakon obrade signal se vraća u vremensku domenu.

Osim spomenutog uređaja, za ovakvu obradu signala se koristi i *wavelet* analiza, kod koje se signal dijeli na male odsječke na kojima se vrši filtriranje. Nakon toga se na pojedinim filtriranim odsječcima vrši promjena spektra, a nakon toga se vremenski odsječci zbrajaju i slaže se novi signal.

Kašnjenje – percepcija usmjerenosti

Kašnjenje signala se rabi i u nekim drugim slučajevima gdje se ne žele postići razni efekti, nego se žele kompenzirati problemi nastali zbog različitog puta dolaska zvučnog vala do slušatelja. Na primjer, u slučajevima velikih koncerata ili ozvučenja stadiona, za ozvučavanje se rabe zvučnici pored bine, ali i zvučnici koji su postavljeni dalje od bine kako bi se pokrio dodatni prostor. Na slici 3.17 je prikazana jedna takva konfiguracija. Slušatelji na mjestima A i B će osim zvuka iz zvučnika s bine čuti i zvuk koji dolazi s udaljenih zvučnika. Radi kvalitete slušanja, slušatelj uvijek mora imati dojam da zvuk dolazi s bine, a ne sa strane. Zbog toga se signal koji dolazi do vanjskih zvučnika mora malo zakasniti.



Slika 3.17 Primjer ozvučavanja koncerta.

Ljudski mozak se za određivanje smjera dolaska zvučnog vala koristi raznim metodama i efektima. Prvi i osnovni je oblik ljudskog uha, koje nije ništa drugo nego mehanički filter. Usmjerna karakteristika ljudskog uha se mijenja ovisno o tome kako okrećemo glavu. Mozak na osnovu tih informacija o promjeni frekvencijske karakteristike uha i iskustva prijašnjeg slušanja određuje smjer dolaska vala. Osim toga koristi i druge efekte:

- Odnos direktne i reflektirane energije
- Ako postoji kašnjenje od 30 ms prema originalnom signalu dobiva se echo efekt
- Ako je drugi signal 10 dB glasniji od prvog dobiva se echo efekt
- Hassov efekt – ako je drugi zvuk unutar 10 dB od prvog i kašnjenje je unutar 30 ms, pomak zvučne slike je prema izvoru (smjeru dolaska vala)
- Ako je drugi zvuk za 10 dB glasniji od prvog, dobiva se dojam prostornog proširenja zvuka

Na velikim koncertima to treba uzeti u obzir. Ako je brzina zvuka oko 334 m/s, to znači da će zvuk za 30 ms prijeći 10 metara, što nije malo. Osim toga s udaljenosti pada i intenzitet zvuka po principu 6 dB za dvostruku udaljenost. Zbog toga se signal do stražnjih zvučnika mora malo zakasnuti kako bi signal sa bine i signal sa stražnjih zvučnika do slušatelja stigli unutar 30 ms. A ako im je intenzitet unutar 10 dB, onda će slušatelj imati osjećaj da zvuk dolazi srijeda, iako je zvuk iz stražnjih zvučnika nešto glasniji. Na primjer, ako je na slici 3.17 u točki A zvuk iz drugih zvučnika glasniji za 6 dB od prednjih i kasni 5 ms, slušatelj će imati osjećaj da zvuk dolazi s bine.

Uređaj za efekte

Slika 3.18 prikazuje jedan digitalni uređaj za efekte, koji u sebi objedinjuje sve spomenute efekte.



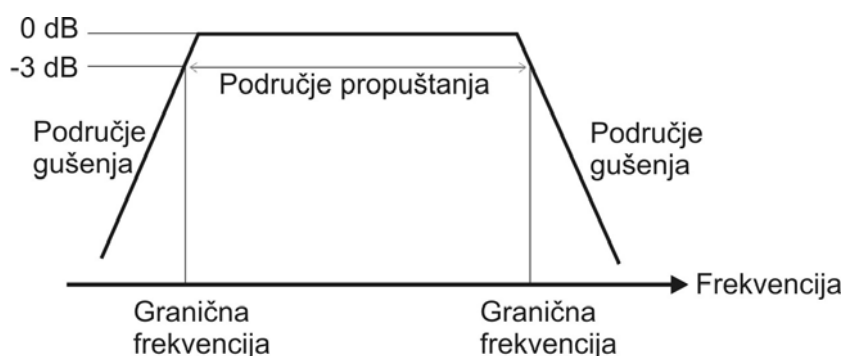
Slika 3.18 Digitalni procesor Yamaha SPX2000.

3.2 Frekvencijska obrada signala

Frekvencijska obrada audio signala se bazira na filtrima. Filtar je sklop ili uređaj koji obrađuje signale na osnovi njihove frekvencije. Dakle, oblik spektra signala koji uđe u filter i signala koji izađe iz filtra neće biti jednak. Dakle, filter može pojačavati ili prigušivati signale određene frekvencije ili određene grupe frekvencija. Prema području propuštanja i gušenja, filteri se dijele na četiri osnovne vrste:

- Pojasni propust – propuštanje određenog frekvencijskog područja (*bandpass*)
- Pojasna brana – prigušivanje određenog frekvencijskog područja (*bandreject*)
- Nisko-propusni filter – propuštanje signala frekvencija ispod neke granične frekvencije (*low pass*)
- Visoko-propusni filter – propuštanje signala frekvencija iznad neke granične frekvencije (*high pass*)

Slika 3.19 prikazuje osnovne oznake frekvencijske karakteristike filtra. Frekvencijska karakteristika filtra se sastoji od područja propuštanja (*bandwidth*) i područja gušenja. Područje propuštanja je područje frekvencija u kojem signali tih frekvencija prolaze kroz filter bez promjene razine signala (pojačanje 0 dB). Područje gušenja je područje frekvencija u kojem signali tih frekvencija prolaze kroz filter uz promjenu razine signala (pojačanje < 0 dB). Područje propuštanja je ograničeno s donjom i gornjom graničnom frekvencijom. Na tim frekvencijama pojačanje signala padne za 3 dB u odnosu na signale u području propuštanja (-3 dB točke). Kod idealnih filtera, prelazak iz područja propuštanja u područje gušenja bi bio brz. Kod realnih filtera taj prijelaz je blag, odnosno pojačanje se naglo ne mijenja. Taj prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja je određen padom (porastom) filtra, a taj pad određuje red filtra. Središnja frekvencija područja propuštanja je predstavljena geometrijskom sredinom graničnih frekvencija $f = \sqrt{f_{dg} \cdot f_{gg}}$.



Slika 3.19 Osnovne oznake frekvencijske karakteristike filtra.

Osnovna analiza filtera

Najjednostavniji nisko-propusni filter je RC sklop, koji će nam poslužiti za analizu filtera. Njegova prijenosna karakteristika se može napisati kao:

$$A(s) = \frac{u_{izl}}{u_{ul}} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{1 + sRC} \quad \text{gdje je } s = j\omega$$

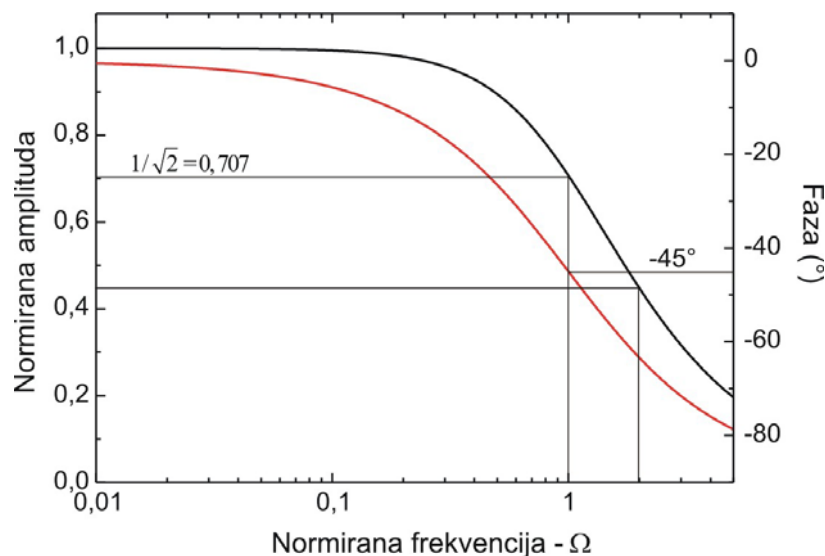
Ako prijenosnu funkciju normaliziramo prema graničnoj frekvenciji sklopa $\omega_g = \frac{1}{RC}$ dolazimo do sljedećeg:

$$p = \frac{s}{\omega_g} = j \frac{\omega}{\omega_g} = j\Omega, \quad A(p) = \frac{1}{1+p}$$

Odnosno modul i faza prijenosne karakteristike filtra kao funkcije normalizirane frekvencije se mogu napisati kao:

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{1+\Omega^2}}, \quad \varphi = \arctan(-\Omega) \quad [rad]$$

Slika 3.20 prikazuje modul i fazu prijenosne karakteristike filtra. Vidljivo je da je pojačanje sklopa za frekvencije ispod granične frekvencije ($\Omega=1$) veće od 0,707 (-3 dB), a da pojačanje iznad te frekvencije opada. Prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja nije oštar, nego blag. Isto vrijedi za promjenu faze.

