

Ranko Vojinović ▪ Vladica Avramović

# ELEKTRONSKE KOMUNIKACIJE 2

udžbenik za drugi razred srednje stručne škole

Obrazovni program: Elektrotehničar  
elektronskih komunikacija



Zavod za udžbenike i nastavna sredstva  
PODGORICA, 2024.

# ELEKTRONSKE KOMUNIKACIJE

udžbenik za drugi razred srednje stručne škole

Izdavač: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica

Za izdavača: mr Aleksandra Hajduković, direktorica

Glavni urednik: mr Radule Novović

Odgovorni urednik: Lazo Leković

Urednica izdanja: Ivana Popović

Recenzenti:  
dr Maja Delibašić  
mr Branislav Čalasan  
Radovan Božović  
Dubravka Delić  
Vesna Četković

Lektura: Dragan Batrićević

Korektura: Jasmina Radunović

Fotografije: shutterstock.com

Grafička obrada: Nikola Knežević

Tehnička urednica: Dajana Vukčević

CIP – Каталогизација у публикацији  
Национална библиотека Црне Горе, Цетиње

ISBN 978-86-303-2470-3  
COBISS.CG-ID 28460548

Nacionalni savjet za obrazovanje, Rješenjem br. 05/3-01-011/24-533/10 od 12. 02. 2024. godine, odobrio je ovaj udžbenik za upotrebu u srednjim stručnim školama.

Copyright © Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica, 2024.

# Sadržaj

Predgovor .....	7
1. Amplitudska modulacija signala .....	8
1.1. Pojam modulacije signala .....	10
1.1.1. Analogne i impulsne modulacije .....	13
1.2. Amplitudska modulacija .....	16
1.2.1. KAM signal .....	16
1.2.2. AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO) .....	26
1.2.3. AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO) .....	28
1.2.4. AM signal sa nesimetričnim bočnim opsegom (AM-NBO) .....	28
1.3. Postupak dobijanja amplitudski moduliranih signala .....	30
1.3.1. KAM i AM-2BO modulator .....	30
1.3.2. AM-1BO modulator .....	31
1.3.3. AM modulator sa diodom .....	32
1.4. Demodulacija amplitudski moduliranih signala .....	34
1.4.1. Sinhrona demodulacija AM signala .....	35
1.4.2. Asinhrona demodulacija AM signala .....	36
1.4.2.1. Diodni detektor .....	36
1.5. Uticaj šuma na kvalitet prenosa amplitudski moduliranih signala .....	38
1.5.1. Odnos S/N pri prenosu KAM signala u postupku produktne demodulacije .....	39
1.5.2. Odnos S/N pri prenosu AM-2BO signala .....	41
1.5.3. Odnos S/N pri prenosu AM-1BO signala .....	41
1.5.4. Odnos S/N pri prenosu KAM signala u postupku detekcije anvelope .....	41
2. Ugaone modulacije .....	46
2.1. Vrste ugaonih modulacija .....	48
2.1.1. Frekvencijska modulacija (FM) .....	50
2.1.2. Fazna modulacija .....	53
2.1.3. Spektar ugaono moduliranih signala .....	53
2.2. Postupak dobijanja ugaono moduliranih signala .....	57
2.2.1. Veza između fazne i frekvencijske modulacije .....	57
2.2.2. Frekvencijski modulator .....	58
2.2.3. Fazni modulator .....	59
2.3. Demodulacija ugaono moduliranih signala .....	60
2.3.1. FM detektor .....	60
2.3.2. PM detektor .....	62
2.4. Uticaj šuma na prenos ugaono moduliranih signala .....	63

### 3. Impulsne modulacije ..... 70

3.1. Vrste impulsnih modulacija .....	72
3.1.1. Odabiranje signala .....	74
3.1.2. Generisanje i demodulacija impulsno modulisanih signala.....	80
3.1.2.1. Generisanje i demodulacija impulsno amplitudski modulisanih signala (IAM).....	80
3.1.2.2. Generisanje i demodulacija impulsno modulisanih signala po trajanju (ITM) .....	83
3.1.2.3. Generisanje i demodulacija impulsno položajnog modulisanog signala (IPM).....	87
3.2. Impulsna kodna modulacija .....	91
3.2.1. Pretvaranje analognog signala u digitalni.....	91
3.2.1.1. Kvantizacija.....	91
3.2.1.2. Kodiranje.....	95
3.2.2. Generisanje IKM signala.....	96
3.2.3. Demodulacija IKM signala .....	99
3.2.4. Blok-šema primopredajnog sistema za IKM.....	101
3.2.5. Veličine koji utiču na kvalitet prenosa .....	104

### 4. Prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti..... 110

4.1. Prenos signala u osnovnom opsegu učestanosti.....	112
4.2. Postupci kodiranja.....	115
4.3. Vrste kodova .....	116
4.3.1. Linijski kodovi .....	116
4.3.1.1. Unipolarni linijski kodovi.....	116
4.3.1.2. Polarni linijski kodovi.....	117
4.3.1.3. Diferencijalno kodiranje .....	118
4.3.1.4. Mančester kôd .....	119
4.3.1.5. Diferencijalni Mančester kod .....	119
4.3.1.6. Bipolarni linijski kodovi.....	120
4.3.1.7. M-arni digitalni signal .....	120
4.3.2. Zaštitni kodovi .....	121
4.4. Nikvistova i Šenonova teorema.....	124
4.5. Intersimbolska interferencija .....	126
4.5.1. Dijagram oka .....	127
4.5.2. Idealan sistem i način kako da se izbjegne intersimbolska interferencija .....	129
4.5.3. Transverzalni filter .....	134
4.5.4. Optimizacija sistema za prenos u osnovnom opsegu učestanosti.....	136

5. Prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem . . . . .	140
5.1. Digitalne modulacije . . . . .	142
5.2. Prenos digitalnog signala amplitudski modulisanim nosiocem . . . . .	144
5.2.1. Demodulacija ASK signala . . . . .	149
5.3. Prenos digitalnog signala frekvencijski modulisanim nosiocem . . . . .	150
5.4. Prenos digitalnog signala fazno modulisanim nosiocem . . . . .	154
5.4.1. BPSK signal . . . . .	154
5.4.2. QPSK signal . . . . .	156
5.4.2.1. QPSK modulator . . . . .	159
5.4.2.2. QPSK demodulator . . . . .	160
5.5. Kvadratura amplitudska modulacija . . . . .	162
5.6. Uticaj šuma na prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem . . . . .	166
6. Praktikum laboratorijskih vježbi . . . . .	172
6.1. Laboratorijski uređaji . . . . .	174
6.1.1. Izvor jednosmjernog napona . . . . .	174
6.1.2. EMONA TELECOMS-TRAINER 101 (ETT 101) . . . . .	175
6.1.3. Generator funkcija . . . . .	179
6.1.4. Osciloskop . . . . .	181
6.1.5. Analizator spektra . . . . .	182
6.1.6. Signal-generator . . . . .	184
6.2. Softveri za simulaciju rada telekomunikacionih uređaja . . . . .	185
6.3. Uputstvo za korišćenje QR koda . . . . .	188
6.4. Laboratorijske vježbe . . . . .	189
6.4.1. Uvodna laboratorijska vježba . . . . .	189
6.4.2. Laboratorijska vježba br. 1 . . . . .	191
6.4.3. Laboratorijska vježba br. 2 . . . . .	193
6.4.4. Laboratorijska vježba br. 3 . . . . .	195
6.4.5. Laboratorijska vježba br. 4 . . . . .	197
6.4.6. Laboratorijska vježba br. 5 . . . . .	200
6.4.7. Laboratorijska vježba br. 6 . . . . .	204
6.4.8. Laboratorijska vježba br. 7 . . . . .	207
6.4.9. Laboratorijska vježba br. 8 . . . . .	210
6.5. Prilozi za laboratorijske vježbe . . . . .	213

7. Rješenja zadataka . . . . .	220
7.1. Amplitudska modulacija signala . . . . .	221
7.2. Ugaone modulacije . . . . .	226
7.3. Impulsne modulacije. . . . .	231
7.4. Prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti . .	233
7.5. Prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem . . . . .	238
8. Lista engleskih skraćenica korišćenih u udžbeniku . . . . .	242
9. Rječnik pojmova iz telekomunikacija . . .	244
10. Literatura . . . . .	252
Korisni sajtovi. . . . .	253

# Predgovor

Poštovani učenice, poštovana učenice,

Udžbenik Elektronske komunikacije II odnosi se na modul Elektronske komunikacije za II razred elektrotehničke škole. Podijeljen je na poglavlja, koja odgovaraju ishodima predviđenim Nastavnim planom i predmetnim programom. Svako poglavlje sadrži **kratak uvod** koji će te podstaći da razmišljaš o sadržajima koji slijede i **osnovni tekst nastavne teme** – obavezan sadržaj koji treba da naučiš i tako postigneš ciljeve predviđene nastavnim planom i programom. Osnovni tekst prate odgovarajući **primjeri**, odnosno zadaci, koji pomažu razumijevanju njegovog sadržaja. Kroz osnovni tekst data su **kontrolna pitanja sa odgovorima**, pomoću kojih možeš provjeriti jesi li razumio/razumjela pročitani dio teksta. Djelovi teksta koji nijesu obuhvaćeni predmetnim programom, a koji će ti omogućiti da produbiš znanja iz ove oblasti, označeni su kao **Dodatak +**.

Važan dio udžbenika, koji je posebno označen kako ne bi opterećivao osnovni tekst, sadrži **zanimljivosti**, **primjenu naučenog** i **veze sa ostalim modulima**. Cilj tih elemenata jeste da te dodatno zainteresuju za sadržaj osnovne teme, da ti omoguće da saznaš kakve su praktične primjene izloženog sadržaja, te da pročitano povezuješ sa nastavnim sadržajem koji si izučavao/izučavala iz drugih predmeta.

U okviru svakog poglavlja objašnjeno je **značenje manje poznatih riječi** u kontekstu u kojem se one javljaju. Na kraju svakog poglavlja dat je njegov **rezime** sa preglednim i konciznim sadržajem poglavlja, te **pitanja za razmišljanje** i **zadaci**. Rješenja zadataka nalaze se na kraju udžbenika. Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz poglavlja, na njegovom kraju je **preporuka za korišćenje dodatne literature** – naveden je naziv

knjige ili veb-stranice gdje možeš naći materijal za dodatno izučavanje gradiva.

Šesto poglavlje sadrži dio koji obrađuje **laboratorijske vježbe** predviđene Nastavnim planom i programom predmeta. Na početku svake vježbe su **QR kodovi** za preuzimanje sadržaja laboratorijskih vježbi na pametni telefon ili tablet.

Na kraju knjige naveden je **spisak skraćenica** sa njihovim značenjem na engleskom jeziku i prevodom na naš jezik; **rječnik pojmova** koji na pregledan način prikazuje i definiše termine iz oblasti telekomunikacija sadržane u udžbeniku, kao i **spisak literature** korišćene pri izradi udžbenika.

Telekomunikacije su jedna od temeljnih disciplina elektrotehnike i jedno od najznačajnijih ljudskih dostignuća. U toku proteklih tridesetak godina velike promjene u telekomunikacijama izvršile su ogroman uticaj na savremeno društvo. Tome je posebno doprinio razvoj interneta i mobilne telefonije, te potrebe za novim servisima. Danas telekomunikacije predstavljaju osnovnu potrebu čovjeka, mjeru ekonomskog, socijalnog i kulturnog razvoja društva, kao i jedinstvenu pojavu globalnog povezivanja. Osim toga, savremene telekomunikacije su, zahvaljujući ulaganju u informacionu i telekomunikacionu infrastrukturu, i jedan od glavnih pokretača ekonomskog napretka društva.

Izučavanjem telekomunikacija razumjećeš kako telekomunikacioni uređaji funkcionišu i kako da ih primjenjuješ u svakodnevnom životu.

*Autori*



# 1. Amplitudska modulacija signala

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- objasniš pojam modulacije i vrste analognih modulacija (amplitudska, frekvencijska i fazna)
- objasniš postupak dobijanja amplitudski moduliranih signala (KAM, AM-2BO, AM-1BO i AM-NBO) i njihove spektre
- skiciraš spektar zadatog amplitudski moduliranog signala i nacrtaj talasni oblik KAM signala za zadati stepen modulacije
- objasniš vrste demodulacije AM signala (sinhrona i asinhrona – detektor anvelope)
- opišeš uticaj šuma na kvalitet prenosa amplitudski moduliranih signala
- nacrtaj blok-šemu primopredajnog sistema sa amplitudskom modulacijom.





Najjednostavniji oblik prenosa električnih signala jeste da se oni prenose u svom izvornom obliku. Taj prenos naziva se **prenos u osnovnom opsegu učestanosti**. U nekim komunikacionim sistemima informacioni signali prenose se u svom osnovnom opsegu preko prenosnog medijuma. Primjer za ovakav prenos jesu računarske mreže, gdje se računari međusobno povezuju UTP kablovima.

U mnogim komunikacionim sistemima prenos signala u svom osnovnom opsegu je nepraktičan, pa se signal (umjesto u osnovnom) prenosi u nekom drugom, višem opsegu frekvencija. Taj novi opseg naziva se **transponovani opseg**. Postupak pomjeranja spektra signala iz svog osnovnog opsega u opseg visokih frekvencija – transponovani opseg, naziva se **modulacija**.

Danas se telefonski, radio i TV prenos isključivo obavlja u transponovanom opsegu učestanosti, što ukazuje na značaj modulacije i demodulacije signala pri prenosu podataka na daljinu.

Ovdje ćemo napomenuti jednu važnu činjenicu. Razvojem digitalnih tehnologija prenosa i obrade signala, analogne tehnike modulacije gube na značaju i primjeni. Tehnike analogne amplitudske modulacije danas skoro i nemaju praktičnu primjenu, ali imaju teorijski značaj, jer su važne za razumijevanje procesa obrade signala.

U praktikumu laboratorijskih vježbi postoji vježba kojom se vrši snimanje talasnog oblika i spektra amplitudski modulisanog signala korišćenjem laboratorijskih uređaja.

