

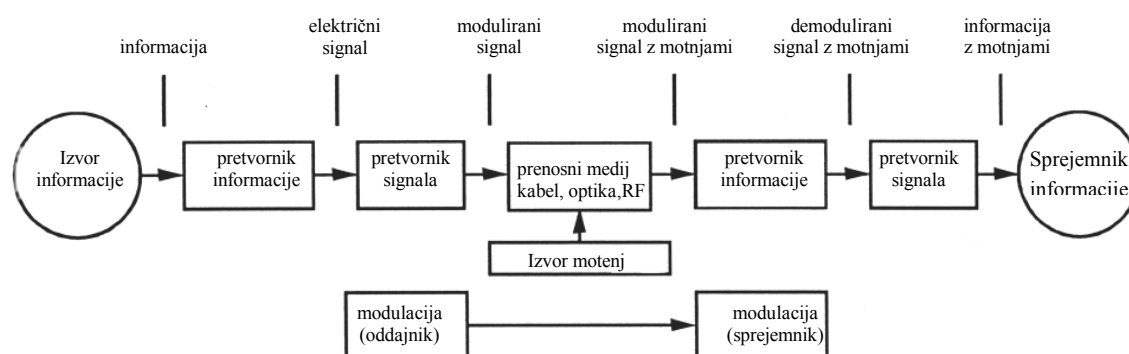
8 MODULACIJSKE TEHNIKE

8.1 SPLOŠNO O MODULACIJAH

Modulacija je postopek, ki omogoča zapis koristnega signala na nosilni signal. Za nosilni signal je značilno, da ima neko specifično lastnost (npr. sposobnost širjenja elektromagnetnih valov v okolico, prenos videosignala na trak v videorekorderju -FM), ki omogoča, da ga je možno prenašati po ustreznih prenosnih poteh (elektromagnetno valovanje, infrardeča svetloba, ultrazvok, mikrovalovne zveze, optični prenos,...). Različne vrste modulacij omogočajo različne načine prenosa informacijskega signala, kar je odvisno od vrste in zahtevnosti informacijskega signala, razdalje, hitrosti prenosa, prisotnosti motenj, kvalitete prenosa in drugih dejavnikov. Informacijski (koristni) signal je lahko analogen, digitalen ali pa kombinacija obeh. Moduliranim signalom se tekom prenosa pridružijo še motnje, ki znižujejo kvaliteto prenesenega signala in otežujejo postopek demodulacije oz. rekonstrukcije. Digitalne modulacije imajo v primerjavi z analognimi bistveno prednost, saj je možno signal med samim prenosom večkrat ojačiti ali rekonstruirati, ter ga prenesti do sprejemnika brez napake oz. vpliva motenj. Modulator modulira koristni signal (informacijski signal) na signal nosilne frekvence, ki je lahko sinusne ali impulzne oblike. Na izhodu modulatorja nastane kot modulacijski produkt novi signal, ki poleg informacije vsebuje še specifične lastnosti. Po uspešnem prenosu je potrebno signal ponovno pretvoriti v prvotno obliko z demodulatorjem.

Postopka modulacije in demodulacije sta vmesna člena pri prenosu informacijskega signala od izvora do sprejemnika.

Blokovna shema prenosa informacijskega signala



Blokovna shema prenosa informacijskega signala

Splošni pojmi:

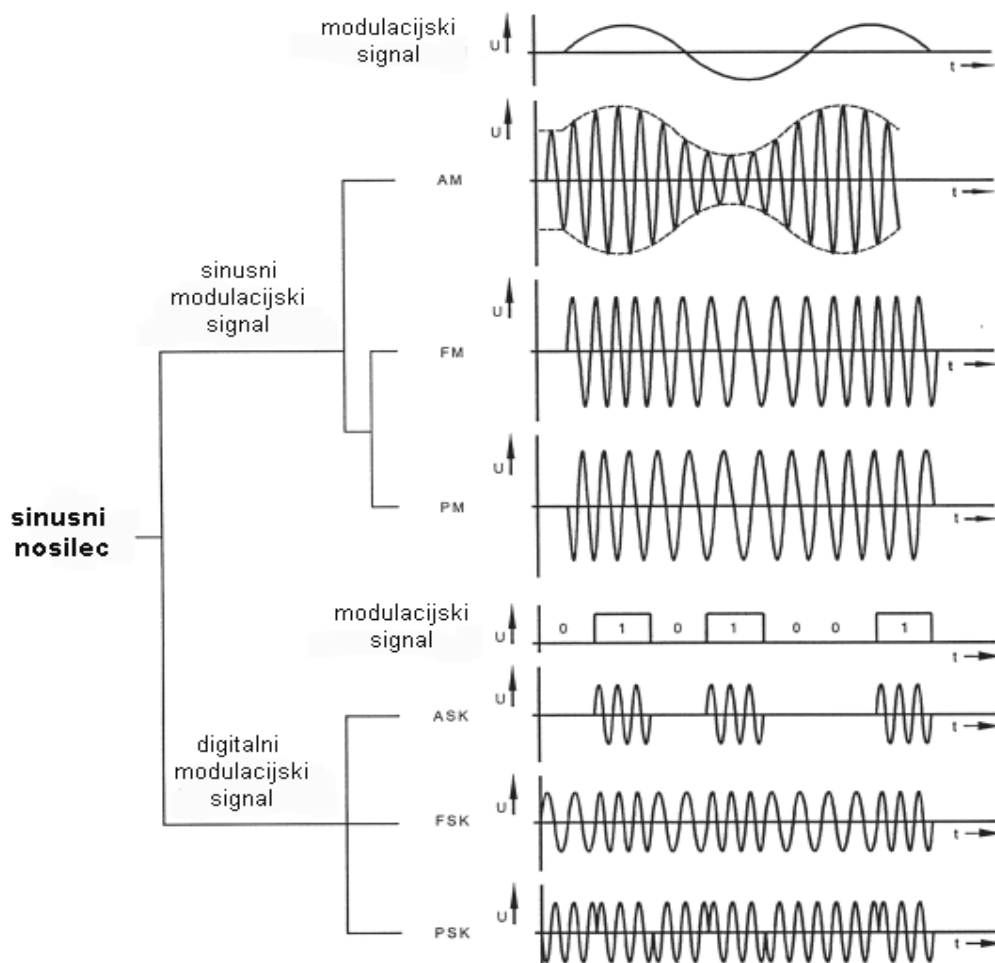
- **Sporočilo ali informacija:** vsaka oblika sporočila katerega želimo pošiljati (npr. govor, slike, podatki, text, izmerjene vrednosti,...)
- **Pretvornik informacije:** pretvarja katerokoli fizikalno veličino izvora električni Signal (npr. mikrofona, merilni pretvornik,...)
- **Pretvornik signala(modulacija)** Če signala iz pretvornika ni mogoče pošiljati direktno kot je npr. možno pri hišni govorni napravi, je potreben postopek modulacije. V splošnem velja, da je potrebno sporočilo pretvoriti v obliko, ki je primerna za prenos naprej (npr. radijske signale je možno oddajati samo, če jih pretvorimo na višje frekvence, v telefoniji je možna večkratna uporaba prenosnega medija s pomočjo modulacije).