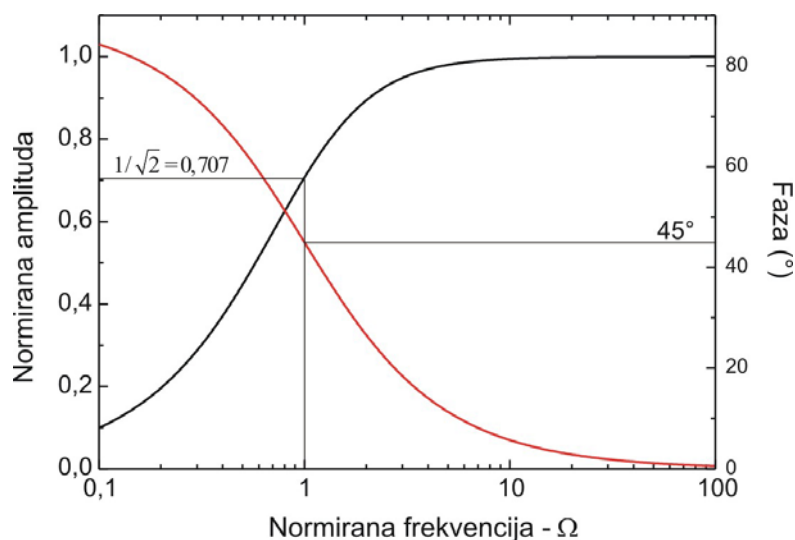


Slika 3.20 Modul i faza prijenosne karakteristike nisko-propusnog RC filtra (crna crta – modul; crvena crta – faza).

Na jednaki način se može izračunati prijenosna frekvencijska karakteristika CR kombinacije, koja predstavlja visoko-propusni filter. Nakon kratkog računa dobije se da su modul i faza prijenosne karakteristike CR filtra:

$$|A| = \frac{\Omega}{\sqrt{1+\Omega^2}}, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{1}{\Omega}\right) \quad [rad]$$

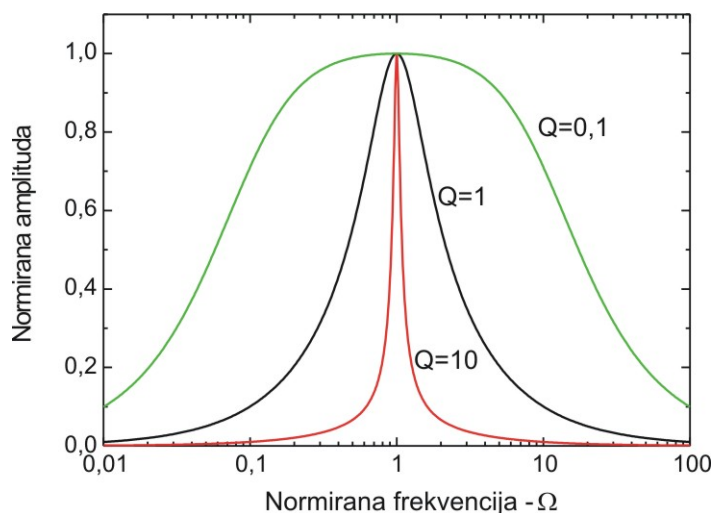
Slika 3.21 prikazuje modul i fazu prijenosne karakteristike CR filtra.



Slika 3.21 Modul (crna crta) i faza (crvena crta) prijenosne karakteristike visoko-propusnog CR-filtra.

Ako u seriju spojimo kondenzator i induktivitet, a otpornik služi kao opterećenje, može se dobiti uskopojasni propusni filtar. Na slici 3.22 prikazana je prijenosna karakteristika takvog filtra, a iz nje je vidljivo da će pojačanje biti 1 (0 dB) samo na određenoj frekvenciji ili uskom dijelu frekventijskog pojasa. Frekvencija je određena vrijednostima kapaciteta i induktiviteta, a širina vrijednosti otpora. Nakon kraćeg računa dobije se izraz za modul prijenosne karakteristike RLC filtra prema normaliziranoj frekvenciji.

$$|A| = \frac{\Omega \frac{1}{Q}}{\sqrt{\left(1 - \Omega^2\right)^2 + \left(\Omega \frac{1}{Q}\right)^2}}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$$

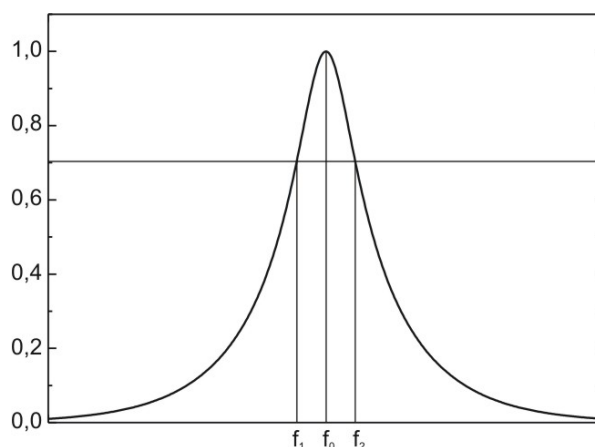


Slika 3.22 Prijenosna karakteristika RLC filtra.

Q faktor predstavlja takozvani faktor dobrote, ili faktor prigušenja. Sa slike 3.22 se može vidjeti da što je faktor dobrote veći to je širina pojasa propuštanja filtra uža, a kako se faktor dobrote smanjuje, to je širina pojasa propuštanja filtra veća. Faktor dobrote se može očitati iz same prijenosne karakteristike. Ako se očitaju frekvencije (f_1 i f_2) na kojima

pojaćanje u odnosu na pojaćanje na središnjoj frekvenciji f_0 padne za 3 dB, kako je prikazano na slici 3.23, Q faktor se moēe izraćunati prema slijedećoj jednakosti:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



Slika 3.23 Izraćunavanje faktora dobrote iz prijenosne karakteristike filtra.

Ako se realni RC filter s prijenosnom karakteristikom na slici 3.20 usporedi s idealnim filtrom, vidljivo je nekoliko znaćajnih razlika. Prvo, pojaćanje propusnog dijela poćne padati puno prije granićne frekvencije filtra. Drugo, prijelaz izmeću podrućja propućtanja u podrućje gućenja nije oćtar, nego postoji pad karakteristike. Fazna karakteristika nije linearna neko se pomak u fazi mijenja s frekvencijom. To su tri osnovne karakteristike prema kojima se dobivaju razlićite vrste filtara.

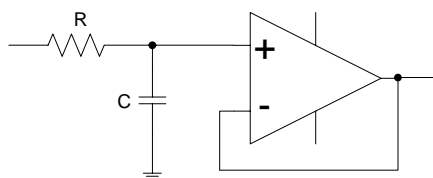
Dakle, moēemo utjecati na najveće moguće ravno pojaćanje u podrućju propućtanja, na brzinu prijelaza izmeću podrućja propućtanja i podrućja gućenja, te na oblik fazne karakteristike.

Aktivni filtri

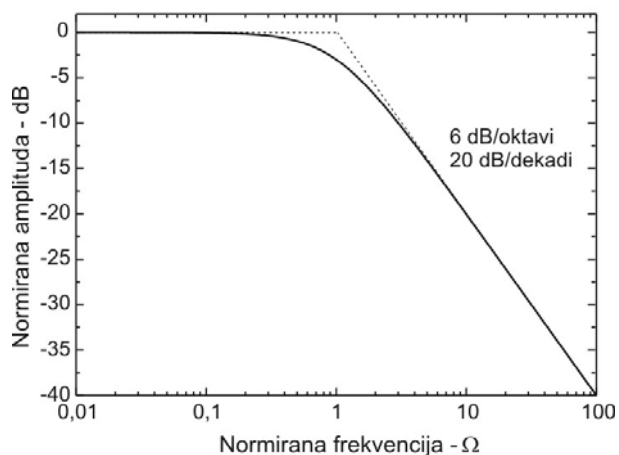
Aktivni filtri su takvi filtri kojima se pojaćanje propusnog dijela moēe namjećtati. Kod pasivnih filtara pojaćanje u tom dijelu je bilo 1 (0 dB). Kod aktivnih filtara mi moēemo regulirati to pojaćanje. Osim toga, aktivni filtri, koji su ostvareni s operacijskim pojaćalima mogu se konstruirati samo s otpornicima i kondenzatorima, a to su komponente koje zauzimaju manje mjesta i jeftinije su. Prijenosna karakteristika aktivnih filtara ne ovisi o slijedećem stupnju, odnosno ulazni otpor aktivnog filtra je velik, a izlazni otpor je mali. Aktivni filtri omogućuju postizanje prijenosnih karakteristika koje nisu moguće s pasivnim filtrima.

Nedostatak aktivnih filtara je u tome što trebaju napajanje, a napon napajanja ogranićava maksimalni izlazni napon. S druge strane aktivni elementi unose ćum.

Najjednostavniji aktivni filter je prikazan na slici 3.24 i sastoji se od RC kombinacije i operacijskog pojaćala. Njegova prijenosna karakteristika je prikazana na slici 3.25. Pad ovog filtra prvog reda je 6 dB/oktavi, odnosno 20 dB/dekadi.