## ZANIMLJIVOST

Daljinsko radio-upravljanje termin je koji se koristi za korišćenje radio-signala za daljinsko upravljanje drugim uređajem. Termin se odnosi na upravljanje modelima automobila, čamaca i aviona iz upravljačke kutije koju drži korisnik. Nikola Tesla je patentirao šemu radio-upravljanja 1899. godine, kada je napravio čamac na daljinsko upravljanje. Rani sistemi daljinskog radio-upravljanja korišćeni su za upravljanje radio-kanala zasnovanih na amplitudskoj modulaciji.



## 1.1. Pojam modulacije signala

Proces obrade u kojem se signal transponuje iz svog osnovnog opsega u opseg viših učestanosti, naziva se modulacija signala.

Postoji više razloga za ovakav način prenosa. Pomenućemo tri najvažnija.

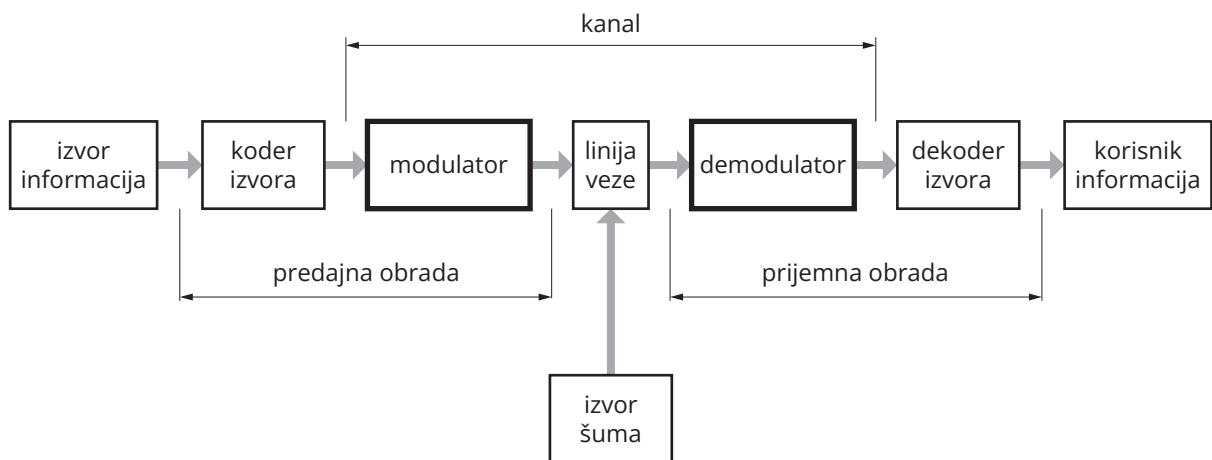
Prvo, veoma čest način prenosa informacija jeste prenos informacija putem elektromagnetnih talasa (EMT). EMT su na višim frekvencijama u odnosu na frekvencije izvornog signala koji se želi prenijeti i koji se javlja u osnovnom opsegu. Zbog toga, ukoliko se želi prenos signala radio-putem, onda signal iz osnovnog opsega treba pomjeriti u viši opseg frekvencija.

Drugo, pri prenosu signala osnovni cilj jeste da se isti medijum prenosa iskoristi za istovremeni prenos više signala, koje emituju nezavisni izvori. Ovaj proces istovremenog prenosa više signala po zajedničkom medijumu, naziva se **multipleksiranje**. Ako se signal prenosi radio-putem, bez multipleksiranja, na jednoj teritoriji mogao bi se prenositi samo jedan signal. Transponovanjem frekvencija signala omogućuje se multipleksiranje i korišćenje raspoloživog radio-spektra.

I treće, transponovanje se koristi da bi se korisni signal što više prilagodio prenosnom sistemu. Opseg učestanosti u kojem prenosni sistem ima dobre karakteristike vezane za smetnje, šumove, izobličenja i sl. treba da se poklopi sa opsegom učestanosti u kojem se nalazi preneseni signal. Zbog toga se signal transponuje iz svog osnovnog opsega u drugi opseg, pogodniji za prenos.

U postupku modulacije, originalni signal, odnosno signal koji nosi informaciju (ili, kako se često naziva – korisni signal) utiskuje se u **signal nosioca**, koji predstavlja pomoćni signal. Pomoćni signal, kao što ćemo kasnije vidjeti, najčešće ima oblik sinusoide. Postupkom modulacije obavlja se pomjeranje ili translacija spektra originalnog signala iz oblasti niskih u oblast visokih učestanosti. Modulacija se obavlja na predajnoj strani telekomunikacionog sistema, u elektronskim sklopovima koji se nazivaju **modulatori**. Na izlazu iz modulatora dobija se **modulisani signal**. Na mjestu prijema vrši se obrnut proces obrade signala. Signal se iz opsega visokih učestanosti vraća u osnovni opseg. Ovaj proces se naziva **demodulacija**, i obavlja se u **demodulatorima** prijemnika. Na izlazu demodulatora dobija se originalni signal. Modulacija i demodulacija predstavljaju dva neodvojiva postupka obrade u prenosu signala.

Nakon Šenona, koji je dao opšti model telekomunikacionog sistema, što si izučavao/izučavala iz modula Elektronske komunikacije I, predloženi su i drugi, nešto detaljniji modeli. Blok-šema telekomunikacionog sistema za prenos signala, sa modulatorom na predajnoj i demodulatorom na prijemnoj strani sistema, data je na slici 1.1.



**Slika 1.1.** Blok-šema telekomunikacionog sistema sa modulatorom i demodulatorom

## Veza sa drugim modulima

Obnovi usvojene sadržaje iz udžbenika Elektronske komunikacije I – Uvod u telekomunikacije.

Podsjetimo se ukratko uloge blokova na slici. Izvor informacija (poruke) jeste osoba ili uređaj koji generiše informacije (govor, slika, tekst, podaci) koje treba prenijeti korisniku. Koder izvora pretvara poruku u odgovarajući kôd. Modulator, koji ćemo kasnije detaljno izučavati, vrši obradu signala radi njegovog prilagođenja medijumu za prenos. Demodulator, koji ćemo takođe kasnije detaljno obrađivati, vrši proces inverzan postupku modulacije. Linija veze (prenosni put, transmisioni medijum) jeste sredina kroz koju se signal prenosi od predajnika do prijemnika. Šum je štetna pojava, nezaobilazna na prenosnom putu, i predstavlja smetnje slučajnog karaktera koje se sabiraju sa korisnim signalom duž linije veze, te tako utiču na oblik signala koji dolazi do prijemnika. Dekoder izvora prevodi poruku predstavljenu

odgovarajućim kodom u odgovarajući oblik pogodan za korisnika. I na kraju, korisnik predstavlja osobu, mašinu ili objekat kome je informacija namijenjena.

Signal koji je nosilac poruke, odnosno signal koji nosi informaciju, naziva se **modulišući signal**.

Pomoćni periodični signal, kojem se modifikuju neki osnovni parametri, naziva se signal nosilac. Kada se u signal nosilac utisne modulišući – korisni signal, dobija se signal koji se naziva se **modulisani signal**.

Za izvođenje modulacije i demodulacije signala, potrebno je imati dva signala – jedan je signal koji se moduliše i prenosi, a drugi je pomoćni signal koji se lokalno generiše u elektronskom kolu predajnika i koji se naziva signal nosilac, jer on „nosi“ korisni signal.

Pomoćni signal se u kolima predajnika generiše u elektronskom sklopu koji se naziva **lokalni oscilator**.

Modulišući signal je nosilac informacije, i on je slučajni signal. Za razliku od njega, nosilac je strogo određen, odnosno nosilac je determinisani signal.

## KONTROLNO PITANJE **K1.1** ▶

Da li nosilac sadrži informaciju?

**Odgovor:** Ne, nosilac je deterministički signal; dakle, potpuno poznat signal, a deterministički signali ne nose informaciju.

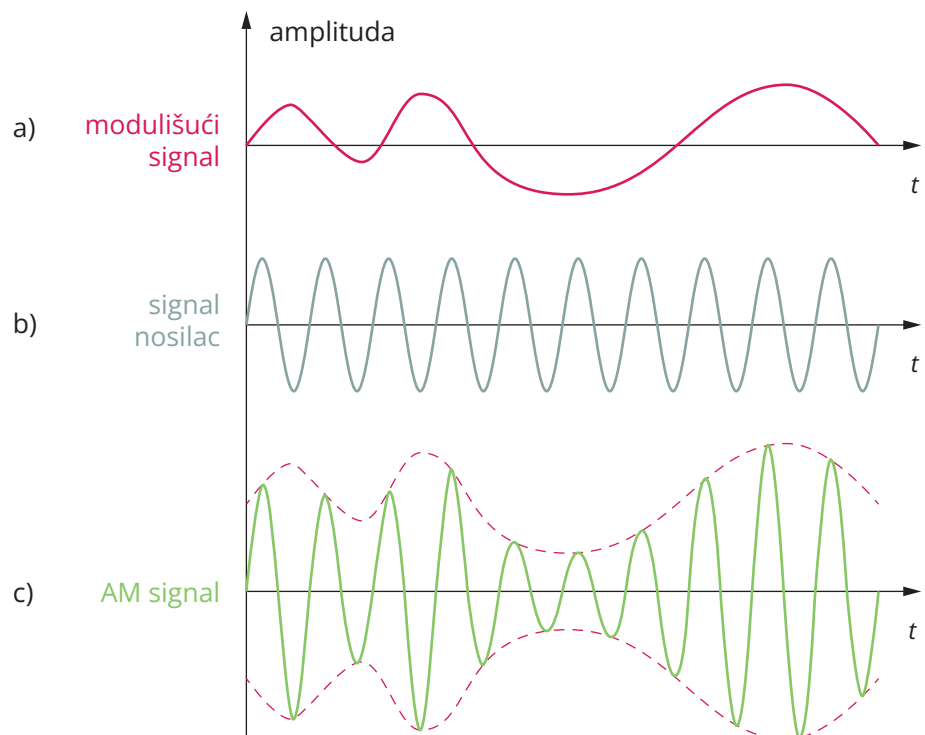
Prema obliku nosioca, postupci modulacije dijele se u dvije grupe: postupci u kojima je nosilac kontinualni signal, i postupci kod kojih je nosilac u obliku periodično ponavljane povorke pravougaonih impulsa. Ako je signal nosilac kontinualan, onda se takva modulacija naziva **modulacija sa kontinualnim nosiocem** ili analogna modulacija.

U drugom slučaju, ako je signal nosilac periodična povorka pravougaonih impulsa, onda se takva modulacija naziva **impulsna modulacija**.

## 1.1.1. Analogne i impulsne modulacije

Razmotrimo postupke modulacije sa kontinualnim nosiocem. U ovom slučaju nosilac je periodičan signal, i ima oblik sinusoida. Postavlja se pitanje zašto je nosilac sinusoida. Prisjetimo se da se signali generišu, obrađuju i prenose u električnim sklopovima, odnosno električnim kolima telekomunikacionog sistema. Da bi se informacija mogla prenositi, neophodno je obezbijediti da se signali ne mijenjaju i ne izobličavaju u ovim kolima. Električna kola koja ovo obezbjeđuju jesu tzv. **linearna električna kola**. Signali koji imaju oblik sinusoida ne mijenjaju oblik pri prolazu kroz linearno električno kolo, pa su zbog toga pogodni da budu nosioci u procesu modulacije.

Na slici 1.2 prikazan je izgled modulišućeg slučajnog signala, signala nosioca i modulisanog signala.



Slika 1.2. a) Modulišućí slučajni signal, b) signal nosilac, c) modulirani signal

Rekli smo da je nosilac koji moduliše informacijski signal – sinusoida koju generiše lokalni oscilator u predajniku. Matematički, nosilac možemo izraziti kao:

$$u_0 = U_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi). \quad (1.1)$$

U ovom izrazu  $U_0$  je amplituda nosioca,  $f_0$  njegova učestanost (frekvencija), a  $\varphi$  pomjeraj faze, početna faza ili trenutna devijacija faze. Izraz  $2\pi f_0$  predstavlja kružnu učestanost nosioca, koja se označava sa  $\omega_0$ .



### Veza sa drugim modulima

Obnovi usvojene sadržaje iz udžbenika Elektronske komunikacije I, gdje su detaljno objašnjeni ovi pojmovi.

Dakle, nosilac je deterministički sinusoidalni signal koji je određen sa svoja tri parametra: amplitudom, frekvencijom i fazom. Promjenom jednog od njegovih parametara, srazmjerno promjenama modulišućeg signala i zadržavanjem ostala dva parametra konstantnim, dobija se amplitudski, frekvencijski ili fazno modulirani signal.

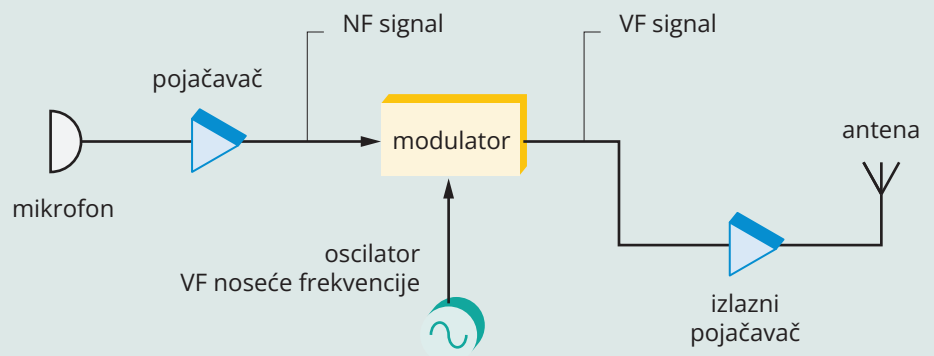
Razlikujemo tri osnovna tipa analognih modulacija: (1) **amplitudska modulacija** (AM) – amplituda nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu; (2) **frekvencijska modulacija** (FM) – učestanost nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu; (3) **fazna modulacija** (PM) – faza nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu. Frekvencijska i fazna modulacija nazivaju se zajedničkim imenom **ugaona modulacija** (UM).