- **Modulirani signal** Pri modulaciji se pretvorniku signala eden od parametrov nosilnega signala (npr. frekvenca, amplituda, faza,..) spreminja glede na modulacijski signal.
- **Prenosni kanal ali linija** Vsak prenosni medij (npr. kabel, brezžični prenos, optični vodnik, ..) s karakterističnimi značilnostmi (npr. slabljenje, pasovna širina, itd..).
- **Izvor motenj** Vsak izvor, k lahko v katerikoli točki vzdolž prenosne poti dodaja-povzroča moteče signale kot so npr. šum, prasketanje, stikalne motnje, inducirane napetosti, itd..
- **Pretvornik signala** Sprejemnik, ki rekonstruira originalni (modulirajoči) signal skupaj z motnjami.
- **Sprejemnik informacije** Vsak uporabnik sporočila kot npr. uho, oko, regulator, merilna naprava, ...

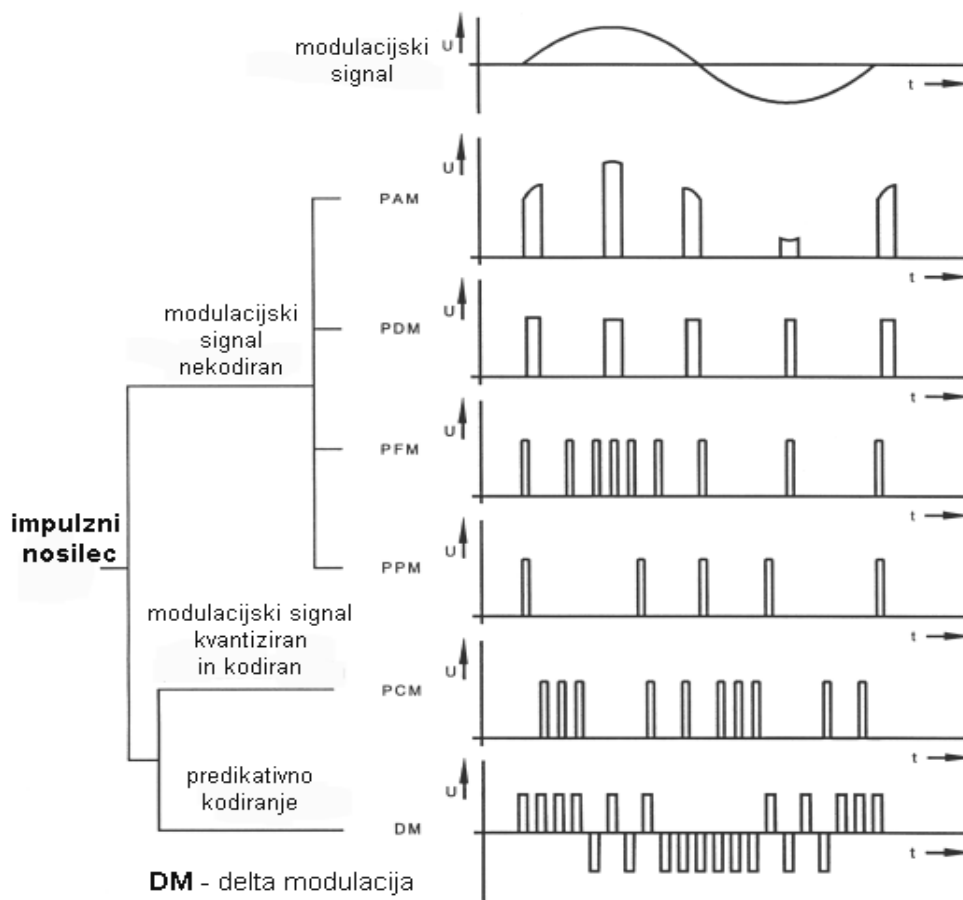
8.2 RAZVRSTITEV MODULACIJ

Pri modulacijah lahko vplivamo na spreminjanje različnih lastnosti nosilnega signala (sinusni ali impulzni), kar ima za posledico številne vrste modulacij. Te imajo kot rezultat modulirane signale z različnimi lastnostmi. Pri sinusnem nosilcu lahko vplivamo na frekvenco, amplitudo in fazo pri impulznem pa na amplitudo, fazo, frekvenco, širino, polariteto in kodo. V grobem lahko modulacije razdelimo na tiste s sinusnim nosilcem in tiste z impulznim nosilcem.

Modulacije na osnovi sinusnega nosilnega signala



Modulacije na osnovi impulznega nosilnega signala



8.3 MODULACIJE NA OSNOVI SINUSNEGA NOSILNEGA SIGNALA

Pri teh modulacijah lahko modulirajoči signal nosilcu spreminja amplitudo (**AM**), frekvenco (**FM**) in fazo (**PM**). Modulacijske postopke je možno na istem signalu vršiti večkrat in tudi kombinirano (npr. moduliranje stereo signala).