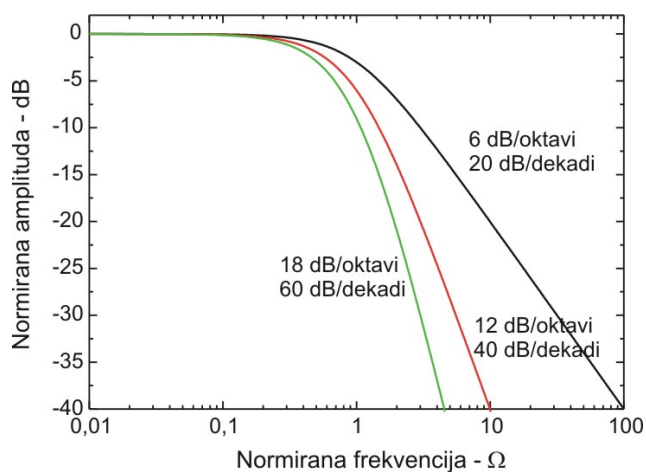


Slika 3.24 Najjednostavniji RC aktivni filter.



Slika 3.25 Prijenosna karakteristika nisko-propusnog aktivnog filtra prvog reda.

Ako želimo dobiti "brži" pad filtra, možemo u kaskadu spojiti dva filtra prvog reda, kako bi se dobio filter drugog reda. Dakle, ako želimo još više povećati brzinu pada pojačanja u kaskadu možemo spojiti proizvoljni broj filtara prvog reda. Slika 3.26 prikazuje prijenosne karakteristike filtara prvog (6 dB/okt), drugog (12 dB/okt) i trećeg reda (18 dB/okt).



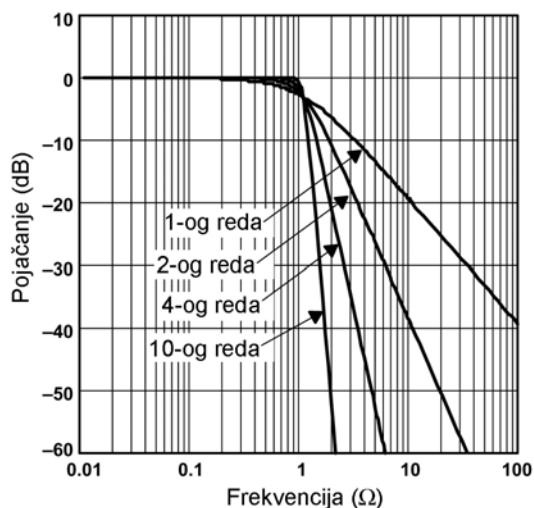
Slika 3.26 Prijenosne karakteristike filtara prvog, drugog i trećeg reda.

Prijenosna funkcija tako spojenih filtara prvog reda se može napisati kao:

$$A(s) = \frac{1}{(1 + \alpha_1 s)(1 + \alpha_2 s)(1 + \alpha_3 s) \cdots}$$

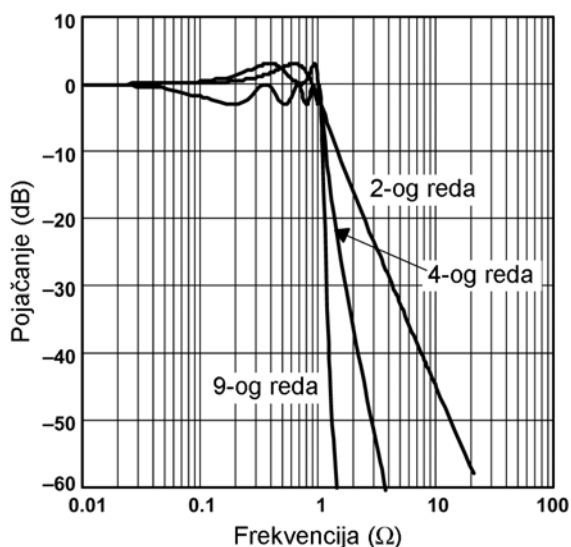
Promjenom koeficijenata α pojedinog filtra mogu se dobiti različite prijenosne karakteristike filtara, a one se mogu podijeliti na tri osnovna filtra različitih karakteristika.

Butterworth filtri su filtri čija je prijenosna karakteristika optimizirana za najveće ravno pojačanje u području propuštanja. Kod ovih filtara je cilj postići da pojačanje ne počne opadati puno prije granične frekvencije, nego tik uz nju. Zbog toga se ovi filtri najčešće rabe u A/D pretvaračima kao anti-aliasing filtri. Slika 3.27 prikazuje prijenosnu karakteristiku takvih filtara.



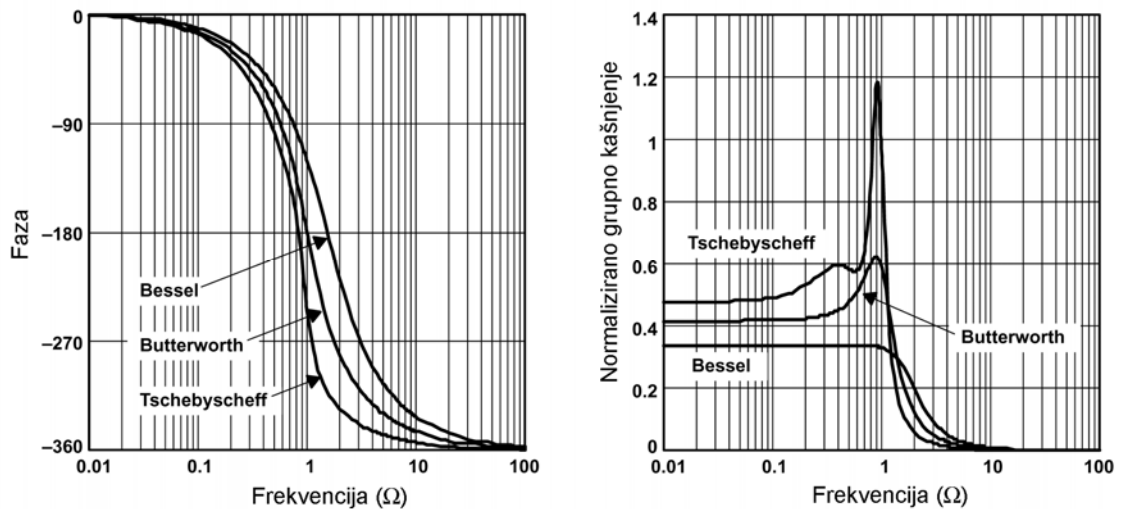
Slika 3.27 Butterworth filtar.

Tschebyscheff filtri su filtri optimizirani za što brži prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja. Oni za jednaki red filtra omogućuju brži pad prijenosne karakteristike, što znači da ona brže opada nakon granične frekvencije. To se ne može postići uz neke nedostatke. Kod ovih filtara se oko granične frekvencije pojavljuje istitravanje prijenosne karakteristike. Što je pad filtra veći to će istitravanje biti izraženije. Filtri parnog reda imaju istitravanje iznad, a nepranog ispod 0 dB. Često se rabe u uređajima koji koriste filtarske nizove, gdje je frekvencijski pojas važniji od amplitude. Slika 3.28 prikazuje prijenosne karakteristike ovog filtra.



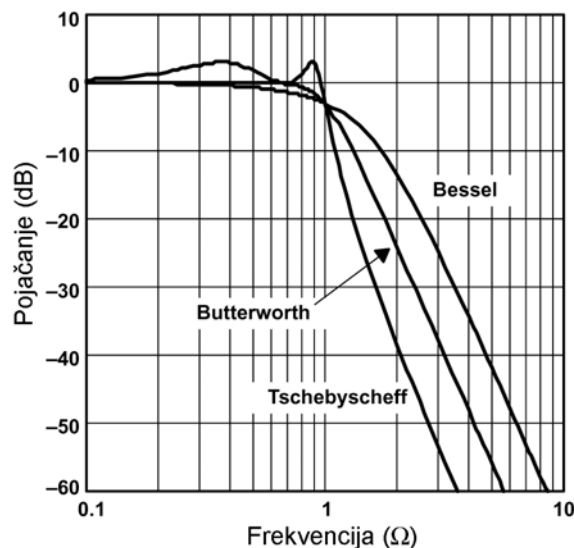
Slika 3.28 Tschebyscheff filtar.

Bessel filtri su filtri optimizirani za linearnu faznu prijenosnu karakteristiku preko širokog frekvencijskog područja, što rezultira u konstantnom grupnom kašnjenju. Zbog toga Bessel filtri omogućuju optimalnu prijenosnu karakteristiku za dinamičke signale, na primjer za pravokutni signal. S druge strane pojačanje propusnog dijela pada puno prije granične frekvencije, a prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja nije oštar. Slika 3.29 prikazuje prijenosne karakteristike Bessel filtra.