Modulacija signala koristi se pri telekomunikacionom prenosu signala na daljinu. Tipičan primjer je obrada pri radio-prenosu signala.

## DODATAK +

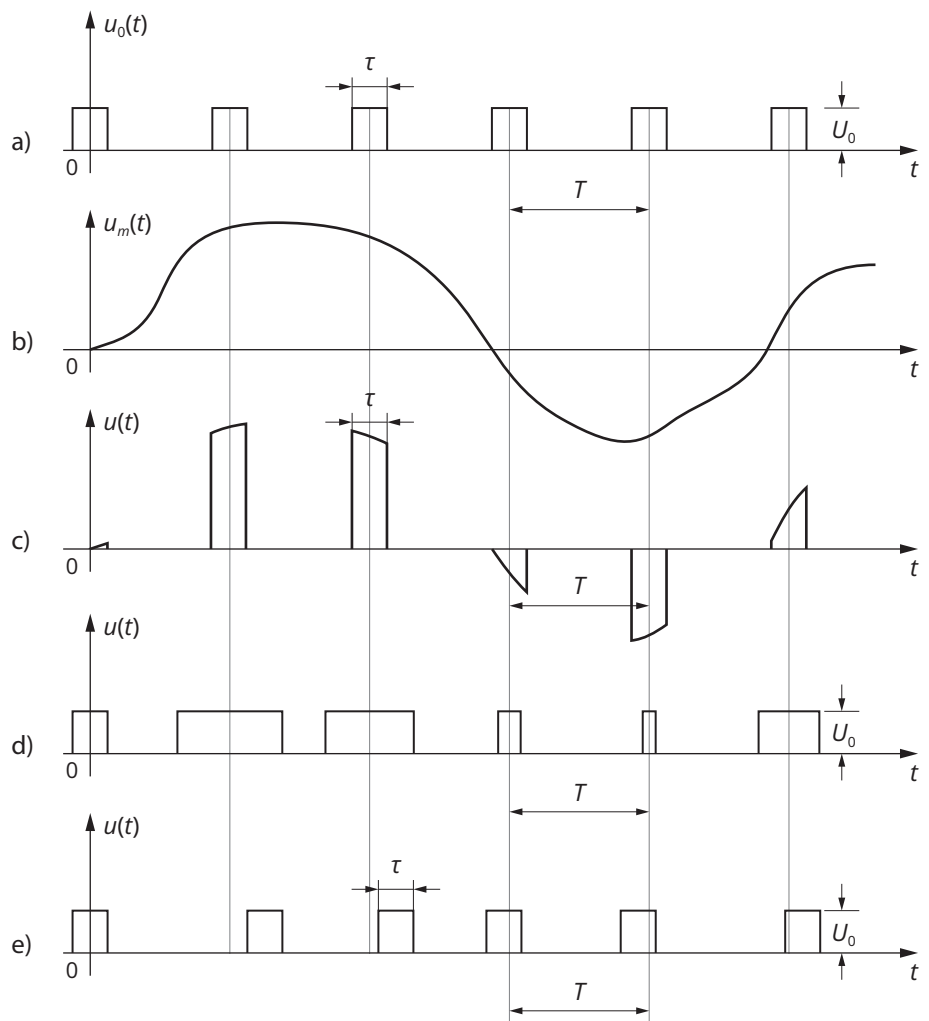
### Blok-šema radio-predajnika

Na slici 1.3 prikazana je blok-šema jednog radio-predajnika. Na ulazu radio-predajnika nalazi se mikrofon, koji pretvara korisni ulazni signal (govor ili muziku) u električni signal. Pošto je signal na izlazu mikrofona male snage, on se pojačava u odgovarajućem pojačavaču. Pojačani signal je niske frekvencije, odnosno nalazi se u osnovnom opsegu učestanosti. Signal se iz osnovnog opsega transponuje u signal visoke frekvencije (VF signal) da bi mogao da se prenese na daljinu. Postupak transponovanja obavlja se u modulatoru. Signal nosilac generiše se u oscilatornom kolu visoke frekvencije – lokalnom oscilatoru, koji moduliše ulazni korisni signal i prenosi ga u VF oblast. Signal na izlazu modulatora dodatno se pojačava u VF pojačavaču i vodi na antenu, kojom se zrači u okolni prostor u vidu elektromagnetnog talasa.



Slika 1.3. Blok-šema radio-predajnika

Razmotrimo sada postupke modulacije sa impulsnim nosiocem. Kada je nosilac u obliku povorke periodično ponavljanih pravougaonih impulsa, onda je riječ o **impulsnim modulacijama**. Povorka impulsa takođe ima tri parametra: amplitudu impulsa, dužinu trajanja impulsa i položaj impulsa. U zavisnosti od toga koji se od ovih parametara nosioca mijenja pod uticajem slučajnog modulišućeg signala, razlikuju se tri vrste impulsnih modulacija: **impulsna amplitudska modulacija (IAM)**, **impulsna modulacija po trajanju (ITM)** i **impulsna položajna modulacija (IPM)**. Sve tri vrste impulsne modulacije, zajedno sa modulišućim slučajnim signalom i signalom nosiocem, prikazane su na slici 1.4.



**Slika 1.4.** Impulsne modulacije: a) signal nosilac, b) modulišućí slučajni signal, c) impulsna amplitudska modulacija – IAM, d) impulsna modulacija po trajanju – ITM, e) impulsna položajna modulacija IPM

Posebnu vrstu impulsnih modulacija predstavlja **impulsna kodna modulacija (IKM)**, koju ćemo, zajedno sa ostalim impulsnim modulacijama, kasnije detaljnije obraditi.

## 1.2. Amplitudska modulacija

Amplitudska modulacija nastaje utiskivanjem modulišućeg signala u amplitudu signala nosioca. Amplitudski modulirani signal ima učestanost koja je jednaka učestanosti signala nosioca, dok se njegova amplituda mijenja onako kako se mijenja modulišuća signal. Kod amplitudske modulacije ne mijenja se ni frekvencija ni faza signala nosioca, već se samo mijenja njegova amplituda. Amplituda se mijenja u ritmu promjene modulišućeg, korisnog signala.

### 1.2.1. KAM signal

U analizi koja slijedi, da bi ona bila jednostavnija, kao modulišuća signal koristimo sinusnu funkciju.

Na slici 1.5 prikazani su talasni oblici signala nosioca, modulišućeg sinusnog signala i moduliranog signala, tj. prikazani su njihovi oblici u vremenskom domenu. Sa slike se vidi šta se dešava sa signalima u vremenskom domenu u procesu amplitudske modulacije. Amplituda nosioca mijenja se u ritmu promjena modulišućeg signala.

Nosilac prikazan na slici 1.5a dat je izrazom:

$$u_0(t) = U_0 \cos 2\pi f_0 t. \quad (1.2)$$

U ovom izrazu  $U_0$  je amplituda nosioca a  $f_0$  njegova učestanost.

Modulišuća signal amplitude  $U_m$ , prikazan na slici 1.5b, dat je izrazom:

$$u_m(t) = U_m \cos 2\pi f_1 t. \quad (1.3)$$

U ovom izrazu  $U_m$  je amplituda modulišućeg sinusnog signala a  $f_1 = f_m$  njegova učestanost, čija je perioda ponavljanja  $T_1$ .

AM signal, koji se dobije kada se signalom sa slike 1.5b moduliše nosilac sa slike 1.5a, prikazan je na slici 1.5c. Amplituda AM signala data je izrazom:

$$U_{AM} = U_0 + kU_m \cos 2\pi f_1 t, \quad (1.4)$$

gdje  $k$  predstavlja koeficijent srazmjernosti, čija vrijednost zavisi od vrste električnog sklopa u kojem se obavlja modulacija.

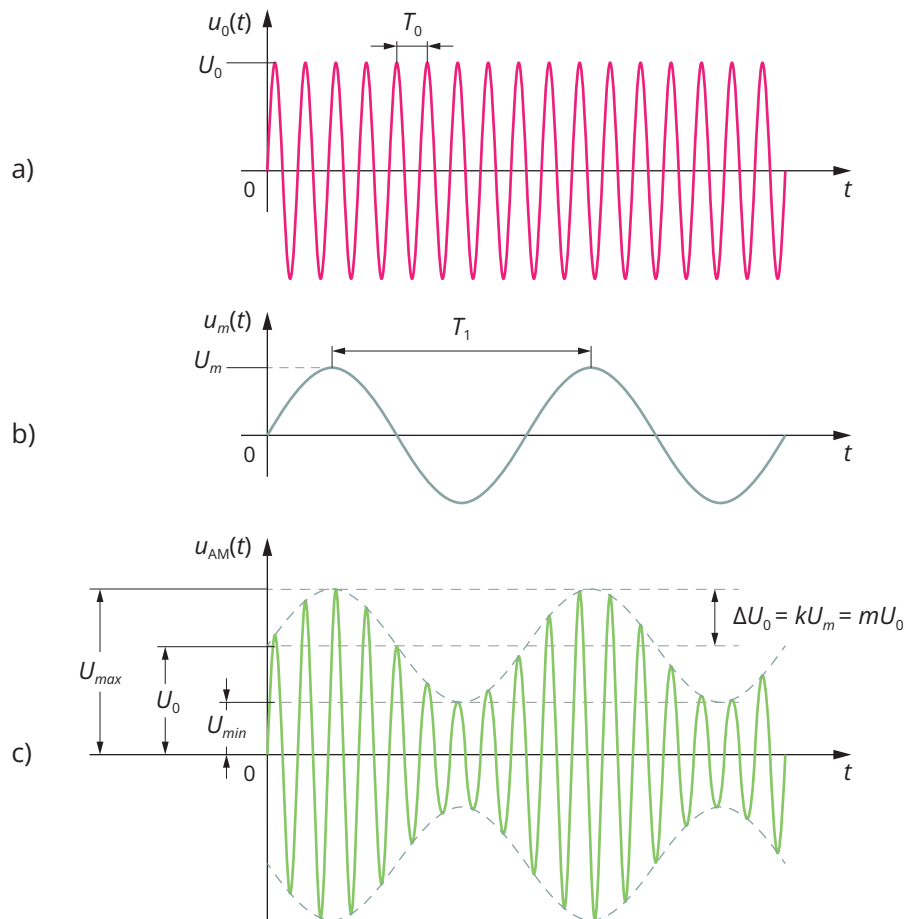
Kao što se vidi sa slike 1.5c, amplituda  $U_{AM}$  mijenja se u ritmu promjene modulišućeg signala koji nosi informaciju. Ona dostiže maksimum  $U_{AM} = U_{max} = U_0 + kU_m$  kada je amplituda modulišućeg signala maksimalna, odnosno kada je  $\cos 2\pi f_1 t = 1$ , a ima minimalnu vrijednost  $U_{AM} = U_{min} = U_0 - kU_m$  kada je amplituda modulišućeg signala minimalna, odnosno kada je  $\cos 2\pi f_1 t = -1$ . U trenucima kada je  $\cos 2\pi f_1 t = 0$ , odnosno kada je amplituda modulišućeg signala jednaka nuli, amplituda AM signala jednaka je amplitudi nosioca, odnosno:  $U_{AM} = U_0$ .



Zaključujemo da:

Trenutne vrijednosti modulisanog signala  $u_{AM}(t)$  mijenjaju se u skladu sa promjenama trenutnih vrijednosti modulišućeg sinusnog signala  $u_m(t)$ .

Isprekidana linija na slici 1.5c, koja prati amplitude modulisanog signala, naziva se **obvojnica** ili **anelopa** AM signala.



**Slika 1.5.** Talasni oblici: a) signala nosioca, b) modulišućeg sinusnog signala, c) AM modulisanog signala

AM signal dat je izrazom:

$$u_{AM}(t) = (U_0 + kU_m \cos 2\pi f_1 t) \cdot \cos 2\pi f_0 t. \quad (1.5)$$

Iz izraza (1.5) može se vidjeti da je amplituda AM signala jednaka  $U_0 + kU_m \cos 2\pi f_1 t$ , učestanost AM signala jednaka je učestanosti signala nosioca  $f_0$ , te da je početna faza AM signala ista kao početna faza signala nosioca, što je u našem slučaju  $0^\circ$ .

Ovaj signal je najčešće korišćeni AM signal, i naziva se **konvencionalni amplitudski modulirani signal** (skraćeno KAM signal).

Pri prenosu AM signala važnu ulogu ima veličina koja se naziva **stepen (dubina) modulacije**.

$$m = \frac{kU_m}{U_0} \quad (1.6)$$

Posmatrajmo sliku 1.5c. Na njoj je prikazana nova veličina  $\Delta U_0 = kU_m$ , koja je  $k$  puta veća od maksimalne vrijednosti modulišućeg signala. Istovremeno,  $\Delta U_0$  predstavlja maksimalnu promjenu amplitude modulisanog signala.

Sa slike 1.5c vidi se da je  $2\Delta U_0 = -U_{min}'$  pa je:

$$\Delta U_0 = \frac{U_{max} - U_{min}}{2}. \quad (1.7)$$

Kako je:

$$U_0 = \frac{U_{max} + U_{min}}{2}, \quad (1.8)$$

onda je stepen modulacije KAM signala:

$$m = \frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}. \quad (1.9)$$

Stepen modulacije mijenja se sa promjenom amplitude modulišućeg signala, i kreće se u rasponu od 0 do 1. U slučaju kada je amplituda modulišućeg signala veća od amplitude signala nosioca, odnosno kada je  $m > 1$ , dolazi do izobličenja (distorzije) signala. U tom slučaju kaže se da je signal **premodulisan**.