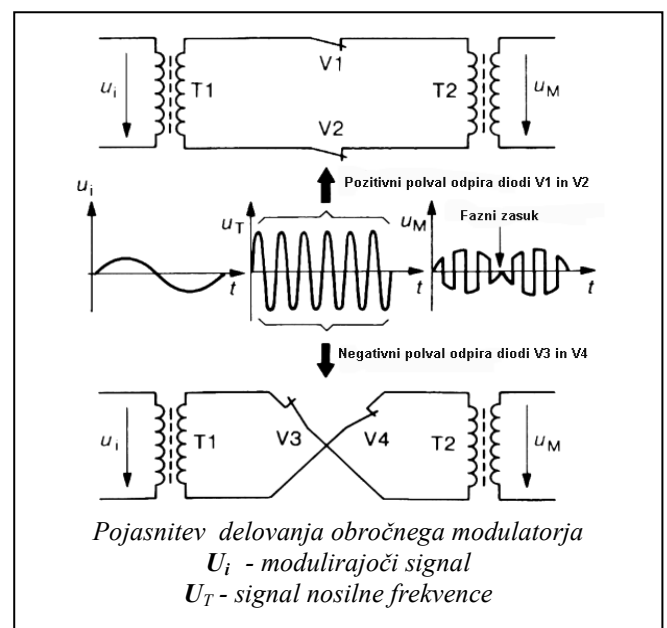
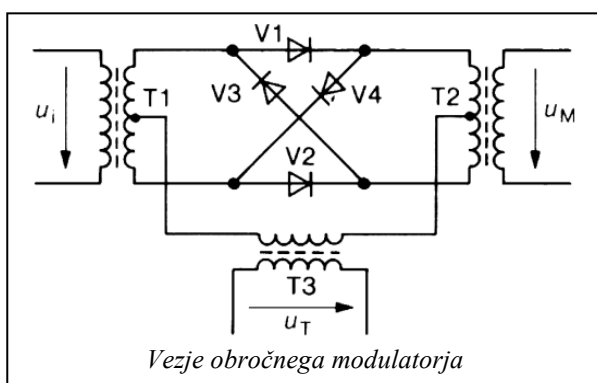
V splošnem lahko zapišemo izraz: $U = U_v \cdot \cos(2\pi f_v t + \varphi)$ podlagi katerega pri modulaciji lahko vplivamo na:

$U_v \rightarrow$ dobimo amplitudno modulacijo **AM**

$f_v \rightarrow$ dobimo frekvenčno modulacijo **FM**

$\varphi \rightarrow$ dobimo fazno modulacijo **PM**

Obročni modulator



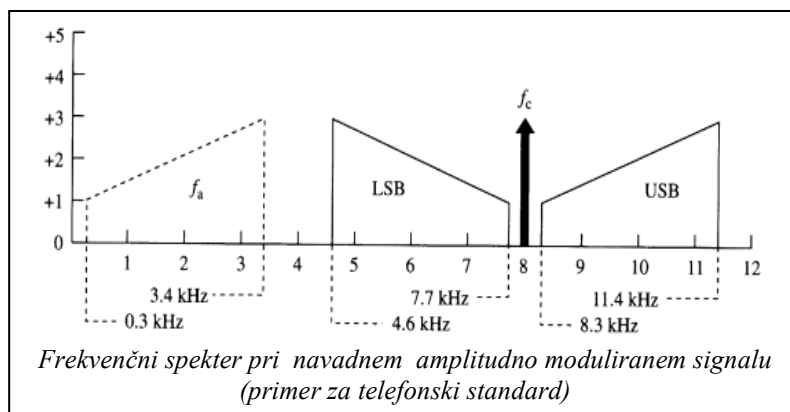
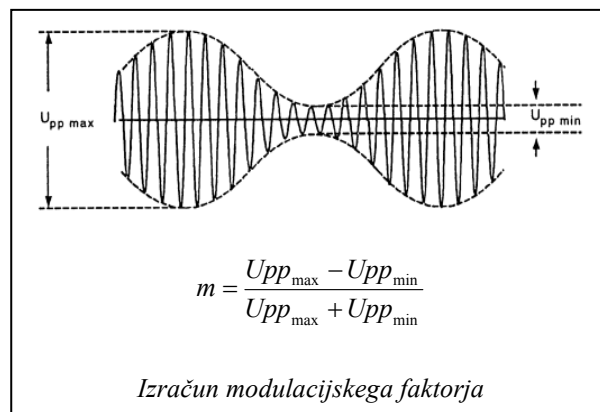
8.3.1 AMPLITUDNE MODULACIJE

8.3.1.1 Navadna AM modulacija

Amplitudno modulacijo lahko realiziramo z obročnim modulatorjem, pri čemer je na enem vходу signal nosilne frekvence in na drugem vходу modilirajoči signal, kateremu je pripeta še enosmerna komponenta. Od amplitude nosilne frekvence oz. amplitude modilirajočega signala je odvisna velikost modulacijskega faktorja m . Spektralni diagram navadne amplitudne modulacije vsebuje nosilno frekvenco in oba bočna pasova (LSB, USB).

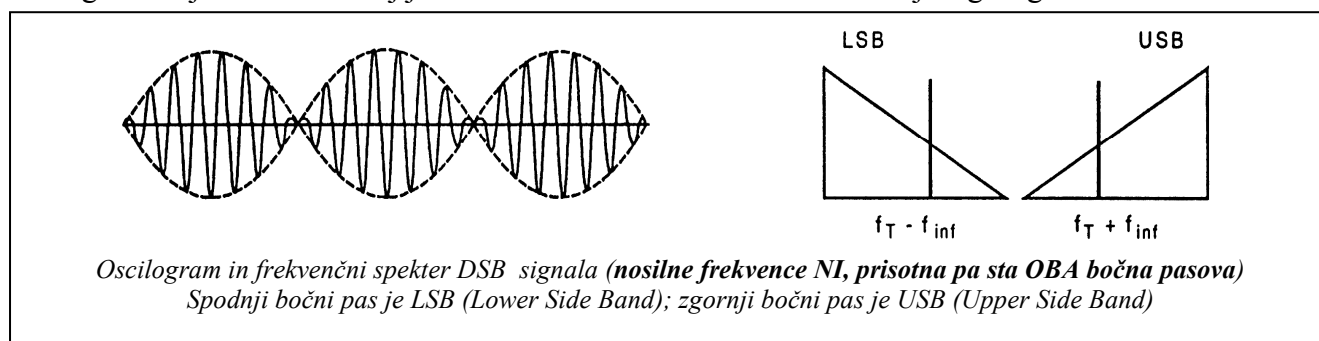
Matematični zapis za navadno AM je:

$$u_m = [f_n(t) + U_c] \sin n\omega t$$



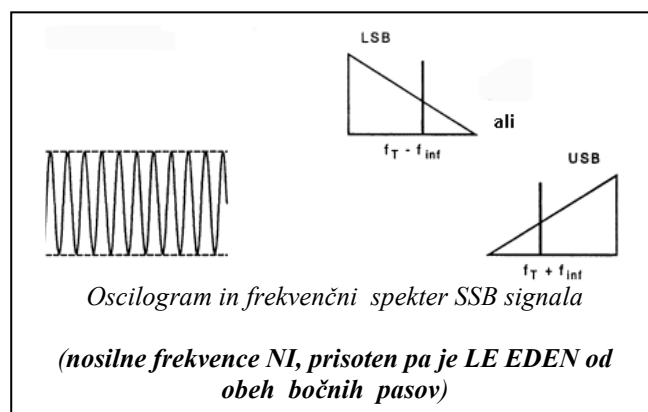
8.3.1.2 DSB- dvobočna AM

Dvobočna AM modulacija nastane, če pri AM modulaciji odstranimo enosmerno komponento v modilirajočem signalu. V tem primeru v signalu na izhodu modulatorja ni nosilne frekvence, kar omogoča boljši izkoristek saj je moč odvisna le od velikosti modilirajočega signala.



8.3.1.3 SSB- enobočna AM

Če DSB signalu odstranimo en bočni pas nastane SSB (Single Side Band) signal za katerega je poleg zelo dobrega izkoristka značilna še ozka pasovna širina, ki je potrebna za prenosni kanal. Slabo stran predstavlja zahtevnejši demodulator. Demodulator je koherentni saj potrebuje poleg diodnega usmernika z filtrom še interni oscilator za nosilno frekvenco in seštevalnik signala.



8.3.2 KOTNE MODULACIJE

8.3.2.1 Frekvenčna modulacija

Pri frekvenčni modulaciji (FM) se spreminja frekvenca nosilnega signala v odvisnosti od trenutne napetosti modulirajočega signala. V primeru digitalnega modulirajočega signala zavzema frekvenca FM signala na izhodu samo dve vrednosti-FSK. Nosilna frekvenca je v nekaterih primerih lahko tudi impulzne oblike-PFM. Bistvena prednost FM modulacije je **v neobčutljivosti na motnje**, slabost pa predstavljajo **številne harmonske komponente** v FM signalu, kar zahteva večjo pasovno širino.

Za trenutno vrednost FM signala lahko zapišemo matematičen izraz: $u_v = U_v \sin(\omega_c t + m \sin \omega_n t)$ pri čemer predstavlja U_v –amplitudo nosilnega signala, $\omega_v = 2\pi f_v$, $\omega_n = 2\pi f_n$ in m - **indeks modulacije**.

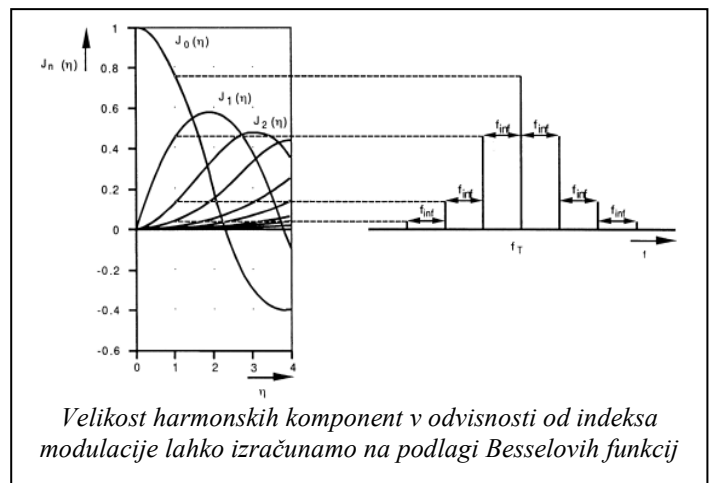
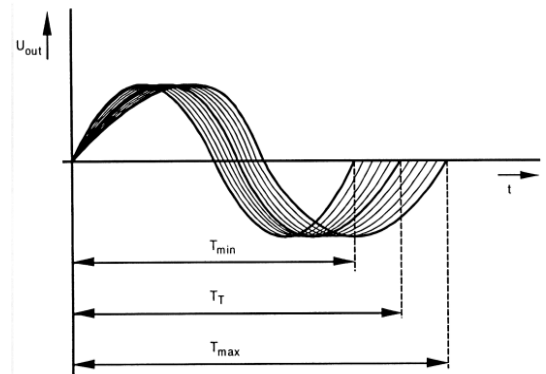
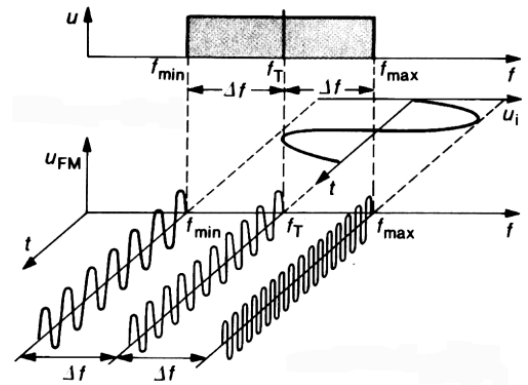
Frekvenčna deviacija je razlika med nosilno in najvišjo oz. najnižjo frekvenco v FM signalu in je **odvisna od amplitude modulirajočega signala**. Izračunamo jo po obrazcu:

$$\Delta f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}$$

Indeks modulacije je:

$$m = \frac{\Delta f}{f_n}$$

Višina amplitude in število harmonskih komponent, ki so prisotne je **odvisna od indeksa modulacije in frekvenčnega spektra modulirajočega signala**. Izračunamo jih preko Besselovih funkcij n -tega reda in m -tega argumenta.