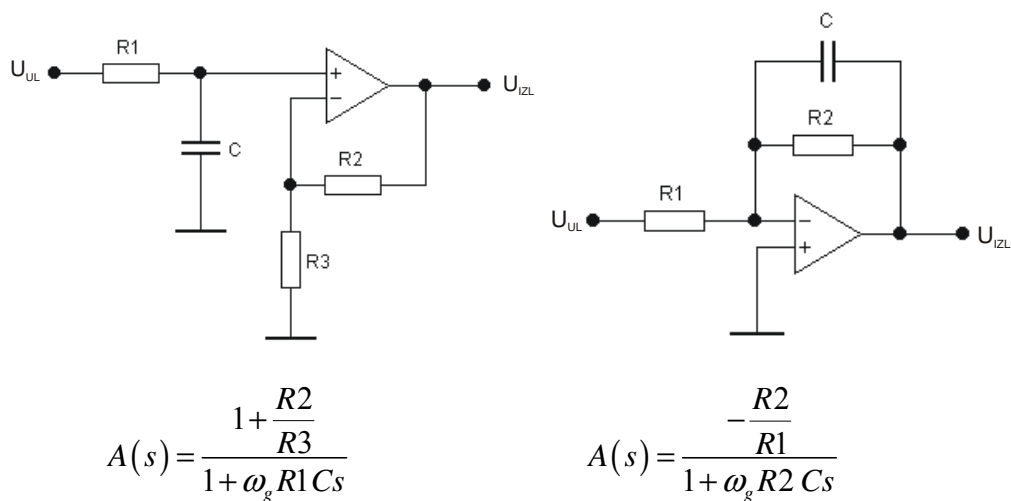
Slika 3.29 Prijenosne karakteristike Bessel filtra.

Na slici 3.30 prikazana je usporedba prijenosnih frekvencijskih karakteristika sve tri osnovne vrste filtara.

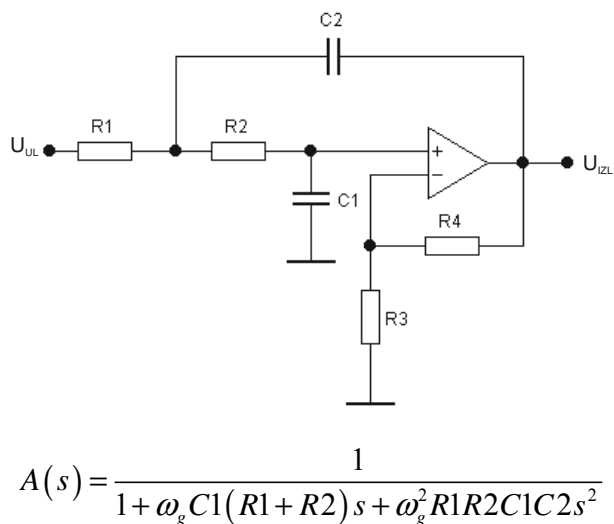


Slika 3.30 Usporedba tri osnovne vrste filtara.

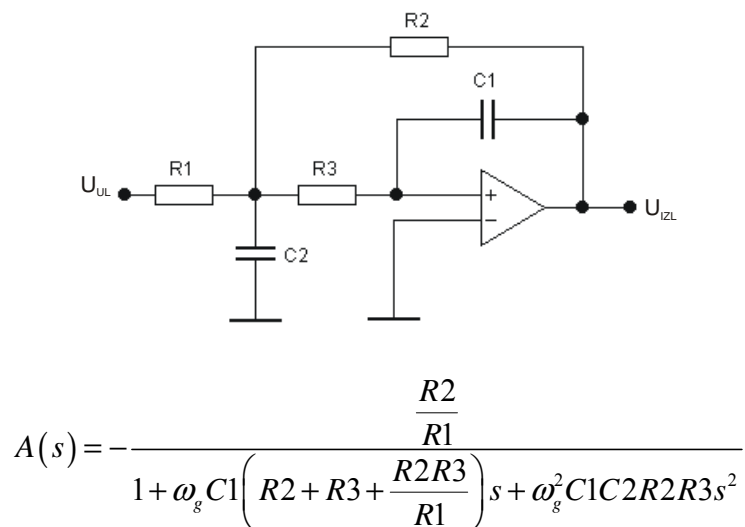
Na slijedećim slikama su dane neke osnovne sheme filtara uz izraze za njihove prijenosne funkcije.



Slika 3.31 Nisko-propusni filtri prvog reda



Slika 3.32 Sallen-Key izvedba nisko-propusnog filtra drugog reda



Slika 3.33 MFB (Multiple Feedback) izvedba nisko-propusnog filtra drugog reda.

Ekvalizatori

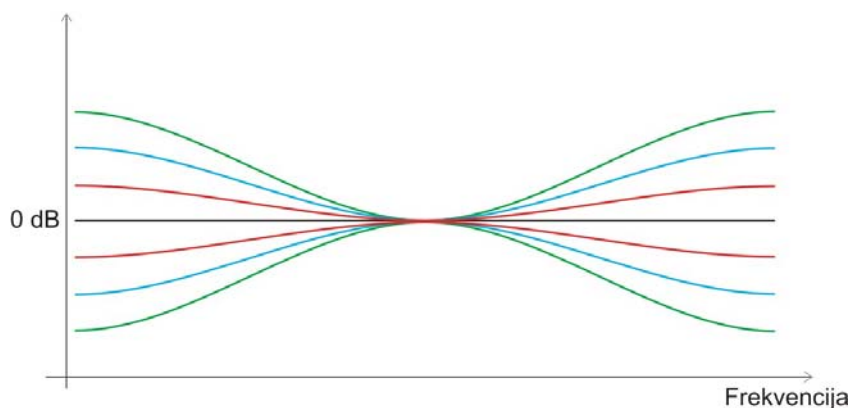
U audiotehnici se za namještanje frekvencija audio signale rabe ekvalizatori (*equalizer*) u raznim izvedbama. Ekvalizatori predstavljaju skup filtara u nizu koji pokrivaju cijelo ili dio frekvencijskog područja. Slika 3.34 prikazuje profesionalnu izvedbu jednog ekvalizatora.



Slika 3.34 profesionalni ekvalizator.

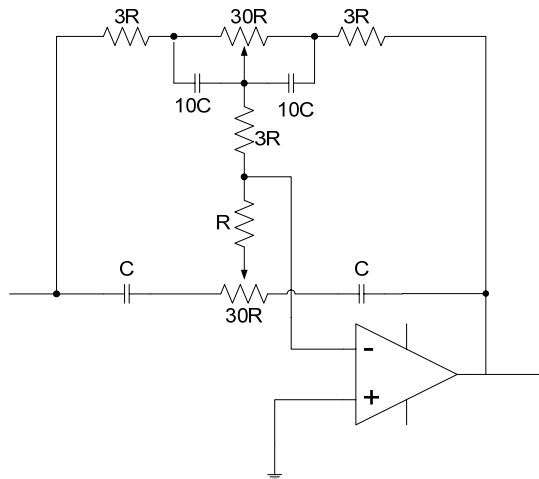
Regulator boje tona

Najjednostavniji ekvalizator je regulator boje tona, koji se može naći u komercijalnim uređajima. Regulator boje tona omogućuje namještanje frekvencijske karakteristike uređaja samo na niskim i visokim frekvencijama. Naprednije izvedbe daju mogućnost regulacije razine srednjih frekvencija. Na slici 3.35 prikazane su prijenosne frekvencijske karakteristike regulatora boje tona.



Slika 3.35 Prijenosna karakteristika regulatora boje tona s mogućnosti namještanja niskih i visokih frekvencija.

Shema regulatora boje tona je dana na slici 3.36. Okretanjem potencijometra regulira se pojačanje za određeno frekventijsko područje. Analiza ovog sklopa se vrši za tri frekventijska područja. Na niskim frekvencijama kondenzatori predstavljaju veliki otpor i slabo provode struju. U tom slučaju ostane samo gornji potencijometar s dva otpornika. Na srednjim frekvencijama kondenzatori 10C predstavljaju kratki spoj, a kondenzatori C još uvijek predstavljaju veliki otpor, tako da se izbacuju oba potencijometra i ostaju samo dva otpornika 3R. U tom slučaju je pojačanje 1. Na visokim frekvencijama svi kondenzatori predstavljaju kratki spoj i ostaje donji potencijometar i otpornici koji čine spojni trokut. Kada se spoj trokut prebaci u spoj zvijezda dobije se isti spoj kao u slučaju niskih frekvencija.

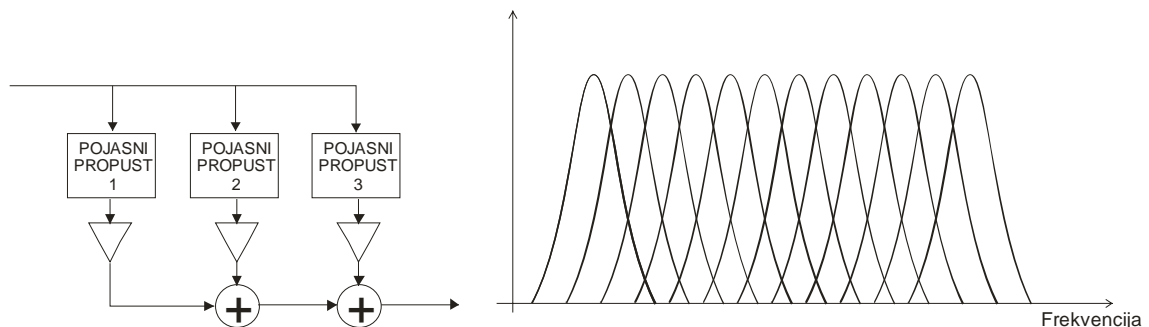


Slika 3.36 Shema regulatora boje tona.