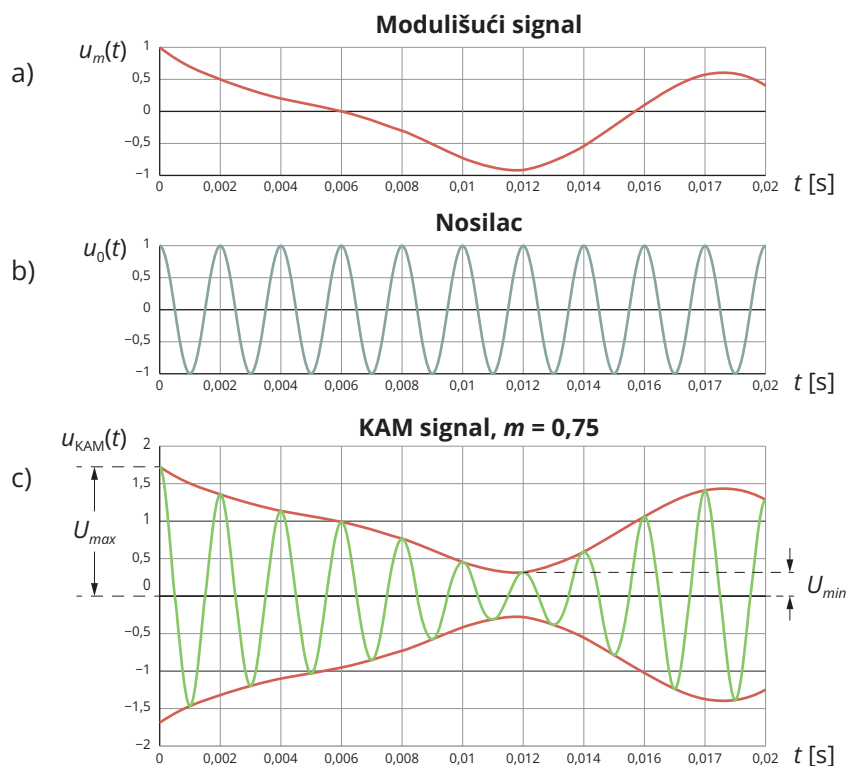
## PRIMJER 1.1 ▶

Na slici 1.6 prikazani su talasni oblici modulišućeg signala a), signala nosioca b) i KAM signala c) za sljedeće vrijednosti korišćenih parametara:  $U_0 = 1 \text{ V}$ ,  $U_m = 1 \text{ V}$ ,  $m = 0,75$ ,  $f_0 = 500 \text{ Hz}$ . Izračunati maksimalnu i minimalnu amplitudu KAM signala.

**Rješenje:** Maksimalna amplituda KAM signala zavisi od amplitude signala nosioca  $U_0$  i amplitude modulišućeg signala  $U_m$ . Maksimalna i minimalna amplituda KAM signala dobija se korišćenjem izraza:

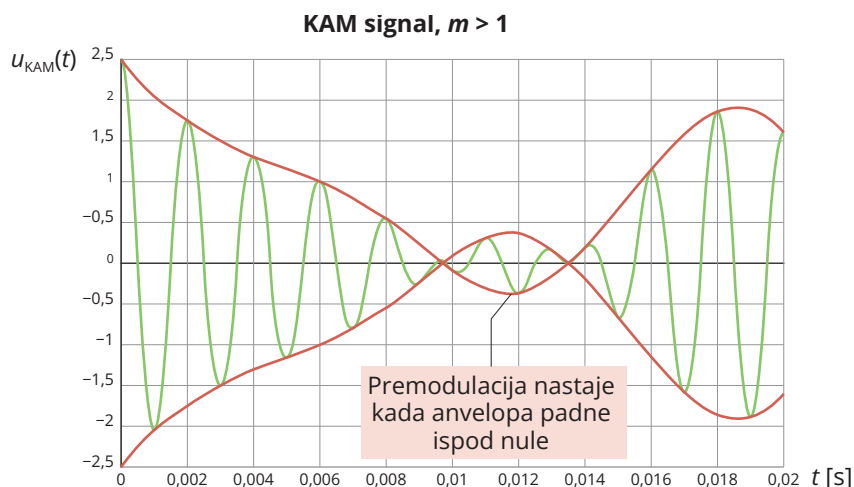
$$\begin{aligned} U_{max} &= U_0 + k \cdot U_m \\ &= U_0 + m \cdot U_0 \\ &= 1 \text{ V} + 0,75 \cdot 1 \text{ V} = 1,75 \text{ V}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{min} &= U_0 - k \cdot U_m \\ &= U_0 - m \cdot U_0 \\ &= 1 \text{ V} - 0,75 \cdot 1 \text{ V} = 0,25 \text{ V}. \end{aligned}$$



**Slika 1.6.** Talasni oblici: a) modulišućeg signala, b) signala nosioca, c) KAM signala za  $U_0 = 1$  V,  $U_m = 1$  V,  $m = 0,75$ ,  $f_0 = 500$  Hz

Na slici 1.7 prikazani su talasni oblici KAM signala za iste vrijednosti korištenih parametara iz prethodnog primjera, pri čemu se razlikuje stepen modulacije:  $U_0 = 1$  V,  $U_m = 1$  V,  $m > 1$ ,  $f_0 = 500$  Hz. Sa slike se vidi izobličenje anvelope modulisanog signala koje je toliko da se iz nje ne može rekonstruisati originalni modulišući signal koji nosi informaciju.



**Slika 1.7.** Talasni oblici KAM signala za  $U_0 = 1$  V,  $U_m = 1$  V,  $m > 1$ ,  $f_0 = 500$  Hz



## Veza sa drugim modulima

Obnovi usvojene sadržaje iz Elektronskih komunikacija I, gdje se objašnjavaju trigonometrijski identiteti.

KAM signal može se dobiti kao proizvod dvije funkcije, što se u opštem slučaju može opisati analitičkim izrazom:

$$\begin{aligned} u_{AM} &= (U_0 + kU_m \cos 2\pi f_m t) \cdot \cos 2\pi f_0 t \\ &= U_0 \cos 2\pi f_0 t + kU_m \cos 2\pi f_m t \cdot \cos 2\pi f_0 t. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Koristeći trigonometrijski izraz

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta),$$

prethodni izraz postaje:

$$\begin{aligned} u_{AM} &= U_0 \cos 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} kU_m \cos 2\pi (f_0 + f_m) t \\ &\quad + \frac{1}{2} kU_m \cos 2\pi (f_0 - f_m) t. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Uzimajući u obzir da je  $kU_m = mU_0$ , izraz za KAM signal postaje:

$$\begin{aligned} u_{AM} &= U_0 \cos 2\pi f_0 t + \frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_m) t \\ &\quad + \frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_m) t. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Iz dobijenog izraza vidimo da se KAM signal sastoji od tri periodična signala, čije su učestanosti  $f_0$ ,  $f_0 + f_m$  i  $f_0 - f_m$ .

Signal

$$U_0 \cos 2\pi f_0 t,$$

predstavlja nosioca, signal

$$\frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_m) t$$

donji (lijevi) bočni opseg modulisanog signala, a signal

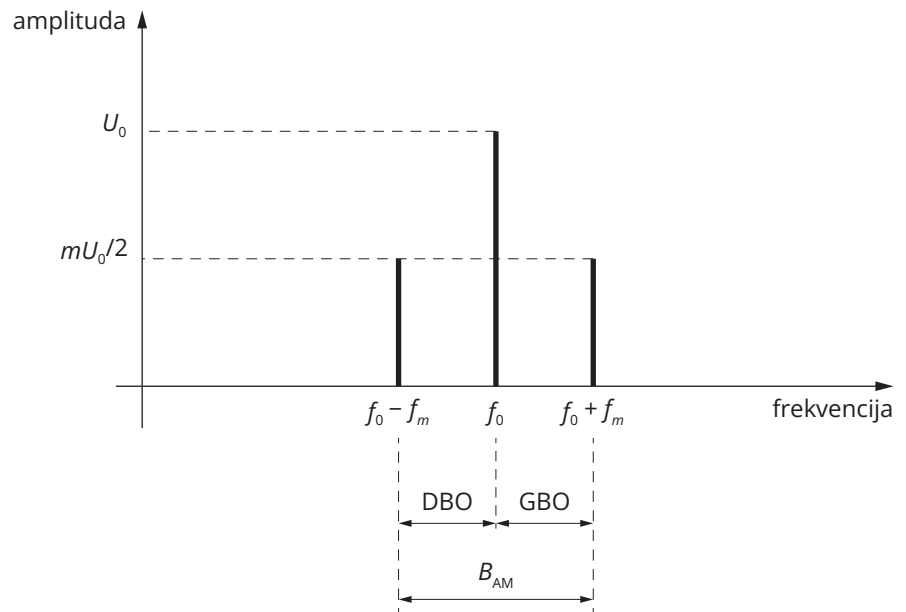
$$\frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_m) t$$

predstavlja gornji (desni) bočni opseg modulisanog signala.

Spektar KAM signala sastoji se od tri spektralne komponente, čije su učestanosti:  $f_0$ ,  $f_0 + f_m$  i  $f_0 - f_m$ .

Svaki od bočnih opsega u sebi sadrži kompletnu poruku, dok nosilac, koji se takođe javlja u spektru modulisanog signala, ne nosi nikakvu poruku. Na slici 1.8. prikazan je spektar KAM signala sa tri spektralne komponente, sa

centralnom komponentom i dva bočna opsega, kada su modulišući signal i signal nosilac prostoperiodični signali.



**Slika 1.8.** Spektar KAM signala sa tri spektralne komponente

Zaključujemo da se spektar KAM signala nalazi u opsegu od  $f_0 - f_m$  do  $f_0 + f_m$ , sa centralnom komponentom  $f_0$ . Svakoj komponenti modulišućeg signala odgovaraju dva bočna opsega modulisanog signala: donji bočni opseg – DBO (engl. *lower sideband, LSB*) i gornji bočni opseg – GBO (engl. *upper sideband, USB*). Amplituda bočnog opsega je  $mU_0/2$ , a ukupni zauzeti spektar dvostruko je veći od opsega modulišućeg signala  $2f_m$ , što znači da amplitudska modulacija udvostručava širinu opsega (engl. *bandwidth*) amplitudski modulisanog signala:

$$B_{AM} = f_0 + f_m - (f_0 - f_m) = f_0 + f_m - f_0 + f_m = 2 \cdot f_m \quad (1.13)$$

gdje je  $B_{AM}$  širina spektra KAM signala.

## KONTROLNO PITANJE K1.2 ▶

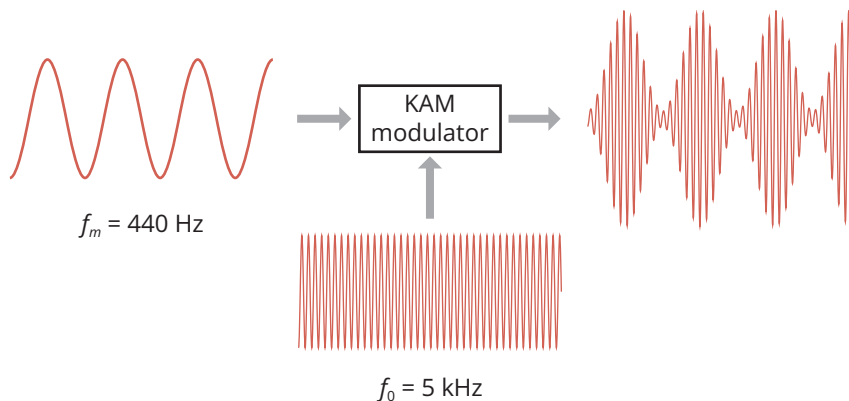
KAM signal ima frekvenciju nosioca 10 kHz. Maksimalna frekvencija signala je 11 kHz. Opseg, potreban da bi se KAM signal prenio, iznosi (zaokružiti tačan odgovor):

- a) 10 kHz, b) 2 kHz, c) 11 kHz, d) 1 kHz.

**Odgovor:** b). Širina propusnog opsega KAM signala je  $2 \cdot f_m$ . Kako je granica gornjeg opsega na frekvenciji  $f_0 + f_m = 11$  kHz, i kako je  $f_0 = 10$  kHz, to je  $f_m = 1$  kHz, pa je  $B = 2 \cdot f_m = 2$  kHz.

## PRIMJER 1.2 ▶

Signal frekvencije 440 Hz amplitudski se moduliše nosiocem učestanosti 5 kHz (slika 1.9). Odrediti učestanosti na kojima će se naći dva bočna opsega konvencionalno amplitudski modulisanog (KAM) signala. Nacrtati spektar KAM signala.