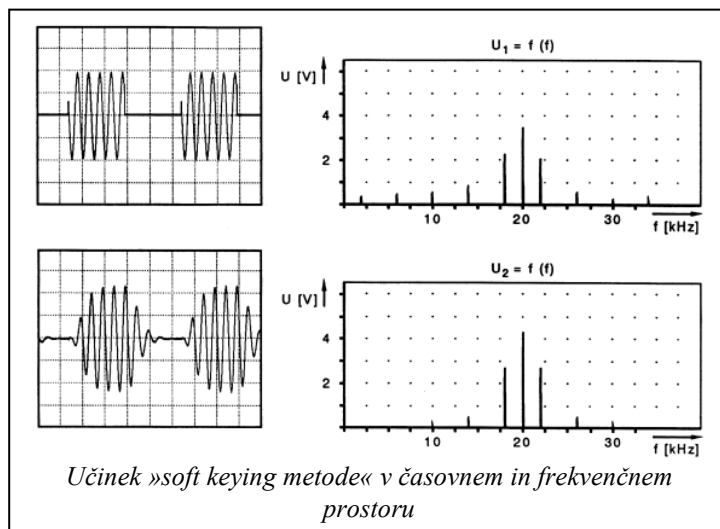
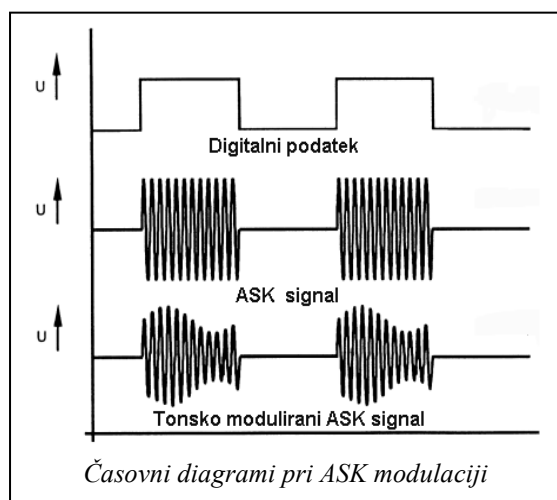
8.3.2.2 Fazna modulacija

Fazna modulacija je v bistvu frekvenčna modulacija pri kateri je **frekvenčna deviacija odvisna od trenutne napetosti in od trenutne frekvence** modulirajočega signala. Modulator je v bistvu FM modulator z na vходу dodanim CR vezjem, ki višje frekvence bolj prepušča, nižje pa manj. Na ta način dobimo visoke frekvence modulirane močnejše, nižje pa manj (*preemphasis*), kar je zaželeno npr. pri postopkih zniževanja šuma v signalu.

8.3.3 MODULACIJE Z DIGITALNIM SIGNALOM

8.3.3.1 ASK modulacija

Pri ASK modulaciji se signal nosilne frekvence amplitudno modulira v odvisnosti od bitov v podatku. Glede na to, da se amplituda skokoma spreminja, vsebuje modulirani signal velik spekter harmonskih komponent. V smislu zmanjšanja harmonskih komponent je v uporabi metoda s katero digitalni signal frekvenčno omejimo, da so prehodi stanj bolj zaobljeni. Na ta način ni več ostrega prehoda, in posledično se tudi v moduliranem signalu amplituda postopoma zvišuje oz. znižuje (*soft keying metoda*). ASK modulacija lahko vsebuje še dodatno amplitudno modulacijo z analognim signalom (*toned keying*).



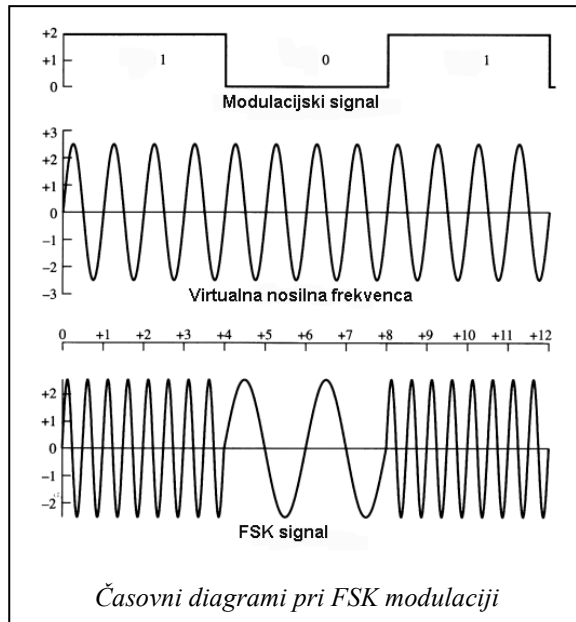
8.3.3.2 FSK modulacija

Slabost ASK modulacije je, da v enem od obeh stanj ni signala. To stanje lahko povzroči prekinitev na prenosni liniji. To slabost odpravlja FSK modulacija (2-FSK), pri kateri se dve nosilni frekvenci izmenjujeta med določenima vrednostima, ki pripadata logičnima nivojema (po CCITT velja 1300Hz za logično »1« in 2100Hz za logično »0«). Modulirani signal zahteva frekvenčno območje od 900Hz do 2500Hz. Povprečna vrednost obeh frekvenc je definirana kot navidezna-virtualna nosilna frekvenca f_T , poleg tega pa so podobno kot pri frekvenčni modulaciji definirani nekateri parametri značilni za FSK modulacijo:

$$f_T = \frac{f_0 + f_1}{2}$$

$$\Delta f = \frac{f_0 - f_1}{2}$$

$$\eta = 2 \cdot \frac{\Delta f}{2 \cdot f_s}$$



f_T - virtualna nosilna frekvenca;

η - modulacijski indeks;

f_0 - frekvenca za nivo »0«;

f_s – frekvenčni korak;

f_1 - frekvenca za nivo »1«

Δf -frekvenčna deviacija

Podobno kot pri ASK se uporablja tudi pri FSK modulaciji metoda »soft keying« za omejitev višjih harmonskih komponent.