Grafički ekvalizator

Grafički ekvalizator predstavlja korak naprijed od regulatora boje tona. On se sastoji od niza filtera sa fiksnim frekvencijama, kojima se može namještati samo pojačanje (gušenje) određenog filtra. Kada se namjesti određena frekventijska karakteristika, položaj potencijometara odgovara grafičkom prikazu frekventijske karakteristike, pa je od tuda dobio i ime.

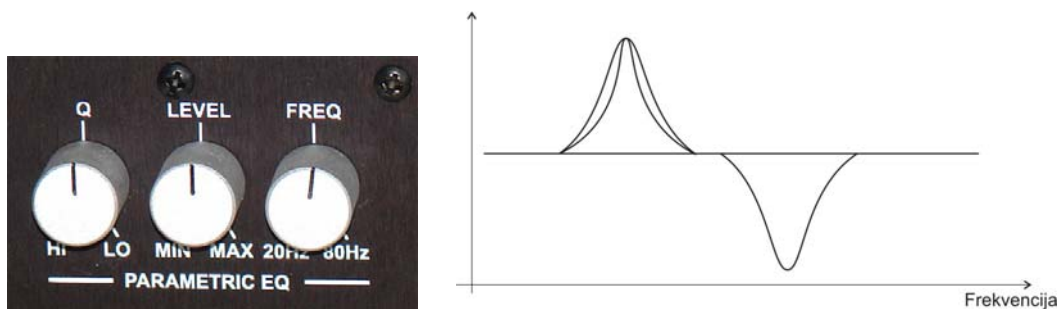
Izvedba ovog filtra je paralelna, što znači da su filteri u njemu spojeni u paralelan spoj prikazan na slici 3.37. U tom slučaju nema problema s promjenom faze signala, jer svaki filter ima jednaki pomak u fazi. Raspored frekvencija je logaritamski, a frekvencije su podijeljene na oktave, trećine oktava ili šestine oktava.



Slika 3.37 Shematski prikaz grafičkog ekvalizatora s prijenosnim karakteristikama.

Parametarski ekvalizator

Parametarski ekvalizator je filter koji pruža najviše fleksibilnosti jer omogućuje namještanje svih osnovnih parametara filtra, pa je prema tome dobio i naziv. Takav filter omogućuje namještanje središnje frekvencije, pojačanja (gušenja) na toj frekvenciji i širinu pojasa (Q faktor) propuštanja. Na slici 3.38 prikazana je jedna izvedba takvog filtra uz primjer prijenosne karakteristike.



Slika 3.38 Parametarski ekvalizator i prijenosna karakteristika.

3.3 Dinamička obrada signala

Dinamika je jedan od najvažnijih parametara u audiotehnici. Ona nam govori koliki nam je raspon od najtišeg do najglasnijeg signala uz uvjet malih izobličenja. Najtiši signali su ograničeni sa razinom šuma, odnosno na koncertima je poželjno da najtiše odsvirane ili otpjevane dionice budu glasnije od okolne buke i šuma. U uvjetima kada nema okolne buke ili šuma, najtiši signali su ograničeni pragom čujnosti ljudskog uha. Međutim, u realnim uvjetima ozvučavanja ili snimanja u studio rijetko se kada nađu uvjeti bez buke ili okolnog šuma.

S druge strane najglasniji signali su ograničeni pragom bola ljudskog uha ili električkim ograničenjima opreme koja se rabi za ozvučavanje. Na koncertima je bitno da reprodukcija ne bude preglasna, jer to može stvoriti neugodu kod slušatelja, ali opet dovoljno glasno da koncert bude kvalitetno reproduciran. Pojačala i zvučnici imaju svoja ograničenja što se tiče izlazne snage. Prevelike razine signala prvo dovode do porasta izobličenja, a s druge strane mogu dovesti do uništenja opreme.

Električka ograničenja ima i sva ostala oprema koja služi za pojačavanje i obradu "malih" signala. Svako pretpojačalo, filter, ulazni transformator ima svoju dinamiku, dakle odnos između najmanjeg i najvećeg signala koji može reproducirati ili prenijeti.

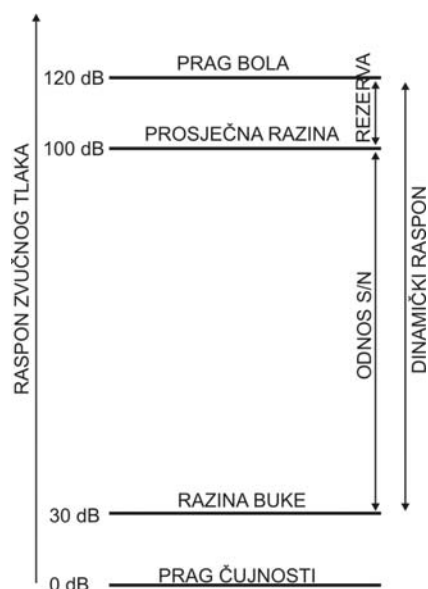
Prilikom reprodukcije signal se održava na nekoj nominalnoj razini, od koje može biti viši ili manji. Ako naglo poraste moramo ga na vrijeme spriječiti da ne poraste previše. Ako naglo padne, moramo ga podići iznad razine šuma.

To su sve ograničenja na koja treba obratiti pažnju prilikom reprodukcije i snimanja, te je zbog toga važno znati i moći regulirati dinamičko ponašanje signala.

Na slici 3.39 prikazan je primjer dinamike jednog koncerta. U slučaju koncerta donja razina je ograničena razinom buke koja se obično kreće oko 30 dB, ali u nekim slučajevima kada publika pjeva zajedno s bendom može se povećati na 50-60 dB. Nominalna razina koncerta je oko 100 dB zvučnog tlaka, što ostavlja dovoljno rezerve (*headroom*) u slučaju naglog povećanja glasnoće, a održava glasnoću na prihvatljivoj razini, odnosno dovoljno glasno iznad okolne buke.

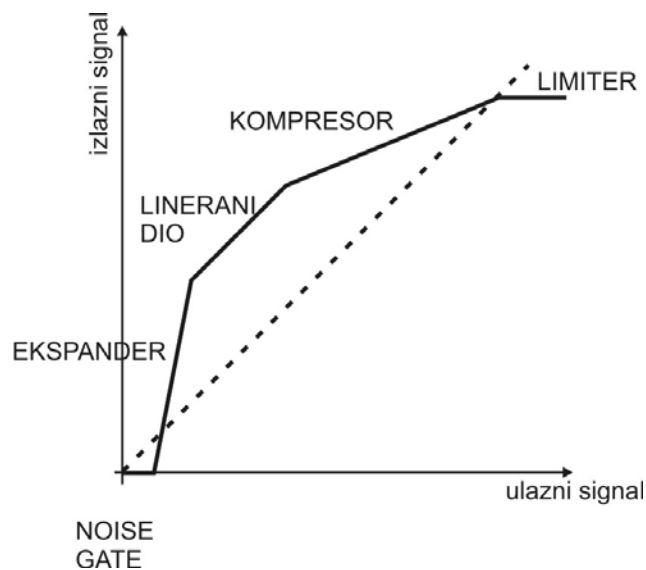
Regulacija dinamike se često koristi i u radijskim studijima. Na primjer ako se u studiju nalazi sugovornik, koji je pretih, njegov glas se mora pojačati. Kako ton-majstor to ne bi rado ručno, jer on ne može predvidjeti kada će gost početi glasno govoriti ili pak tiho govoriti, onda ulogu regulacije dinamike preuzimaju uređaji koji to rade automatski.

Još jedan primjer regulacije dinamike na radijskoj postaji je situacija kada voditelj govori u eter preko glazbene podloge. Kada govori glazba se mora utišati, a kada prestane govoriti ona se treba pojačati. Ako imamo uređaj koji reagira na glasnoću glasa voditelja, onda ga može iskoristiti da regulira glasnoću glazbene podloge.



Slika 3.39 Primjer dinamike na koncertu.

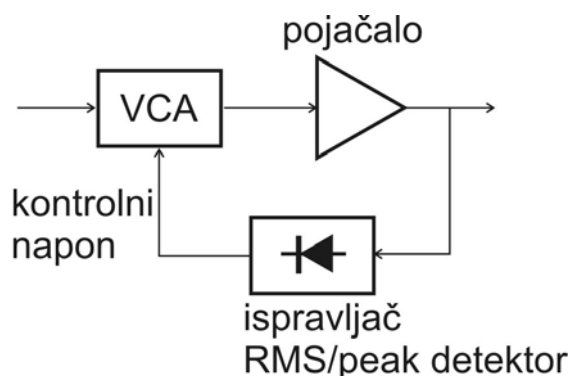
Za regulaciju dinamike koriste se četiri osnovna uređaja: limiter, noise gate, kompresor i ekspander. Na slici 3.40 prikazana je karakteristika pojačanja uređaja koji ima karakteristike sva četiri spomenuta uređaja. Princip rada svih uređaja je u tome da reguliraju pojačanje ulaznog signala na osnovi njegove razine.



Slika 3.40 Karakteristike pojačanja noise gate-a, ekspandera, kompresora i limitera.