Slika 1.9. KAM modulacija sinusnog signala

### Rješenje:

$$f_0 = 5\,000 \text{ Hz}, f_m = 440 \text{ Hz}.$$

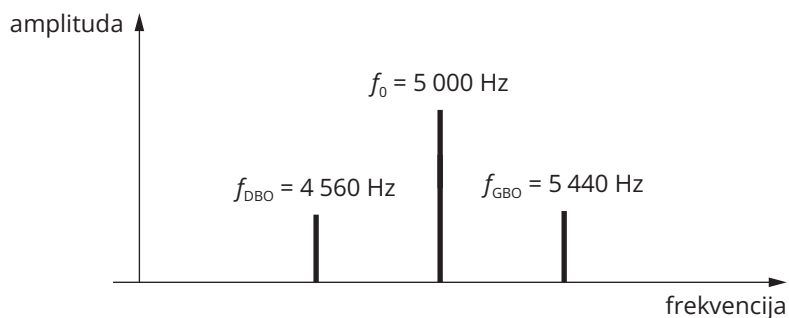
Donji bočni opseg:

$$f_{\text{DBO}} = f_0 - f_m = 5\,000 \text{ Hz} - 440 \text{ Hz} = 4\,560 \text{ Hz}.$$

Gornji bočni opseg:

$$f_{\text{GBO}} = f_0 + f_m = 5\,000 \text{ Hz} + 440 \text{ Hz} = 5\,440 \text{ Hz}.$$

Spektar KAM signala prikazan je na slici 1.10:

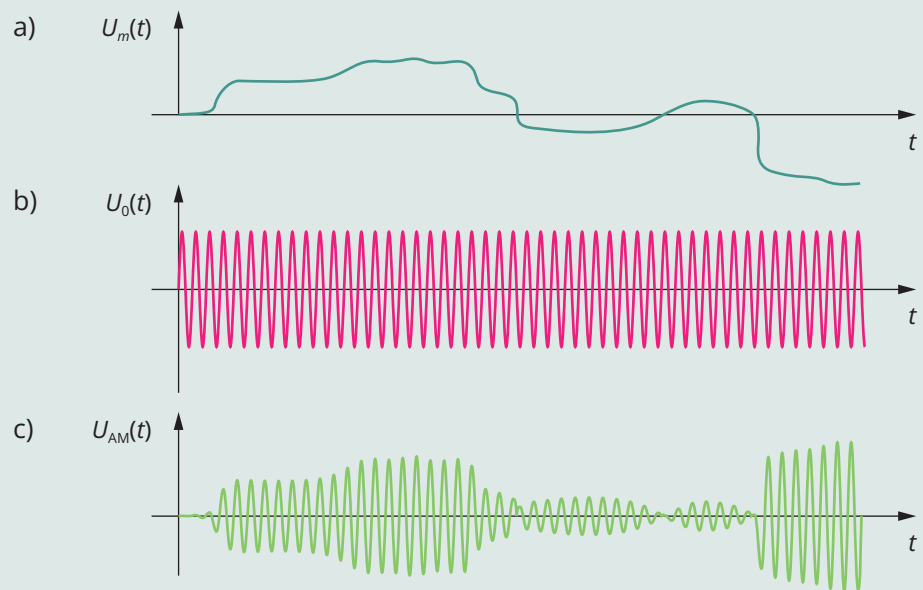


Slika 1.10. Spektar KAM signala

## Modulacija složenog signala

U dosadašnjim analizama podrazumijevali smo da se moduliše prostope-riodičan signal (sinusna funkcija – sinusoida). U praksi to skoro nikad nije slučaj: skoro uvijek se moduliše neki složeni signal. Kako u tom slučaju izgledaju talasni oblik amplitudski modulisanog signala i njegov spektar, prikazaćemo u primjeru govornog signala.

Na slici 1.11 prikazani su vremenski oblici a) slučajnog modulišućeg signala – govornog signala dobijenog na izlazu mikrofona, b) nosioca i c) i KAM signala. Sa slike je vidljivo kako modulišuci (složeni) signal mijenja amplitudu nosioca, te kako izgleda dobijeni KAM signal.



**Slika 1.11.** a) Složeni modulišuci govorni signal, b) signal nosilac, c) KAM signal

Kada smo izučavali harmonijsku analizu signala (udžbenik Elektronske komunikacije I, poglavlje 2 – Poruke i signali: vremenska i frekvencijska karakteristika periodičnih i aperiodičnih signala), rekli smo da se svaki složeni signal može razložiti na veliki broj sinusoida, pri čemu svaka sinusoida ima svoju učestanost, odnosno predstavlja harmonik složeno-og signala. Radi jednostavnosti, pretpostavimo da se modulišuci signal sastoji od pet sinusnih komponenti, čije su učestanosti  $f_1, f_2, \dots, f_5$ , a amplitude  $U_1, U_2, \dots, U_5$ . U tom slučaju složeni signal može se predstaviti izrazom:

$$u_m = U_1 \cos 2\pi f_1 t + U_2 \cos 2\pi f_2 t + \dots + U_5 \cos 2\pi f_5 t. \quad (1.14)$$

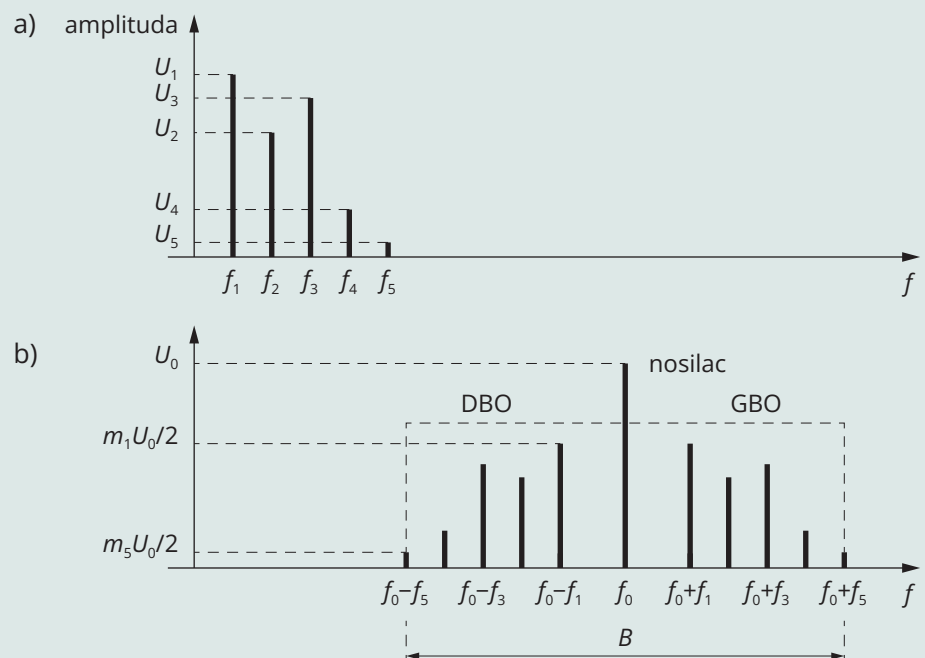
Spektar ovog signala prikazan je na slici 1.12a. Izraz za KAM signal je:

$$u_{AM} = (U_0 + U_1 \cos 2\pi f_1 t + U_2 \cos 2\pi f_2 t + \dots + U_5 \cos 2\pi f_5 t) \cdot \cos 2\pi f_0 t \quad (1.15)$$

Primjenom trigonometrijskog pravila o proizvodu kosinusa, ovaj izraz se može napisati u obliku:

$$\begin{aligned}
u_{AM} = & U_0 \cos 2\pi f_0 t + \frac{m_1}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_1) t \\
& + \frac{m_1}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_1) t \\
& + \frac{m_2}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_2) t \\
& + \frac{m_2}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_2) t \\
& + \dots \\
& + \frac{m_5}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_5) t \\
& + \frac{m_5}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_5) t.
\end{aligned} \tag{1.16}$$

Spektar ovog signala prikazan je na slici 1.12b. Sa slike se vidi da spektar signala ima jedanaest komponenti, za razliku od spektra KAM signala koji je imao samo tri komponente. Pet komponenti koje imaju učestanost veću od  $f_0$ , čine gornji bočni opseg (GBO), a pet komponenti koje imaju učestanost manju od  $f_0$ , donji bočni opseg (DBO). Učestanosti spektralnih komponenti u GBO se dobijaju tako što se centralnoj učestanosti dodaju učestanosti spektralnih komponenti iz spektra složenog slučajnog signala. Zato su učestanosti u GBO, redom od učestanosti  $f_0$ :  $f_0 + f_1, f_0 + f_2, f_0 + f_3, f_0 + f_4$  i  $f_0 + f_5$ . Učestanosti u DBO dobijaju se tako što se od centralne učestanosti oduzmu učestanosti spektralnih komponenti iz spektra složenog slučajnog signala, redom od učestanosti  $f_0$ :  $f_0 - f_1, f_0 - f_2, f_0 - f_3, f_0 - f_4$  i  $f_0 - f_5$ .



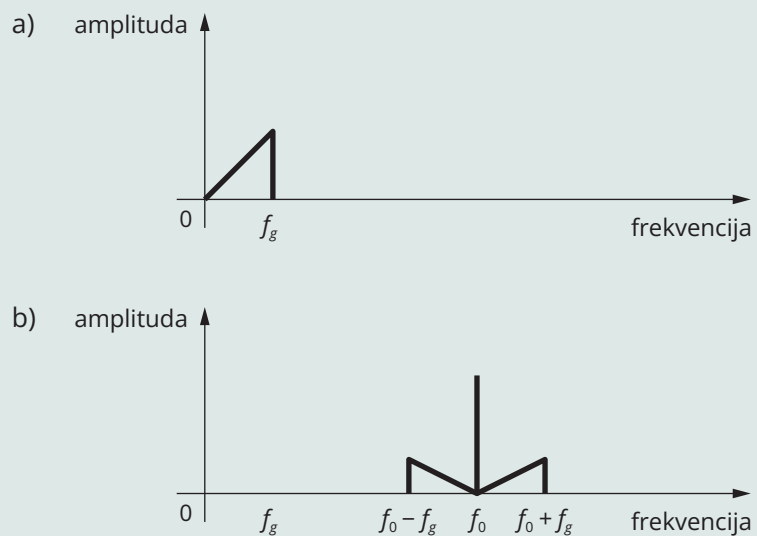
**Slika 1.12.** a) Spektar modulišućeg signala, b) spektar KAM signala



U realnom slučaju, složeni signal ima mnogo veći broj sinusnih komponenti. Ako je taj broj  $n$ , onda je ukupan broj harmonika u spektru KAM signala  $2n + 1$ :  $n$  harmonika nalazi se u GBO,  $n$  harmonika u DBO i jedna centralna komponenta na frekvenciji  $f_0$  (znači, ukupno  $2n + 1$  spektralnih komponenti).

Širina spektra KAM signala sa slike 1.12 iznosi  $B = 2f_s$ , gdje je  $f_s$  najviša učestanost u spektru modulišućeg signala. U opštem slučaju, ako je najviša učestanost komponente modulišućeg signala  $f_m$ , onda je širina spektra KAM signala  $B = 2f_m$ .

Spektri složenog modulišućeg i KAM signala mogu se pojednostavljeno prikazati kao na slici 1.13.



**Slika 1.13.** a) Pojednostavljen spektar modulišućeg i b) KAM signala

Spektar složenog modulišućeg signala prikazan je na slici 1.13a u obliku pravouglog trougla, pri čemu veličina ordinate ne označava amplitudu spektralne komponente, već naznačava da veća ordinata odgovara komponenti veće učestanosti. Spektar modulišućeg signala ograničen je od 0 do granične učestanosti  $f_g$ , što odgovara složenom slučajnom signalu, kao što je govorni signal. Teorijski posmatrano, spektar govornog signala na izlazu mikrofona je beskonačno širok, jer se može predstaviti kao zbir beskonačnog broja sinusnih signala malih amplituda i bliskih učestanosti. S obzirom na to da se ukupna predajna snaga signala govora dobija kao zbir snaga svih njenih spektralnih komponenti, za prenos takvog signala bila bi potrebna beskonačna predajna snaga, koju je u praksi nemoguće ostvariti. Zbog toga se signal ograničava do neke granične učestanosti  $f_g$ , do čije se vrijednosti nalazi najveći dio njegovih spektralnih komponenti. Spektar KAM signala prikazan je na slici 1.13b. Sa slike se može zaključiti da je i u ovom slučaju svaka komponenta u spektru KAM signala nastala pomjeranjem odgovarajućih komponenti iz spektra modulišućeg signala u oblast visokih učestanosti, oko učestanosti signala nosioca  $f_0$ .

## PRIMJER 1.3 ▶

Najviša učestanost u spektru muzičkog signala jeste 15 kHz. Izračunati širinu spektra ovog signala ako je amplitudski modulisan.

**Rješenje:**  $B = 2f_m = 2 \cdot 15 \text{ kHz} = 30 \text{ kHz}$ . ■

### Primjer iz prakse

Međunarodnim konvencijama usvojeno je da se radio-stanicama koje emituju program na dugim, srednjim i kratkim talasima (signali koji se emituju sa različitim talasnim dužinama, koji su u određenim opsezima frekvencija), dodijeli na raspolaganje opseg od 9 kHz. To praktično znači da zvučna učestanost koja se prenosi na tim talasnim dužinama ne smije da bude veća od  $f_m = 4,5 \text{ kHz}$ .

Osim KAM signala, postoji još nekoliko vrsta amplitudski modulisanih signala. Oni se međusobno razlikuju po tome koji se karakteristični dio spektra modulisanog signala prenosi.

### 1.2.2. AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO)

Analizirajmo prenos nosioca kod KAM signala. Dio snage predajnika troši se na emitovanje signala nosioca. To je srednja snaga signala nosioca, i pokazuje se da je ona proporcionalna sa kvadratom njegove amplitude  $U_0$ :

$$P_0 = \frac{U_0^2}{2R}, \quad (1.17)$$

gdje je  $R$  otpornost potrošača na koji se vodi AM signal ili otpor antene.

Dio snage predajnika troši se i na prenos bočnih komponenti. Kako su amplitude bočnih komponenti  $\frac{m}{2}U_0$ , onda se i za njihovo emitovanje troši dio snage predajnika:

$$P_1 = 2 \frac{\left(\frac{m}{2}U_0\right)^2}{2R}. \quad (1.18)$$

Iz ovih izraza lako se dobija da je

$$\frac{P_0}{P_1} = \frac{2}{m^2}. \quad (1.19)$$

Ako se uzme da je prosječna vrijednost stepena modulacije pri AM prenosu  $m = 0,5$ , imamo da je odnos srednje snage signala nosioca i srednje snage signala obje bočne komponente:

$$\frac{P_0}{P_1} = 8.$$

Dakle, predajnik troši osam puta veću snagu na emitovanje nosioca, nego na emitovanje oba bočna opsega. Kako nosilac ne nosi informaciju, a na njegov prenos troši se znatan dio snage predajnika, onda je razumna ideja da se prenose samo bočni opsezi bez nosioca. Ova vrsta modulacije naziva se amplitudska modulacija sa dva bočna opsega (AM-2BO) ili DSB (engl. *double sideband*).

Na slici 1.14 prikazani su talasni oblici signala u slučaju modulacije pri kojoj se dobija AM-2BO signal.