8.3.3.3 PSK modulacije (Phase Shift Keying)

Metoda modulacije faznega premika sinusnega nosilnega signala omogoča različne izvedbe PSK modulacij. Med značilnejše spadajo:

- 2-fazna PSK modulacija.....(**2PSK**)
- 4-fazna PSK modulacija.....(**4PSK**)
- 8-fazna PSK modulacija.....(**8PSK**)
- 16-fazna PSK modulacija.....(**16PSK**)
- 16-fazna kvadratura modulacija...(**16QAM**)

Modulacija **16 QAM** je sestavljena iz amplitudne in fazne, vendar so fazne lastnosti bolj izrazite kot amplitudne. Modulacije **2 PSK**, **4 PSK**, **8 PSK** in **16 PSK** pripadajo modulatorjem tipa BPSK (*Binary Phase Shift Key*), modulacija QAM pa QPSK (*Qadrature Phase Shift Key*) modulatorjem.

Značilni pojmi pri PSK modulacijah

- **Simbol**- modulirana sprememba, ki pripada določeni bitni kombinaciji
- **Število simbolov v sekundi -S** (hitrost), ki jo zmore modulator je definirana kot:

$$S = \frac{D}{n} \text{ (simbolov/s)}$$

D.....podatkovna hitrost (b/s) ; **n**.....število bitov za simbol

- **Število različnih simbolov -M**, ki jih omogoča modulacija je podano z izrazom:

$$M = 2^n$$

- **Fazna razlika -P** med sosednjima simboloma je podana z izrazom:

$$P = \frac{360^\circ}{M} = \frac{2\pi}{M} \text{ (rad)}$$

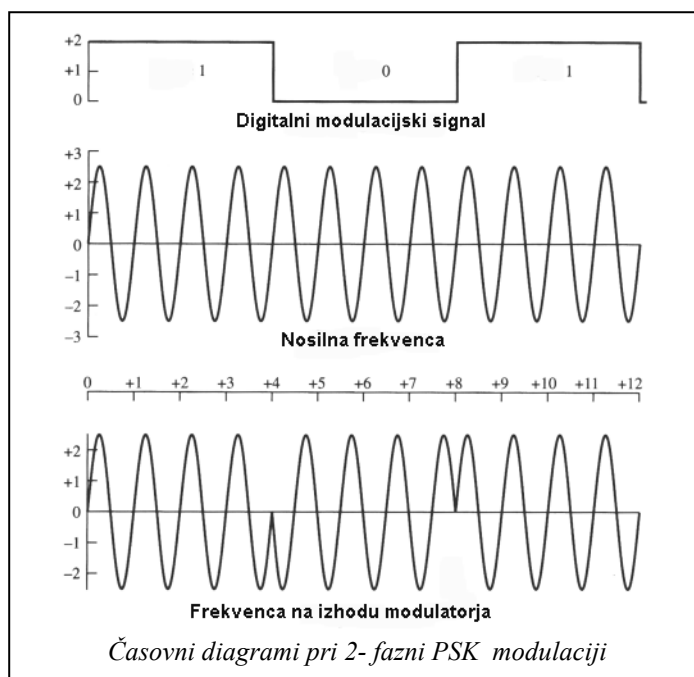
- **Največja hitrost vhodnih podatkov-C** (za modulator) je podana z izrazom:

$$C = B \log_2 M$$

B ...pasovna širina kanala

2 - fazna PSK modulacija

Ta modulacija temelji na faznem premiku 180° . Bit »1« ne obrača faze nosilca, bit »0« pa povzroči fazni premik za 180° . Za modulator je lahko uporabljen kar obročni modulator. Edina razlika med AM oz. ASK modulatorjem in 2PSK modulatorjem je, da je nosilna frekvenca zamenjana z digitalnim modulacijskim signalom. Digitalni modulacijski signal odpira ustrezen par diod, kar omogoča, da je sinusni nosilec enkrat v sofazi in drugič v protifazi.

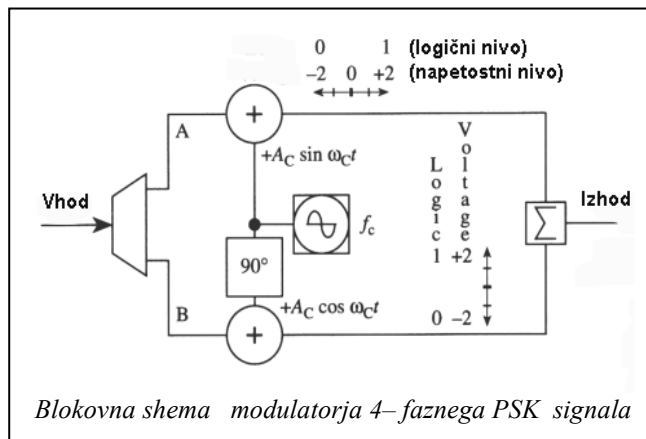
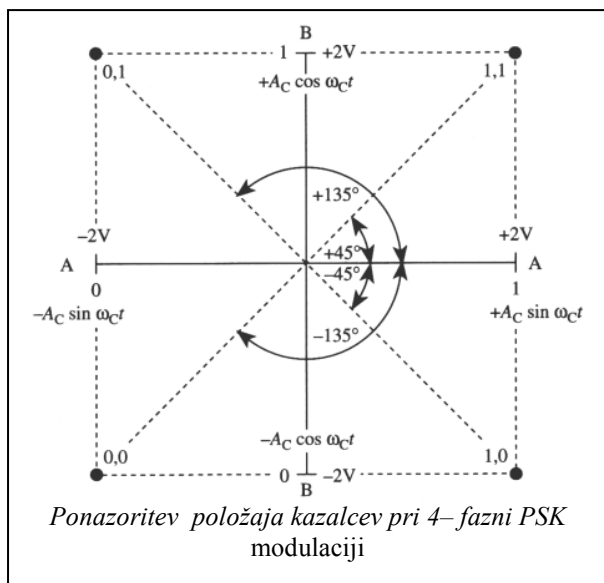


Glede na to, da se PSK modulacija pogosto uporablja za prenos po telefonskih linijah, katere imajo po standardu frekvenčno območje od 300Hz do 3400Hz, bomo v nadaljevanju računali hitrost prenosa za to pasovno širino (3100Hz).