Limiter

Limiter je najjednostavniji uređaj za regulaciju dinamike signala. Njegov zadatak je da ograniči maksimalnu amplitudu signala. Na primjer, na koncertima se koristi za ograničavanje razine signala koja se šalje u pojačala snage, odnosno na zvučnike, jer pojačala i zvučnici imaju svoje gornje granice što se tiče izlazne snage i električkog signala. Limiter se ne smije shvatiti kao uređaj koji reže signal, nego uređaj koji ograničava daljnji rast razine signala. Limiter radi na principu detekcije razine izlaznog signala. Shema limitera je prikazana na slici 3.41. Glavni dio svakog uređaja za regulaciju dinamike je VCA (Voltage Controlled Amplifier), odnosno pojačalo čije se pojačanje regulira vanjskim signalom. Signal sa izlaza pojačala se dovodi do ispravljača koji detektira njegovu efektivnu ili vršnu vrijednost, ovisno o izvedu (RMS/peak detector). Izlaz iz ispravljača je signal s kojim se upravlja s VCA sklopom.



Slika 3.41 Shema rada limitera.

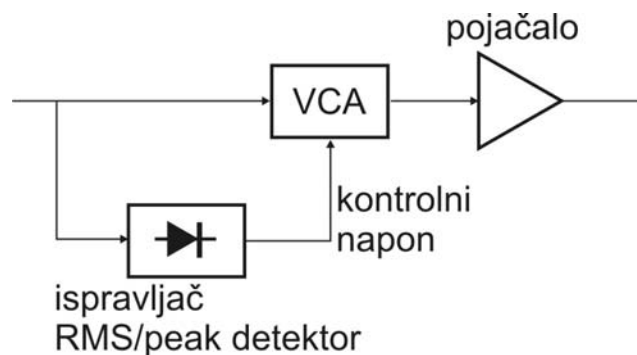
Karakteristika pojačanja limitera je prikazana na slici 3.42. Kada razina ulaznog signala u sklop poraste iznad neke granične razine (*threshold*) razina izlaznog signala više neće rasti s porastom ulaznog signala, nego će biti konstantna. Dakle iznad granične razine, promjena ulaznog napona neće uzrokovati nikakvu promjenu izlaznog napona.



Slika 3.42 Karakteristika pojačanja limitera.

Noise gate

Noise gate je uređaj koji radi suprotnu regulaciju od regulacije limitera, odnosno ograničava razinu jako niskih signala, odnosno šuma. Ako razina signala padne ispod neke donje granice pojačanje tog signala se spušta na nulu, odnosno signal se do kraja utišava. Ovaj uređaj se najčešće koristi za uklanjanje šuma u pauzama sviranja, pjevanja ili govora. Shema uređaja je prikazana na slici 3.43. Uređaj nadgleda razinu ulaznog signala u sklop i kada njegova razina padne ispod namještene donje granice, pojačanje VCA sklopa se smanjuje na nulu, kao što je prikazano na slici 3.44 na karakteristici pojačanja noise gate uređaja.



Slika 3.43 Shema noise gate uređaja.



Slika 3.44 Karakteristika pojačanja noise gate uređaja.

Kompresor

Kompresor radi na sličnom principu kao limiter samo ne ograničava razinu signala, nego smanjuje pojačanje signala u ovisnosti o njegovoj razini. Dakle ako signal poraste iznad neke granice, kompresor neće naglo ograničiti njegovu razinu, nego će to raditi postepeno u jednom ili više koraka, ovisno o tome koliko stupnjeva kompresije koristimo. Shema rada kompresora je jednaka shemi noise gate uređaja. Uređaj detektira efektivnu ili vršnu vrijednost ulaznog signala, te s tim kontrolnim naponom regulira pojačanje VCA sklopa, a time i pojačanje tog istog ulaznog signala. Primjer karakteristike kompresora je dan na slici 3.45. Kompresija se može namjestiti u nekoliko razina, uz dvije ili više graničnih razina. Ispod prve granične razine pojačanje VCA sklopa će biti 1:1, dakle za promjenu ulaznog signala za 1 dB, to će uzrokovati promjenu izlaznog signala za 1 dB. Iznad prve granične razine, promjena ulaznog signala od 2 dB će uzrokovati promjenu izlaznog signala za 1 dB. Iznad druge granične razine, promjena ulaznog signala od 4 dB će uzrokovati promjenu izlaznog signala od 1 dB. Na taj način se razina izlaznog signala polako smanjuje s porastom ulaznog signala u odnosu na linearnu prijenosnu karakteristiku (1:1).



Slika 3.45 Karakteristika pojačanja kompresora.

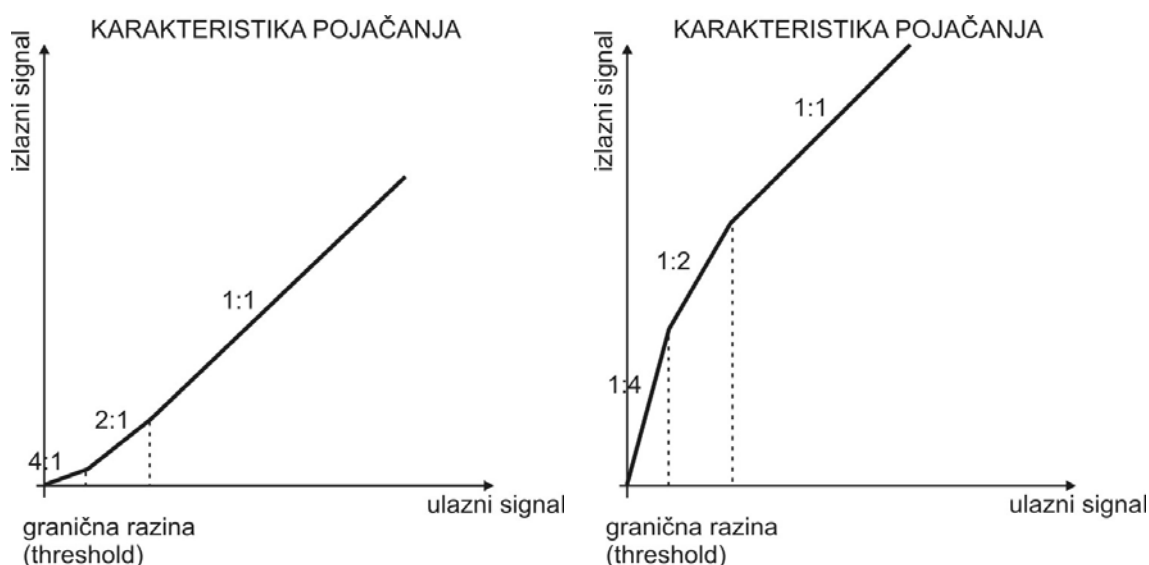
Osim za ograničavanje razine signala, kompresori se često koriste i za poboljšanje kvalitete reprodukcije. Pravilnim odabirom graničnih razina i razina kompresije može se dosta utjecati na kvalitetu sviranja.

Ekspander

Suprotno od kompresora je ekspander, odnosno uređaj koji regulira pojačanje signala ispod neke granične vrijednosti. Ekspander se može koristiti na dva načina. Prvi način je proširenje, odnosno "ekspandiranje" dinamike signala. U tom slučaju ekspander smanjuje ojačanje signala ispod neke razine. Na taj način se povećava raspon između najviših i najnižih razina signala, odnosno povećava se dinamika signala. U drugom slučaju ekspander se koristi za podizanje razine tihih signala, ako njihova razina recimo padne ispod razine okolne buke, pa ih želimo pojačati da bi se čuli.

Shema ekspander je jednaka shemi kompresora i noise gate uređaja. Sustav nadzire razinu ulaznog signala, te kada ona padne ispod neke donje granice regulira pojačanje VCA sklopa, koji ona regulira pojačanje ulaznog signala, odnosno razinu izlaznog signala.

Karakteristike pojačanja ekspandera u oba slučaja dane su na slici 3.46.

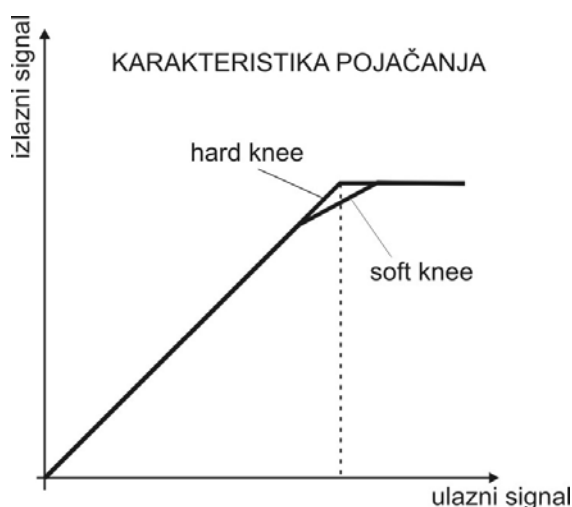


Slika 3.46 Karakteristike pojačanja ekspandera u dva slučaja.

Regulacija

Način na koji limiter, noise gate, kompresor i ekspander reagiraju na ulazni signal je dosta bitan, jer to utječe na kvalitetu reprodukcije. Zbog toga se kod ovih uređaja, osim graničnog napona i razine pojačanja, mogu regulirati još neki parametri koji upravo određuju način prijelaza iz jednog područja pojačanja u drugo te brzinu reakcije na promjenu ulaznog signala.