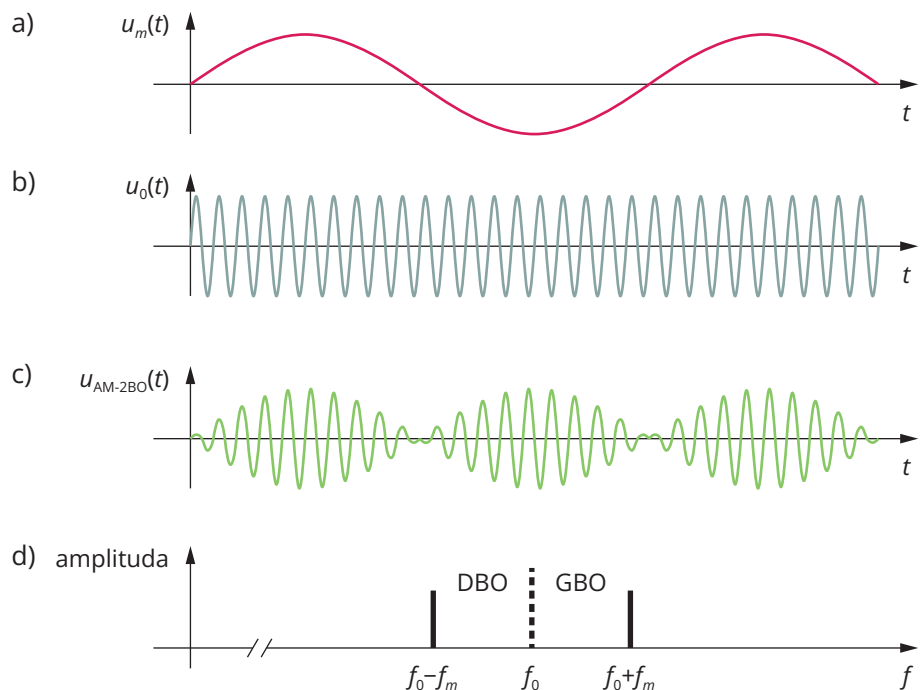
Ako je nosilac dat izrazom:  $u_0 = U_0 \cos 2\pi f_0 t$ , a modulišući signal izrazom  $u_m = U_m \cos 2\pi f_m t$ , onda je AM-2BO dat izrazom:

$$u_{\text{AM-2BO}} = u_m(t) \cdot u_0(t) = U_0 \cos 2\pi f_0 t \cdot U_m \cos 2\pi f_m t. \quad (1.20)$$

Primjenom trigonometrijskog identiteta proizvoda kosinusa, izraz za signal AM-2BO može se napisati u obliku:

$$u_{\text{AM-2BO}} = \frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 + f_m) t + \frac{m}{2} U_0 \cos 2\pi (f_0 - f_m) t. \quad (1.21)$$

Prema ovom izrazu, spektar AM-2BO signala izgleda kao na slici 1.14d. Isprekidanom linijom označena je komponenta nosioca koja se ne prenosi, odnosno, kako se kaže u telekomunikacijama, koja je **potisnuta**.



**Slika 1.14.** Vremenski oblici AM-2BO signala: a) modulišući signal, b) nosilac, c) AM-2BO signal, d) spektar AM-2BO signala

## NAPOMENA

Opsezi učestanosti su veoma važan i ograničen prirodan resurs. Broj učestanosti je konačan i ograničen. Kada ne bi postojalo adekvatno planiranje, upravljanje i koordinacija, signali različitih korisnika međusobno bi se ometali, dolazilo bi do preklapanja signala i zagušenja u radio-komunikacionom saobraćaju. Drugim riječima, radio-frekvencijski spektar postao bi neupotrebljiv za komunikaciju. Zbog toga države vrše regulaciju i upravljanje spektrom.



### Veza sa drugim modulima

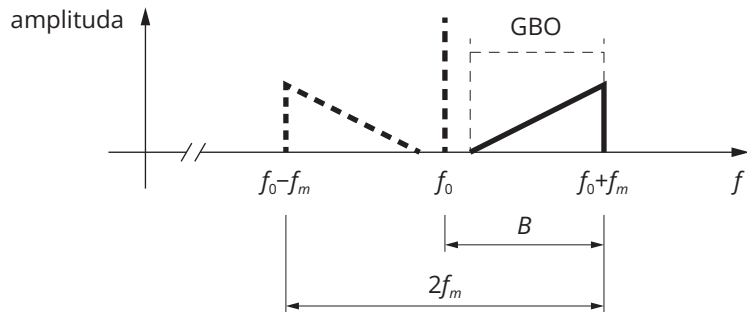
Obnovi usvojene sadržaje iz udžbenika Elektronske komunikacije I, gdje su filtri detaljno objašnjeni.

## 1.2.3. AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO)

Posmatranjem spektra AM-2BO signala možemo uočiti da su sve komponente modulišućeg signala, a to znači i potpuna informacija koju ovaj signal predstavlja, sadržane i u donjem i u gornjem bočnom opsegu. To znači da se nijedan dio informacije neće izgubiti ako se jedan od ova dva bočna opsega ukine. Ukidanjem jednog bočnog opsega smanjuje se za polovinu širina spektra potrebna za prenos AM signala sa oba bočna opsega. Ovo je veoma važna činjenica, jer je značajna ušteda na širini propusnog opsega sistema za prenos.

AM signal kojem su ukinuti i nosilac i jedan bočni opseg, naziva se AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO) ili SSB signal (engl. *single sideband*). Ovaj signal najjednostavnije je dobiti propuštanjem AM-2BO signala kroz filter propusnik opsega učestanosti čija je donja granična učestanost  $f_d = f_0$ , a gornja  $f_g = f_0 + f_m$ . U ovim izrazima  $f_0$  je učestanost nosioca, a  $f_m$  maksimalna učestanost komponenata spektra modulišućeg signala. AM-1BO signal, dobijen na ovaj način, predstavlja signal kojim se prenosi gornji bočni opseg. Za generisanje ovakvih AM signala u jednom bočnom opsegu, potrebni su veoma kvalitetni, odnosno idealni filtri. Pravilnim izborom propusnog opsega filtra može se eliminisati donji ili gornji bočni opseg AM signala.

Na slici 1.15 predstavljen je spektar složenog slučajnog signala pri AM modulaciji u gornjem bočnom opsegu. Isprekidanim linijama označeni su donji bočni opseg i nosilac, koji se ne prenose, odnosno koji su potisnuti.



Slika 1.15. Spektar AM-1BO/GBO signala

U slučaju da se AM-1BO signal propusti kroz filter propusnik opsega učestanosti čija je donja granična učestanost  $f_d = f_0 - f_m$ , a gornja  $f_g = f_0$ , tada signal AM-1BO ima samo donji bočni opseg.

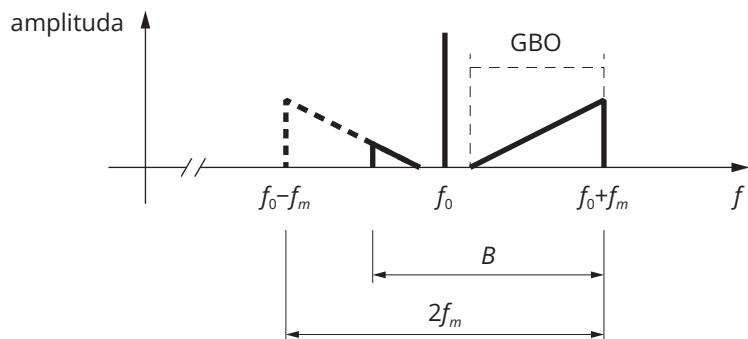
## 1.2.4. AM signal sa nesimetričnim bočnim opsegom (AM-NBO)

Da bi se dobio AM-1BO signal iz KAM signala, potreban je filter propusnik opsega učestanosti kako bi se potisnuli nosilac i jedan bočni opseg.

Međutim, ovaj filtar nije lako ostvariti u praksi, pogotovu u slučajevima kada modulišući signal sadrži komponente niskih učestanosti. Osim toga, kao što ćemo u daljem izlaganju vidjeti, za demodulaciju AM signala potrebno je imati i nosilac, koji je, ako se ne prenosi, potrebno rekonstruisati. Ovo može da bude težak zadatak.

Iz navedenih razloga, kada je širina propusnog opsega od velikog značaja (kao što je npr. u televiziji), koristi se AM signal kod kojeg je jedan bočni opseg djelimično potisnut. Ovakvi signali nazivaju se AM signali sa nesimetričnim bočnim opsegom (AM-NBO).

U praksi se obično potiskuje 75% donjeg bočnog opsega, pa se pored nosioca i gornjeg bočnog opsega, prenosi i četvrtina donjeg. Tada je širina spektra AM-NBO signala  $B = 1,25f_m$ , gdje je  $f_m$  najviša učestanost spektra modulišućeg signala. Na slici 1.16 prikazan je izgled spektra složenog AM-NBO signala. Isprekidanom linijom označen je dio spektra koji se ne prenosi.

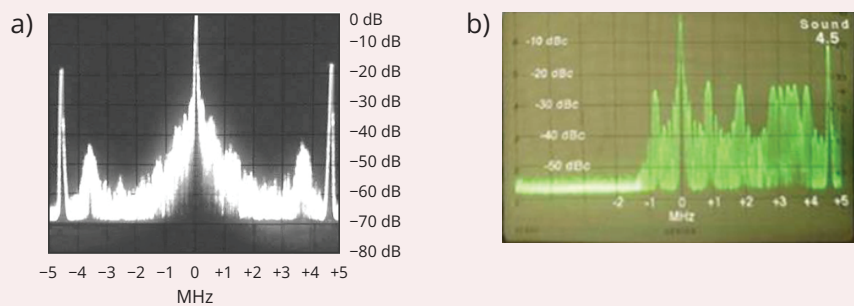


Slika 1.16. Spektar AM-NBO signala

### NAPOMENA

#### Spektri AM signala snimljeni analizatorom spektra

Na slici 1.17 prikazani su spektri AM-2BO, po 4,4 MHz sa svake strane nosioca (slika a), i AM-NBO, čitav gornji bočni opseg od 4,5 MHz i 1,25 MHz donjeg bočnog opsega signala (slika b), snimljeni analizatorom spektra.



Slika 1.17. a) AM-2BO i b) AM-NBO signali prikazani analizatorom spektra

## NAPOMENA

Amplitudski modulatori, koji se obrađuju u nastavku, uglavnom više nemaju neku praktičnu primjenu, i jedino imaju teorijski značaj. Teorijski značaj ogleda se u tome što razumijevanje principa rada amplitudskih modulatora pomaže u razumijevanju principa rada svih modulatora.

# 1.3. Postupak dobijanja amplitudski moduliranih signala

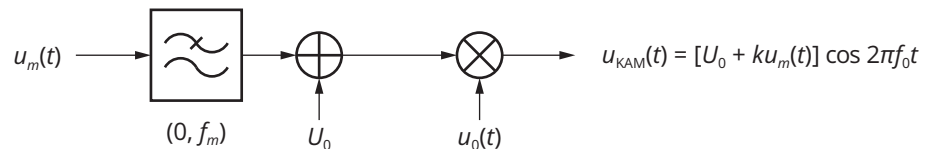
AM signali dobijaju se u električnim sklopovima koji se nazivaju **amplitudski modulatori**. Postoji više varijanti amplitudskih modulatora.

## 1.3.1. KAM i AM-2BO modulator

Skiciramo blok-šemu amplitudskog modulatora kojim se dobijaju signali KAM i AM-2BO. Da bismo skicirali šemu KAM modulatora, prisjetimo se izraza za KAM signal:

$$u_{\text{KAM}} = (U_0 + kU_m \cos 2\pi f_m t) \cdot \cos 2\pi f_0 t.$$

KAM signal se, u opštem slučaju, dobija kao proizvod dva izraza. Jedan izraz predstavlja zbir amplitude nosioca i složenog modulišućeg signala, dok drugi izraz predstavlja visokofrekvencijski signal na učestanosti signala nosioca  $f_0$ .



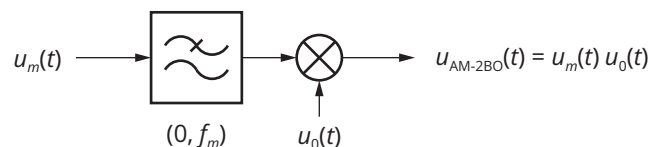
Slika 1.18. Blok-šema KAM modulatora

Blok-šema KAM modulatora prikazana je na slici 1.18. NF filter služi da ograniči učestanost složenog modulišućeg signala koji se sastoji, kao što smo ranije napomenuli, od velikog broja sinusnih signala, na vrijednost  $f_m$ , odnosno da odsiječe sve harmonike čija vrijednost prevazilazi maksimalnu – graničnu vrijednost  $f_m$ . Modulišući signal sabira se sa amplitudom nosioca, u električnom kolu – **sabiraču**. Dobijeni signal vodi se na sljedeći električni sklop – **množač**, u kojem se množi sa signalom nosioca. Signal nosioca dobija se u VF oscilatornom kolu.

Blok-šemu AM-2BO modulatora skiciramo na osnovu izraza za AM-2BO signal:

$$u_{\text{AM-2BO}} = u_m(t) \cdot u_0(t) = U_0 \cos 2\pi f_0 t \cdot U_m \cos 2\pi f_m t.$$

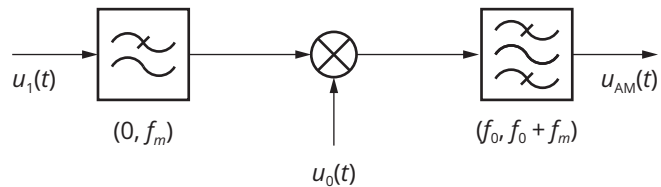
Analizom, sličnoj prethodnoj za KAM signal, dolazimo do blok-šeme modulatora za dobijanje AM-2BO signala, prikazane na slici 1.19.