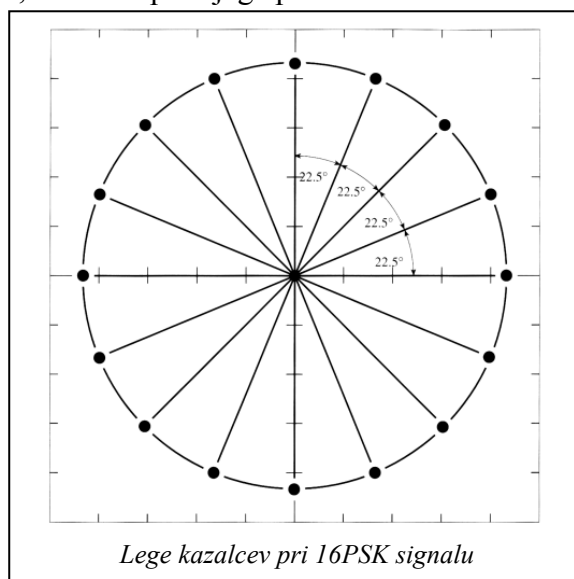
1. Vsak podatkovni bit vpliva na menjavo faze na 0° ali 180° , kar pomeni $n=1$ in $M=2$
2. Hitrost simbolov pri hitrosti podatkov 2400bit/s znaša $D/n = 2400$ simbolov/s
3. Fazni premik je $P=360^\circ/2=180^\circ$, kar pomeni samo dva vektorja v izhodnem signalu
4. Glede na pasovno širino $B=3100\text{Hz}$, lahko izračunamo največjo hitrost modulacije podatkov kar znaša $C=B \cdot \log_2 M = 3100 \cdot \log_2 2 = 3100\text{b/s}$. To pomeni, da bi višja hitrost podatkov na vходу povzročila napake pri moduliranju.

4 - fazna PSK modulacija

Pri 4PSK modulaciji sta dva bita vhodnega podatka modulirana istočasno s samo eno menjavo faze. Premik faze je po 90° , kar omogoča štiri simbole. Ker je izhodna hitrost sprememb nižja od vhodne, ta modulacija zahteva nižjo pasovno širino kot 2PSK. Na ta način je pri isti pasovni širini (3100Hz) dosežena dvakrat višja dovoljena hitrost podatkov, kar znaša 6200 b/s.



Slika prikazuje poenostavljeno vezje modulatorja, ki je sestavljen iz vhodnega delilnika ali multipleksorja, dveh obročnih modulatorjev in faznega obračalnika za 90° . Vsaka dva bita v podatkovnem signalu postavitava izhoda multipleksorja v ustrezen nivo, kar pomeni ustrezno obračanje faze. Zgornji modulator obrača signal nosilne frekvence za 0 oz. 180° , spodnji pa za 90° oz. 270° , kar je odvisno od stanja na vходу. Glede na to sta kazalca zgornjega modulatorja na X-osi, kazalca spodnjega pa na Y-osi.



16 - fazna PSK modulacija

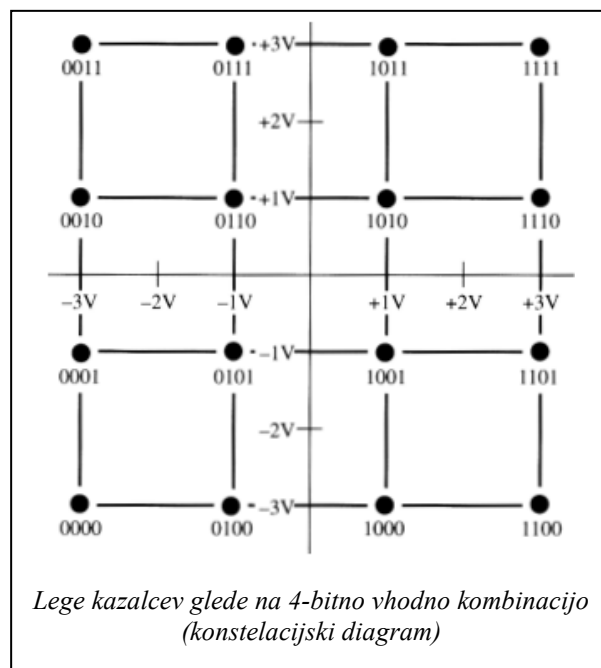
V tem primeru se modulirajo istočasno štirje biti, kar pomeni, da vsakemu simbolu pripadajo 4-biti. Glede na to, da je $n=4$ in $M=16$ znaša pri podatkovni hitrosti 2400b/s hitrost na izhodu $S=D/n = 600$ simbolov/s, kar je le četrina vhodne frekvence. Za isti primer pasovne širine 3100Hz lahko izračunamo največjo hitrost podatkov na vходу, ki v tem primeru znaša $C=3100 \cdot \log_2 16 = 12400\text{b/s}$. Med dvema sosednjima kombinacijama bitov znaša pri tej modulaciji fazni kot samo $22,5^\circ$. Slika prikazuje fazne razmere za vse možne kombinacije štirih bitov na vходу.

16 – fazna OAM (kvadratura modulacija)

Za kvadraturno modulacijo je značilno, da se lahko istočasno spreminjata faza in amplituda sinusnega nosilca. Bita A in C določata v katerem kvadrantu se bo kazalec nahajal, bita B in D pa določata pozicijo znotraj kvadranta. Bit A je MSB in bit D je LSB. Ta metoda je boljša kot 16PSK modulacija.

Modulator

Vezje modulatorja se sestoji iz štirih enakih obročnih modulatorjev. Nosilna frekvenca spodnjih dveh je premaknjena za 90° . Modulatorja zgoraj skupaj določata komponento po X-osi, modulatorja spodaj pa skupaj komponento po Y-osi. Glede na predznak se deleža enkrat seštevata (npr. +3V), drugič pa odštevata (npr. +1V). Horizontalna vsota in vertikalna vsota komponent določata smer vektorja in velikost nosilne frekvence.