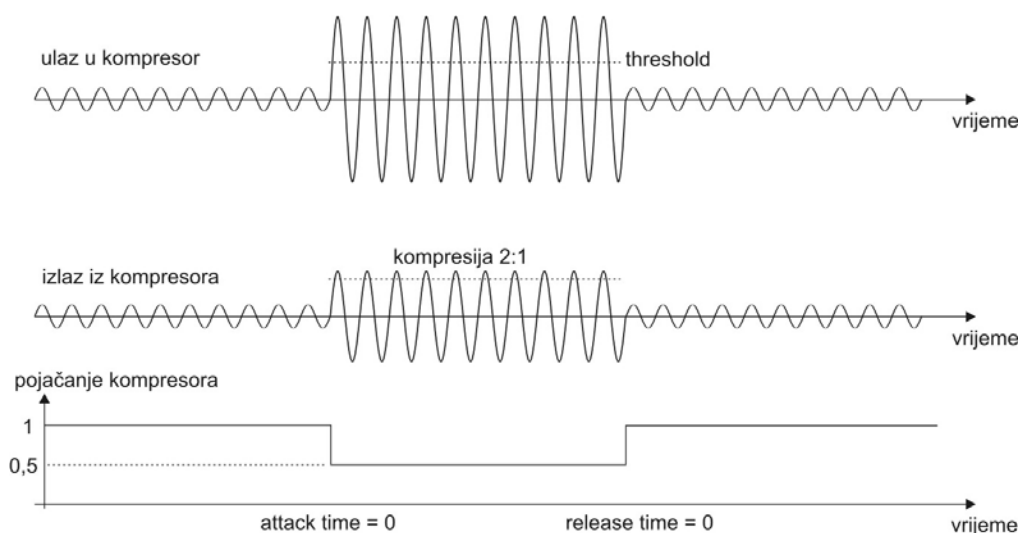
Prvi parametar je način prijelaza iz jednog područja pojačanja u drugo. Taj prijelaz može biti oštar, ali može biti i blag. Prema tome se ti prijelazi nazivaju *hard knee* i *soft knee*, što u doslovnom prijevodu znači tvrdo koljeno i mekano koljeno. Razlika između ova dva parametra je prikazana na slici 3.47. Ako je prijelaz iz jednog područja u drugo nagli (*hard knee*) publika će to čuti kao neugodan signal, a ako je taj prijelaz blag (*soft knee*), publika taj prijelaz možda neće niti zamijetiti. S druge strane, ako je taj prijelaz prespor, možda limiter neće moći izvršiti svoju funkciju.



Slika 3.47 Razlika između tvrdog i mekog prijelaza.

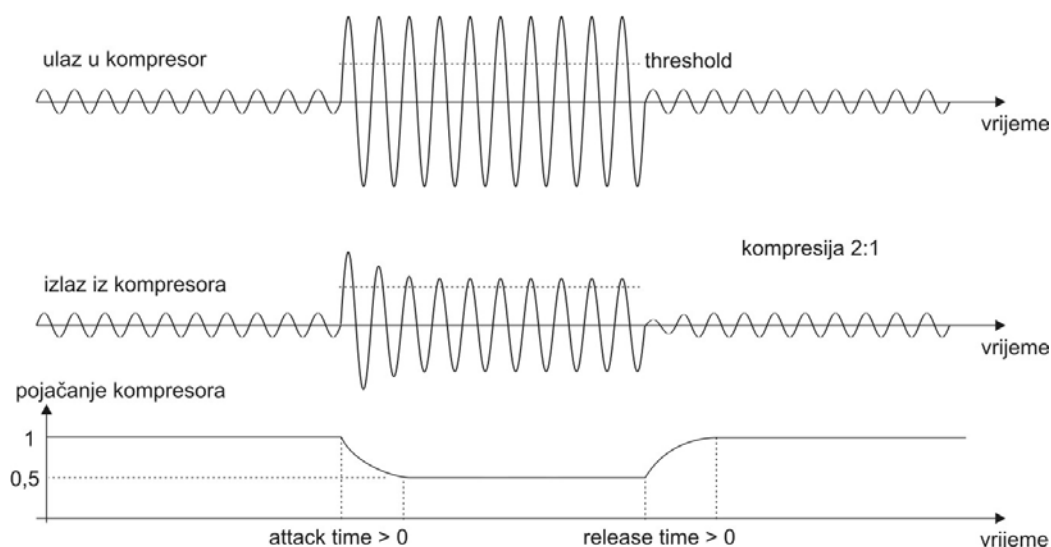
Kod noise gate uređaja, kompresora i ekspandera u igri je drugi parametar, a to je brzina reakcije na promjenu ulaznog signala. Na početku reakcije ovih uređaja to vrijeme se naziva vrijeme reakcije – *attack time*, a na kraju prestanka djelovanja uređaja, vrijeme otpuštanja – *release time*. Kao i kod limitera nije svejedno kakvo će biti vrijeme reakcije odnosno vrijeme otpuštanja, jer to dosta utječe na kvalitetu reprodukcije. Uz pametnu uporabu ova dva parametra, kvaliteta reprodukcije se može značajno povećati.

Na slici 3.48 dan je primjer rada kompresora za slučaj kada su oba ova vremena jednaka nuli. U tom slučaju su vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja trenutni. Prijelaz iz jednog pojačanja u drugo je jako brz. Kada je razina ulaznog signala ispod granične razine, pojačanje sklopa je 1. Kada ulazni signal prijeđe graničnu razinu (*threshold*), kompresor reagira i pojačanje sklopa smanjuje na 0,5, tako da je i razina izlaznog signala manje od razine kada bi pojačanje bilo 1. Na primjer u početku je razina ulaznog signala 0,1 V, a granična razina je postavljena na 0,2 V. U tom slučaju je pojačanje 1 i izlazni signal će biti također 0,1 V. Kada razina ulaznog signala poraste na 0,4 V, prešao je graničnu razinu i pojačanje pada na 0,5, tako da će razina izlaznog signala sada biti 0,2 V. Kada razina ulaznog signala opet padne ispod granične razine od 0,2 V, pojačanje se vraća na 1.



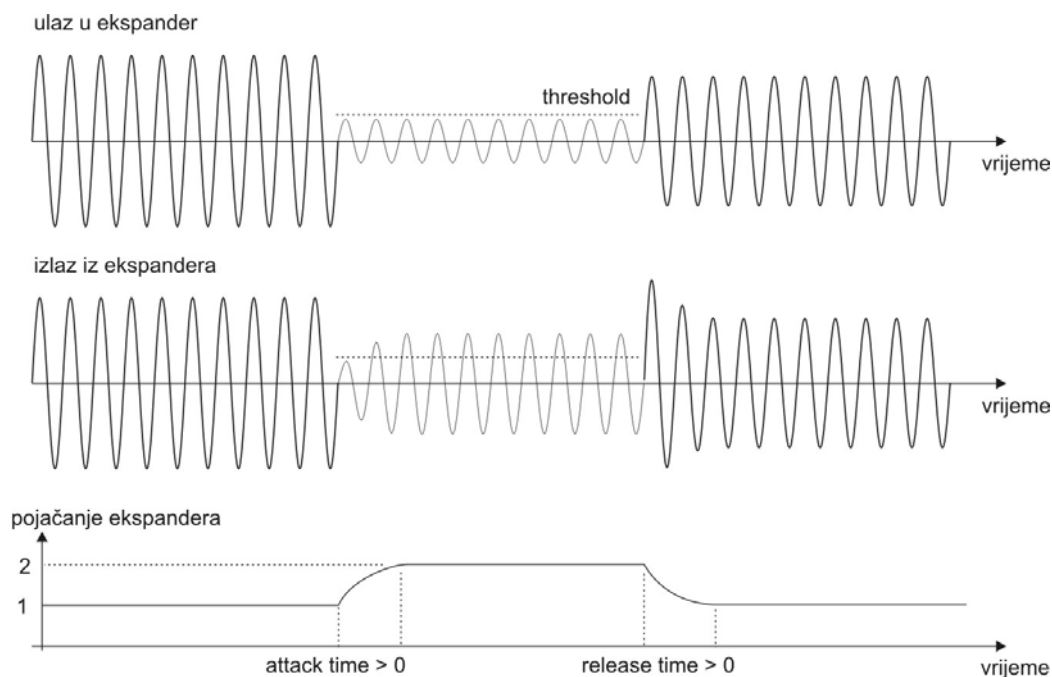
Slika 3.48 Rad kompresora kada su attack i release time = 0.

Na slici 3.49 dan je primjer rada kompresora kada su attack i release time veći od nula. U tom slučaju reakcija nije trenutna, nego postoji neko prijelazno vrijeme promjene s jednog pojaćanja na drugo. Dakle, prijelaz s pojaćanja 1 na pojaćanje 0,5 je blago, kao i povratak na pojaćanje sklopa 1. To utjeće i na oblik izlaznog signala u okolini toćaka prijelaza. Tako će izlazni signal, zbog blage promjene pojaćanja, u početku biti viši nego što je u trenutku kada se pojaćanje stabilizira na vrijednosti 0,5. S druge strane, u trenutku prestanka djelovanja kompresora, izlazni signal će neko vrijeme biti niži nego kada se pojaćanje stabilizira na vrijednosti 1.