Slika 1.19. Blok-šema AM-2BO modulatora

## 1.3.2. AM-1BO modulator

Blok-šema modulatora za dobijanje AM-1BO signala realizuje se tako što se šemi AM-2BO modulatora doda filter propusnika opsega učestanosti, koji propušta samo jedan od dva bočna opsega. Blok-šema modulatora za dobijanje AM-1BO signala realizuje se tako tako što se na izlazu modulatora za dobijanje AM-2BO signala doda filter propusnik opsega učestanosti koji propušta gornji bočni opseg i nosioca. Na slici 1.20 prikazana je blok-šema AM-1BO modulatora:



Slika 1.20. Blok-šema AM-1BO modulatora

Na slici 1.20 prikazana je blok-šema AM modulatora, gdje se modulacija vrši u gornjem bočnom opsegu. Modulišući signal je složen slučajni signal u frekventijskom opsegu od 0 do  $f_m$ . NF filter na ulazu AM modulatora ograničava spektralne komponente složenog signala u opsegu do  $f_m$ . Tako filtrirani niskofrekvencijski signal množi se sa signalom nosioca, čime se dobija spektralni dijagram u dva bočna opsega. Pošto nema sabirača na ulazu, to nema na izlazu modulatora ni spektralne komponente signala nosioca  $f_0$ . Modulirani signal filtrira se u dobijenim granicama i vodi na filter propusnik opsega, koji propušta modulirani signal u opsegu od  $f_0 - f_m$  do  $f_0 + f_m$  bez centralne komponente signala nosioca  $f_0$ . Da bi se modulacija izvršila u gornjem bočnom opsegu, na izlaz prethodnog filtra propusnika opsega učestanosti veže se drugi filter propusnik opsega učestanosti, koji propušta samo gornji bočni opseg od  $f_0$  do  $f_0 + f_m$ , čime se dobija spektar AM signala samo u gornjem bočnom opsegu, koji nosi korisni signal. Slično se dobija AM-1BO u donjem bočnom opsegu.

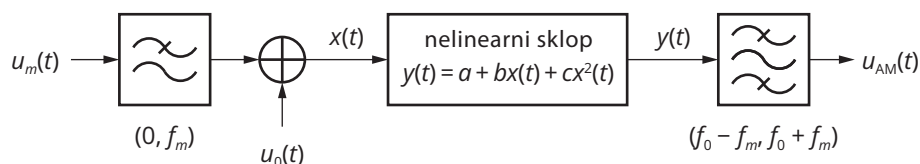
### NAPOMENA

Električna šema prikazuje povezane električne elemente sa ulaznim i izlaznim naponskim signalima, gdje se može uočiti uloga pojedinih elemenata u električnom kolu i način njihovog rada. Za razliku od električne, blok-šema prikazuje pojedine elemente u šemi blokovski, gdje se može vidjeti uloga pojedinih blokova. U blokovskoj šemi ne vrši se analiza električne šeme bloka.

Iz navedene analize može se zaključiti da se svi amplitudski modulatori ostvaruju množenjem nosioca i modulišućeg signala, koje se vrši u množaču. Kako množač predstavlja nelinearni električni element, zaključujemo da je AM modulatorima zajedničko da se svi oni realizuju pomoću **nelinearnog sklopa**. Prenosna karakteristika nelinearnog sklopa jeste nelinearna funkcija, čiji grafik nije prava već neka kriva linija. Primjer nelinearne karakteristike jeste kvadratna funkcija, čiji je grafik kriva, odnosno parabola. U ovom slučaju izlazni signal  $y(t)$  mijenja se po kvadratnom zakonu u odnosu na ulazni signal  $x(t)$ .

Blok-šema AM modulatora sa nelinearnim sklopom prikazana je na slici 1.21. Prenosna funkcija nelinearnog sklopa jeste kvadratna funkcija ulaznog signala  $x(t)$ . Koeficijenti kvadratne funkcije  $a$ ,  $b$  i  $c$  su konstante.

Filter propusnik učestanosti, priključen na izlaz nelinearnog elementa, ima ulogu da propusti učestanosti iz spektra AM signala.



Slika 1.21. Blok-šema AM modulatora sa nelinearnim elementom

## PRIMJER 1.4 ▶

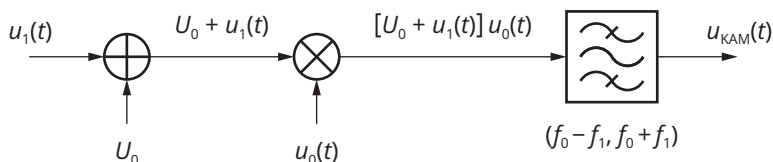
Nacrtati blok-šemu KAM modulatora ako je modulišući signal sinusni, učestanosti  $f_1$ , i ako se pri AM modulaciji prenosi signal nosilac, učestanosti  $f_0$ .

**Rješenje:** Pošto se modulacija vrši u oba bočna opsega sa centralnom komponentom signala nosioca  $f_0$ , blok-šema će imati sabirač i množač, kao i filter propusnik opsega učestanosti čiji će zadatak biti da propusti AM signale u oba bočna opsega. Blok-šema KAM modulatora sa centralnom frekvencijom  $f_0$  prikazana je na slici 1.22.

### NAPOMENA

#### Nelinearni elementi

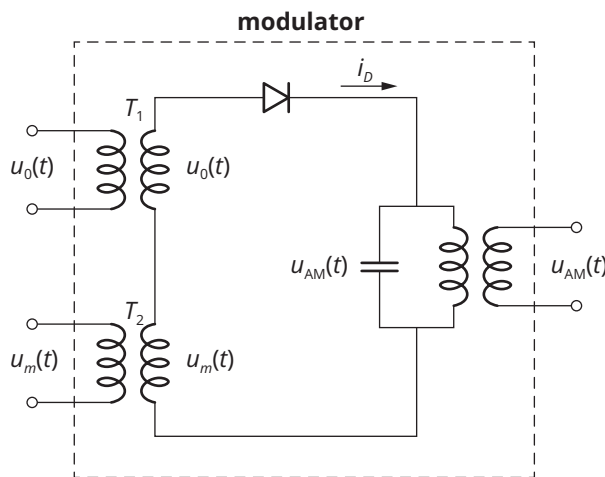
Nelinearni su elementi električnih šema kod kojih međusobna zavisnost struje i napona nije linearna (ne važi Ohmov zakon). Primjer nelinearnih elemenata jesu diode i tranzistori.



Slika 1.22. Blok-šema KAM modulatora

### 1.3.3. AM modulator sa diodom

Princip rada amplitudskih modulatora prikazaćemo na primjeru električnog kola u kojem je nelinearni element dioda. Takvo kolo prikazano je na slici 1.23.



Slika 1.23. AM modulator sa diodom





## Veza sa drugim modulima

Obnovi usvojene sadržaje iz Osnova elektrotehnike i Osnova elektronike za prvi razred, gdje su detaljno objašnjeni transformatori, oscilatorna kola, rezonantne učestanosti i diode.

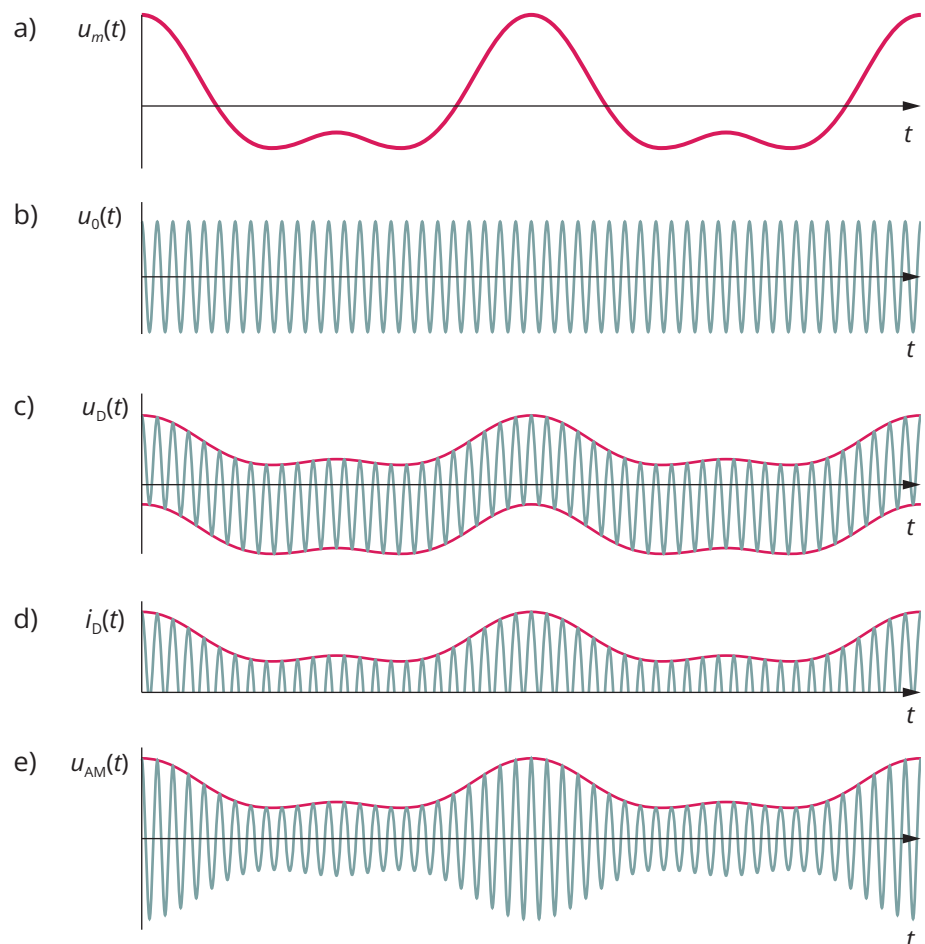
### NAPOMENA

Signal AM-2BO dobija se kao proizvod dviju funkcija:  $u_m(t)$  koja predstavlja modulišući signal, i  $u_0(t)$  koja predstavlja nosilac. AM-1BO signal može se dobiti iz AM-2BO signala potiskivanjem jednog bočnog opsega, dok se KAM signal može dobiti tako što se AM-2BO signalu doda nosilac. Dakle, svaki AM signal može se dobiti množenjem modulišućeg signala sa signalom nosioca. Stoga se modulacija zasnovana na ovom principu naziva **produktna modulacija**, a sklopovi pomoću kojih se ona realizuje nazivaju se **produktivnim (koherentnim) modulatorima**.

Ulogu sabiračkog sklopa iz prethodnih šema imaju transformatori  $T_1$  i  $T_2$ , na čije se ulaze dovodi modulišući signal i signal nosioca. Na red sa diodom vezano je paralelno oscilatorno kolo, čija je rezonantna učestanost jednaka učestanosti nosioca  $f_0$ .

Na slici 1.24 prikazani su talasni oblici signala u modulatoru sa slike 1.23. Napon na ulazu u diodu jeste  $u_0(t) + u_m(t)$ , slika 1.24c. Ovaj napon prouzrokuje struju diode  $i_D$ , koja ima oblik kao na slici 1.24d. Pošto dioda provodi jedino u slučaju kada je napon anode veći od napona na katodi, onda struja diode ima impulsni oblik. Dakle, amplituda strujnih impulsa diode mijenja se u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala.

Struja diode protiče kroz rezonantno oscilatorno kolo, rezonantne učestanosti  $f_0$ . Pod dejstvom impulsa sa diode, u kolu počinju oscilacije. Na krajevima oscilatornog kola dobija se napon  $u_{AM}(t)$ , prikazan na slici 1.24e, čija se amplituda mijenja u ritmu promjena amplitude strujnih impulsa, a to znači – u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala.



**Slika 1.24.** Talasni oblici signala modulatora sa slike 1.23: a) modulišući signal, b) signal nosilac, c) napon na ulazu u diode, d) struja kroz diodu, e) AM signal na krajevima oscilatornog kola

## 1.4. Demodulacija amplitudski moduliranih signala

Ako se telekomunikacionim sistemom prenosi korisna informacija (kao što je npr. govor, muzika, video i slično), ona se iz signala visoke učestanosti (VF signala) dobijenog u postupku modulacije na strani predajnika, ne može direktno prepoznati na strani prijemnika. Slušalac ne može čuti signale visokih frekvencija, niti gledalac prepoznati sliku utisnutu u nosioca visoke učestanosti. Zbog toga je potrebno u prijemniku sprovesti postupak obrnut postupku modulacije u predajniku: neophodno je iz VF signala izdvojiti korisnu informaciju, te signal vratiti u prvobitan, prepoznatljiv za korisnika. Taj postupak se naziva **demodulacija**.

Demodulacija je postupak kojim se u prijemniku iz moduliranog signala izdvaja informacija, odnosno signal koji je u predajniku pomjeren iz osnovnog u transponovani opseg učestanosti.

Demodulacijom AM signala izdvaja se obvojnica ili anvelopa AM signala, što predstavlja korisni, odnosno modulišući signal.

Demodulacija je proces inverzan modulaciji: signal se iz oblasti visokih frekvencija vraća nazad u osnovni opseg, i obnavlja mu se originalni vremenski oblik i originalni spektar, kakav je imao prije modulacije.

Modulacija i demodulacija signala realizuju se procesom množenja dva signala u jednom sklopu, u množaču. Jedan od signala za množenje, u oba slučaja, jeste signal nosilac. Signal nosilac je, kao što je ranije napomenuto, sinusna funkcija visoke frekvencije (VF signal). Znači, ista sinusna funkcija koristi se kao signal nosilac i u predajnom i u prijemnom uređaju. U zavisnosti od toga sa kojim se signalom množi signal nosilac, vrši se modulacija ili demodulacija signala. Za razliku od modulacije, gdje se signal nosilac množi sa modulišućim signalom (postupak modulacije vrši se u predajniku), demodulacija signala vrši se tako što se množi amplitudski modulirani (AM) signal sa istim signalom nosiocem, kao kod procesa modulacije (postupak demodulacije vrši se u prijemniku).

Postoje dva načina da se iz AM signala rekonstruiše modulišući signal. U zavisnosti od toga da li se na prijemu koristi pomoćni signal za proces demodulacije, razlikuju se **sinhrona** (koherentna ili produktna) demodulacija i **asinhrona** demodulacija.