8.4 DIGITALNE MODULACIJE

8.4.1 PAM in PCM MODULACIJA

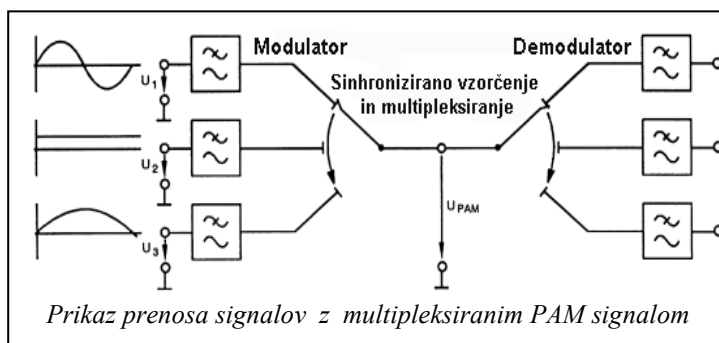
Metoda pretvarjanje analognega signala v digitalno obliko je še posebno pomembna pri večkanalnem prenosu v telefonskem sistemu. Glede na to se bomo omejili na Evropski standard za katerega je značilen frekvenčni pas prenosa od 300Hz do 3400Hz (pasovna širina 3100Hz).

Za pretvorbo analognega signala v digitalno obliko je potreben postopek vzorčenja (kvantiziranje), ki omogoča A/D pretvorniku začasno nespremenljivo napetost. Frekvenca vzorčenja je odvisna od frekvence najvišje harmonske komponente za katero še želimo, da bo zastopana digitalnem podatku. Večinoma velja, da je pretvorba dovolj dobra, če je frekvenca vzorčenja vsaj dvakrat višja od te frekvence v signalu (Shanonov teorem). Glede na določen frekvenčni pas npr. v telefoniji ($f_{\max} = 3,4\text{kHz}$) bo izračunana frekvenca vzorčenja 6,8 kHz, vendar je po CCITT priporočilih izbrana frekvenca 8kHz.

Pri večkanalnem **PCM (Pulse Coded Modulation)** prenosu se poslužujemo časovnega multipleksiranja signalov (**TDM-Time Division Multiplex**) pri čemer je še vedno potrebno upoštevati kriterij vzorčenja, katerega frekvenca mora biti zaradi multiplexa višja. Rezultat multipleksiranja je **multipleksirani PAM** signal, ki vsebuje kratkotrajne spremembe vseh zastopanih signalov.

PAM signal zaradi spreminjajoče se amplitude v času impulza ni primeren za A/D pretvorbo, zato je potreben še postopek vzorčenja, ki se mora izvajati sinhrono z multipleksiranjem.

Po postopku vzorčenja (**SH-Sample & Hold**) dobimo signal stopničaste oblike (**S/H signal**), katerega pa lahko A/D pretvornik sinhrono pretvarja. Po A/D pretvorbi je potrebno podatek večinoma pretvoriti v serijsko obliko in ga opremiti s sinhronizacijskim in drugimi kontrolnimi impulzi. Podatkovni biti za posamezen signal so grupirani v skupine (npr. po 8-bitov.), ki si sledijo ena za drugo in tvorijo okvir-*frame*. Glede na Evropski standard vsebuje okvir-*frame* 30 govornih in dva pomožna kanala. *Frami* so lahko grupirani naprej v *Multiframe* (slika na naslednji strani).

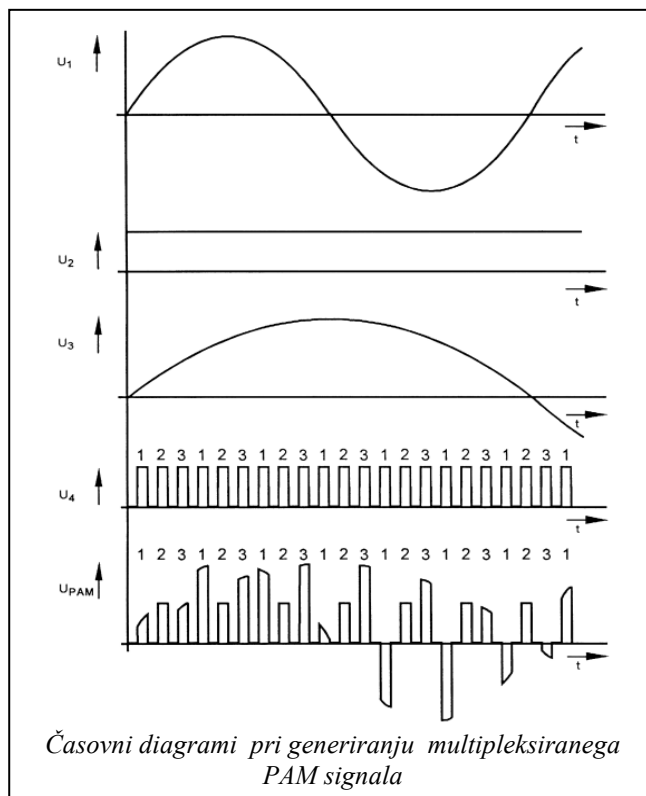


8.4.2 PDM, PFM in PPM MODULACIJE

Pulznoširinska (PDM, PWM) modulacija se uporablja najpogosteje za krmilni signal tranzistorjev pri stikalnih napajalnikih, regulatorjih moči pri enosmernih motorjih, pri daljinskem krmiljenju (radijsko vodenje). Glede na to jo bomo obravnavali v poglavju močnostne elektronike.

Za pulznofrekvenčno (PFM) modulacijo je značilno, da trajanje impulza ni odvisno od frekvence zato je integral napetostnih impulzov linearna funkcija. Zaradi tega to modulacijo pogosto srečamo v »taho« generatorjih, inkrementalnih dajalnikih, frekvenčnih demodulatorjih, analognih merilnikih vrtljajev in podobnih napravah.

Pri pulzno pozicijski (PPM) modulaciji se frekvenca normalno ne spreminja. V odvisnosti od vhodnega signala se spreminja lega impulza glede na položaj pri nosilni frekvenci. Obraten postopek se dogaja npr. pri faznem primerjalniku v PLL vezju.



Primer za evropski standard PCM prenosa