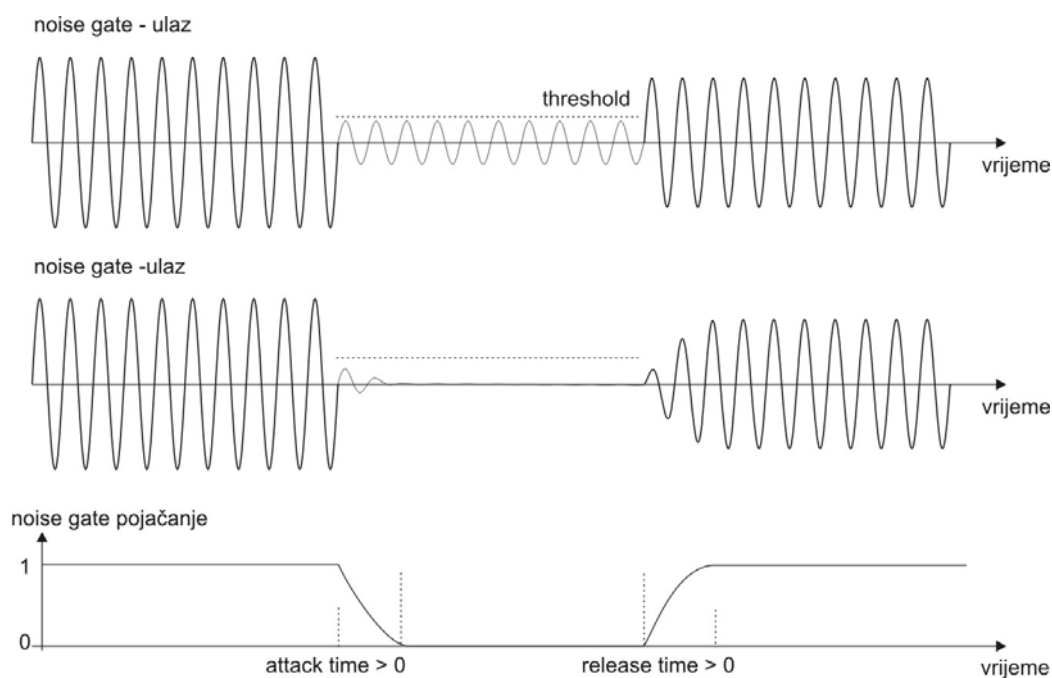
Slika 3.49 Rad kompresora kada su attack i release time veći od 0.

Jednaka analiza se može primijeniti na ekspander, noise gate i limiter. Na slici 3.50 prikazan je primjer rada ekspander, kada radi kao sklop koji pojaćava tihe signale, odnosno signale koji padnu ispod neke granićne razine (*threshold*). Ako je ulazni signal 0,4 V, pojaćanje ekspandera je 1 i izlazni signal je takoder 0,4 V. recimo da je granićni napon postavljen na 0,2 V. Ako ulazni signal padne na razinu 0,15 V, tada je ispod granićnog napona i pojaćanje sklopa se mijenja na 2, te će razina izlaznog napona u tom slućaju porasti na 0,3 V. Kada ulazni napon ponovo poraste iznad 0,2 V, pojaćanje sklopa se vraća na razinu 1.



Slika 3.50 Primjer rada ekspander kada su attack i release time > 0 .

Slika 3.51 prikazuje primjer rada noise gate uređaja kada su attack i release time veći od nula. Na primjer, neka je granična razina postavljena na 0,1 V. Kada je ulazni signal 0,2 V, pojaćanje sklopa je 1, te je razina izlaznog signala također 0,2 V. Kada ulazni signal padne na 0,08 V, pojaćanje sklopa je 0, pa će razina izlaznog signala biti 0 V. Kada se razina ulaznog signala ponovo podigne iznad graničnog napona na 0,2 V, pojaćanje će opet biti 1 i razina izlaznog signala će biti 0,2 V.

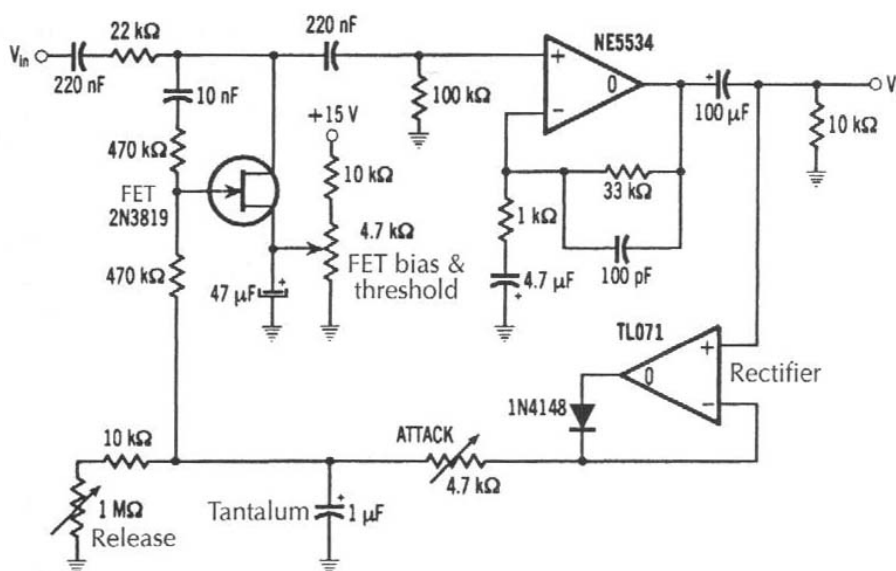


Slika 3.51 Primjer rada noise gate uređaja kada su attack i release time > 0 .

Kod namještanja attack i release vremena mora se biti jako oprezan, jer treba uzeti u obzir da će kod dužih vremena, pojačanje utjecati na signale koji će kasnije ući u sklop od signala na osnovi čije razine se regulira pojačanje. U nekim slučajevima je to korisno, jer se na taj način može utjecati na neke note koje su inače tiše ili glasnije, te se time može utjecati na kvalitetu reprodukcije.

Također treba biti opreza kod odabira razine kompresije. Prevelika kompresija utječe i an razinu šuma kod tihih dionica, odnosno pauza. Velike promjene uzrokuju takozvani "breathing" efekt. To se može riješiti povećanjem vremena otpuštanja, ali s druge strane preveliki vrijeme otpuštanja uzrokuje da će se niski signali u nekim trenucima izgubiti, što je takozvani "pumping" efekt.

Na slici 3.52 dana je jedna izvedba limitera, koja se sastoji od ispravljača signala (*rectifier*), koji detektira razinu signala, te FET-a koji služi kao VCA sklop. Attack i release vremena se mogu regulirati pomoću potencijometara iza ispravljača signala. Kada signal iz ispravljača poraste, poraste i regulacijski napon na ulazu FET-a, te struja kroz njegov izlazni dio poraste, te "krade" struju ulaznom signalu i na taj način ga smanjuje, a time se smanjuje i izlazni signal.



Slika 3.52 Shema limitera.

Većina profesionalnih uređaja ima mogućnost regulacije kompresije po određenim frekvenzijskim područjima. Takva kompresija koja je ograničena na određene frekvencije signala se naziva multiband kompresija. Pomoću nje možemo namjestiti različitu razinu kompresije i ostale parametre za različita frekvenzijska područja. To u praksi znači da svaki instrument ili glas mogu imati drugačiju razinu kompresije. To nam omogućava više fleksibilnosti u radu, a postiže se i veća kvaliteta zvuka.

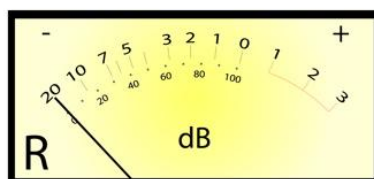
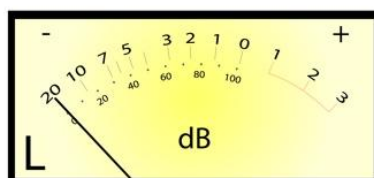
Primjer multiband kompresije je takozvani "de-eser" uređaj. Poznato je da neki suglasnici koji u sebi imaju slova "s" i "t", imaju dosta veliki udio visokih frekvencija, koje su izraženije od ostalih. Taj zvuk je u nekim slučajevima dosta neugodan, pa ga na neki način treba smanjiti. U tom slučaju se koristi kompresija signala u frekvencijskom području 3-6 kHz.

Mjerači signala

Kako bi točno znali o kakvim se razinama radi, ne možemo se do kraja osloniti na naš sluh. Sluh je relativan pojam i dosta se mijenja od osobe do osobe. Zbog toga je potrebno rabiti određene mjerne uređaje, odnosno pokazivače koji će nam pokazati kakva je razina signala. U tu svrhu se najčešće rabe dvije vrste pokazivača: VU metri i PPM (peak) metri.

VU metar je instrument, pokazivač koji mjeri efektivnu razinu signala. Njegovo vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja su relativno visoki i kreću se oko 300 ms. Zbog toga ovaj uređaj teško može pratiti promjene brzih, tranzijentnih signala. S druge strane efektivna razina dobro odgovara osjećaju glasnoće koji mi čujemo.

PPM (peak) metar je instrument koji mjeri vršne vrijednosti signala. To mu je omogućeno jer ima kratko vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja. On nam omogućuje detekciju maksimalnih razina signala, tako da možemo odrediti koje su nam gornje granice.



Slika 3.53 VU metar



Slika 3.54 PPM (Peak Program Meter) metar.