Sinhrona demodulacija primjenljiva je za sve tipove amplitudskih modulacija i podrazumijeva korišćenje pomoćnog signala koji se generiše u kolima

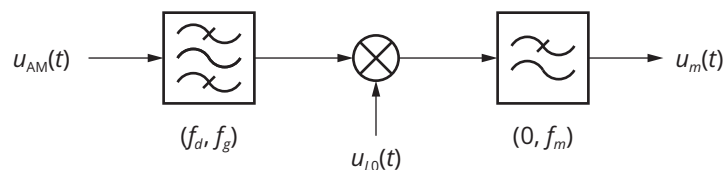
prijemnika. Asinhrona demodulacija primjenljiva je za KAM modulaciju, i kod nje nije potreban pomoćni signal na prijemu.

### 1.4.1. Sinhrona demodulacija AM signala

Sinhrona demodulacija AM signala odvija se u prijemniku sinhrono, odnosno istovremeno sa AM modulacijom u predajniku. Da bi ova dva procesa bila istovremena, moraju se uskladiti. Usklađivanje se vrši pomoćnim signalom, koji se generiše u samom prijemniku, i koji je iste učestanosti kao signal nosioca. Pošto se generiše lokalno, u samom prijemniku, sklop koji ga generiše naziva se **lokalni oscilator**.

Zbog čega je potrebno da pomoćni signal bude iste učestanosti kao i signal nosioca? Prisjetimo se da se u modulatoru predajnika modulišući signal množi sa signalom nosioca. Da bi se u demodulatoru iz modulisanog signala dobio modulišući, potrebno je izvršiti inverznu operaciju, koja se može realizovati na isti način kao i u prijemniku – množenjem sa signalom nosioca. Signal nosilac generiše lokalni oscilator. Lokalno generisani signal nosilac mora biti u sinhronizaciji sa prenesenim nosećim signalom da pri demodulaciji ne bi došlo do izobličenja.

Osnovni oblik sinhronog demodulatora isti je za sve tipove AM signala: KAM, AM-2BO, AM-1BO i AM NBO. Na slici 1.25 prikazana je blok-šema sinhronog demodulatora AM signala.



Slika 1.25. Blok-šema sinhronog demodulatora AM signala

Na ulaz prijemnika dolazi AM signal, čija je učestanost nosioca  $f_0$ , a maksimalna učestanost u spektru složenog modulišućeg signala  $f_m$ . Filtar propusnik opsega učestanosti na ulazu u prijemnik, izdvaja opseg učestanosti složenog modulisanog signala koji je jednak razlici gornje i donje granične učestanosti filtra, odnosno propusni opseg  $B$  prilagođen mu je širini spektra ulaznog signala.

Ukoliko se radi o KAM i AM-2BO signalu, granične učestanosti filtra su  $f_d = f_0 - f_m$  i  $f_g = f_0 + f_m$ . Ako se radi o AM-1BO signalu sa gornjim bočnim opsegom, granične učestanosti filtra su  $f_d = f_0$  i  $f_g = f_0 + f_m$ , a ako se radi o AM-1BO signalu sa donjim bočnim opsegom, granične učestanosti filtra su  $f_d = f_0 - f_m$  i  $f_g = f_0$ .

Zaključujemo da propusni opseg ulaznog filtra određuje tip sinhronog demodulatora AM signala.

## NAPOMENA

Iako KAM signal ima signal nosilac, u produktni demodulator ipak mora da se dovede i signal iz lokalnog oscilatora. Učestanost i faza tog signala moraju da budu isti kao i učestanost i faza signala nosioca, pa se i demodulacija KAM signala obavlja pomoću sklopa, čija je blok-šema prikazana na slici 1.25.

U prijemniku se nalazi sklop, u kojem se množi modulirani signal sa VF signalom. VF signal se takođe generiše u prijemniku lokalnim oscilatorom, čija je učestanost  $f_o$ . Množenjem ova dva signala dobija se modulišući signal. Ovaj sklop isti je za sve tipove sinhronog demodulatora AM signala.

Navedeni sklop se, po tome što obavlja funkciju množenja isto kao i produktni modulator, naziva **produktni demodulator**. Produktni demodulator može da bude istog oblika kao i produktni modulator. U tom slučaju demodulirani signal imaće više neželjenih komponenti koje se mogu eliminisati NF filtrom. NF filter se postavlja na izlazu produktnog demodulatora čija je granična učestanost  $f_m$ .

## 1.4.2. Asinhrona demodulacija AM signala

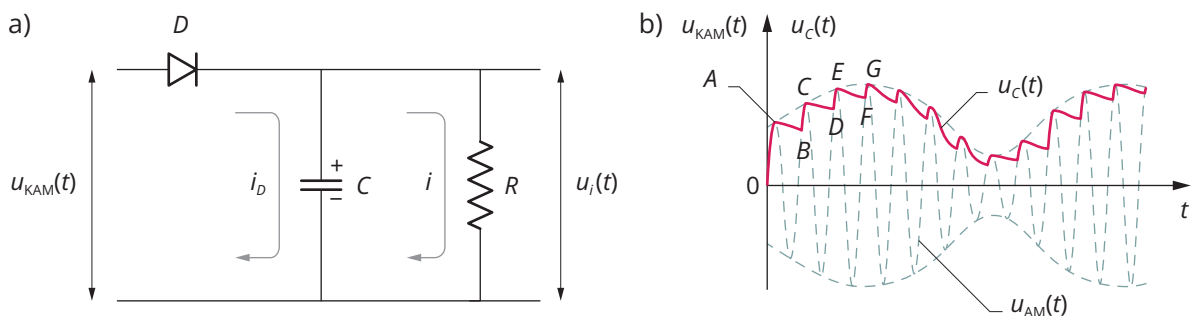
Asinhrona demodulacija AM signala podrazumijeva postupak kojim se modulišući signal izdvaja iz modulisanog nosioca bez upotrebe lokalnog oscilatora. Postupak asinhronne demodulacije AM signala najčešće se naziva **detekcija AM signala**.

Sklop kojim se izvodi detekcija AM signala naziva se **AM detektor, diodni detektor** ili **detektor anvelope**. Svaki AM detektor sadrži nelinearni električni element i filter propusnik niskih učestanosti. Filter se uvijek realizuje otpornicima i kondenzatorima (RC filtri), dok se kao nelinearni element najčešće koristi dioda.

Asinhrona demodulacija detektorom anvelope može se primijeniti samo na KAM signale, jer je za njenu realizaciju neophodno prisustvo signala nosioca, što signali AM-1BO i AM-2BO nemaju. Za polarizaciju diode koristi se prenošeni signal nosilac.

### 1.4.2.1. Diodni detektor

Električna šema diodnog detektora prikazana je na slici 1.26. Detektor se sastoji od diode redno vezane na RC filter, koji čini paralelna veza kondenzatora i otpornika. Na ulazu u detektor dovodi se KAM signal,  $u_{KAM}(t)$ , dok se na izlazu detektora, odnosno na kondenzatoru i otporniku, dobija napon  $u_c(t) = u_r(t) = u_i(t)$ . Struja diode označena je sa  $i_D$ .



Slika 1.26. Detektor anvelope: a) električna šema, b) vremenski oblici signala

Dioda  $D$  provodi struju kada je napon između njene anode i katode pozitivan. U suprotnom, dioda je zakočena, i struja kroz nju jednaka je nuli. Kako je napon između anode i katode jednak razlici  $u_{\text{KAM}} - u_i$ , onda dioda provodi struju kada je  $u_{\text{KAM}} > u_i$ .

Sve dok nema napona na ulazu kola, kondenzator je prazan, i napon na njemu jednak je nuli. Pojavom i rastom AM signala, odnosno napona  $u_{\text{KAM}}(t)$ , kroz diodu će proteći struja koja će početi da puni kondenzator. Napon na kondenzatoru raste (linija  $OA$  na slici). U trenutku koji odgovara tački  $A$ , ulazni napon i napon na kondenzatoru se izjednače ( $u_{\text{KAM}} = u_i$ ), i dioda se zakoči. Kako zakočena dioda predstavlja prekidač u kolu, kondenzator ostaje bez napona  $u_{\text{KAM}}$ , te počinje da se prazni preko otpornika, strujom pražnjenja  $i$ . Sada se napon na kondenzatoru smanjuje po krivoj  $AB$ . U trenutku koji odgovara tački  $B$ , ulazni napon i napon na kondenzatoru ponovo se izjednače ( $u_{\text{KAM}} = u_i$ ), dioda postaje provodna, i kroz nju teče struja  $i_D$ , koja dopunjava kondenzator. Sada napon na kondenzatoru raste po krivoj  $BC$ . U trenutku koji odgovara tački  $C$ , dioda se ponovo zakoči, kondenzator se prazni, napon mu opada po krivoj  $CD$ , pa se ponovo dopunjava po krivoj  $DE$ , prazni po krivoj  $EF$ , dopunjava po krivoj  $FG$  i tako dalje.

Kao što se vidi sa slike 1.26b, krive pražnjenja i dopunjavanja kondenzatora prate anvelopu KAM signala  $u_{\text{KAM}}(t)$ . Zbog toga se ovaj detektor naziva i **detektor anvelope**. Na taj način ostvarena je detekcija KAM signala.

U tabeli 1.1 upoređene su najvažnije karakteristike različitih načina obrade AM signala.

**Tabela 1.1.** Poređenje karakteristika AM signala

<b>AM-2BO</b>	jednostavna realizacija modulatora
<b>KAM</b>	jednostavna realizacija demodulatora
<b>AM-1BO</b>	povećana energetska efikasnost manje zauzeće spektra složena realizacija modulatora/demodulatora
<b>AM-NBO</b>	uži propusni opseg od KAM signala prenosi se nosilac – pojednostavljena demodulacija najbitnije komponente signala prenose se u oba bočna opsega

## 1.5. Uticaj šuma na kvalitet prenosa amplitudski modulisanih signala

Rekli smo da duž telekomunikacionog sistema postoji šum, čije se prisustvo ne može izbjeći. Svaki telekomunikacioni sistem sastavljen je od niza funkcionalnih sklopova i prenosnog puta. Signal koji se ovim sistemom prenosi, u različitim tačkama sistema ima različite vrijednosti. Ako je suviše slab, onda se pojačava u pojačavačkim kolima; ako je suviše snažan, onda se slabi u oslabljivačima. Međutim, sa stanovišta šuma ovo ima i dodatne posljedice. Ako se pojačava koristan signal, pojačavaće se i šum, jer se on uvijek javlja u pojačavačkim kolima. Zbog toga u telekomunikacijama nije važan samo intenzitet signala (naravno, pod uslovom da je taj intenzitet dovoljan za njegov korektan prijem), kao ni intenzitet šuma, već je mjerodavan njihov odnos. Odnos signal/šum ( $S/N$ ) predstavlja brojčani kriterijum kojim se izražavaju karakteristike sistema vezane za uticaj šuma na prenos signala.

Odnos signal/šum definiše se kao odnos srednje snage signala i srednje snage šuma.

Najčešće se ovaj odnos izražava u decibelima:

$$\frac{S}{N} [\text{dB}] = 10 \log \frac{P_S}{P_N}, \quad (1.22)$$

gdje je  $\frac{S}{N}$  odnos srednje snage signala i srednje snage šuma u decibelima,

$P_S$  srednja snaga signala, a  $P_N$  srednja snaga šuma. Ako je ovaj odnos visok, onda je kvalitet signala na prijemu takođe visok; ako je pak nizak, onda signal na prijemnoj strani veze može biti maskiran i toliko izobličen šumom da se ne može prepoznati.

Odnos signal/šum treba da bude što je moguće veći, i to se može postići povećanjem snage signala ili, što je teže realizovati, smanjenjem snage šuma.

### KONTROLNO PITANJE **K1.3** ▶

Prejak signal na ulazu u prijemnik prouzrokuje zasićenje njegovih elektronskih komponenti (tranzistora) i signal se izobličava. Da li je dobro, u cilju povećanja odnosa signal/šum, imati koristan signal znatno velike snage?

**Odgovor:** Ne, jer će se koristan signal izobličiti.

Šum i signal se sabiraju. Njihov odnos utiče na domet veze telekomunikacionog sistema. Kod analognih sistema šum se generiše u svim dijelovima prenosnog puta i sabira se sa korisnim signalom, pa se kaže da šum ima kumulativni karakter. Kako se snaga šuma povećava duž veze, onda se maksimalna dužina veze određuje na osnovu veličine generisanog šuma.

Šum je uvijek prisutan u telekomunikacionim sistemima, pa je jedan od prioritarnih zadataka u telekomunikacijama poboljšanje odnosa signal/šum. Da bi se poboljšao odnos  $S/N$ , moraju se detaljno poznavati osobine vrsta signala i njihova otpornost na dejstvo šuma. Odgovarajućom strukturom prijemnika može se uticati da ovaj odnos bude što veći.

Pod signalom se uvijek podrazumijeva prenošeni signal. Međutim, za različite vrste prenošenih poruka različite su i veličine koje opisuju taj signal. Zbog toga je usvojeno da se pod signalom  $S$  u odnosu  $S/N$ , podrazumijeva **test-signal**. Test-signal se posebno definiše za svaku vrstu poruka. Tako, na primjer, u prenosu govora i muzike, test-signal je sinusni test-ton, pa će se pod signalom  $S$  u odnosu  $S/N$  podrazumijevati srednja snaga  $P_s$  ovog tona na izlazu iz prijemnika.

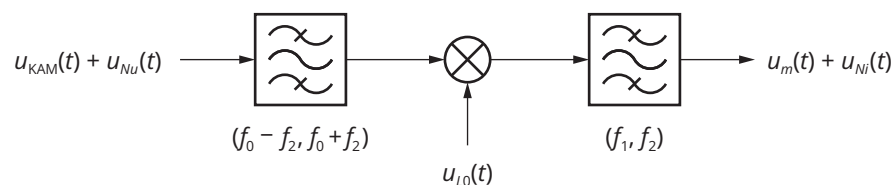
Telekomunikacioni sistem sastoji se od predajnika, prenosnog puta i prijemnika. Važno je znati odnos signal/šum na izlazu prijemnika. Ako se taj odnos zna, onda se može procijeniti uticaj šuma i definisati kvalitet prenosa.

Odnos signal/šum na izlazu prijemnika zavisi od odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik, kao i od postupaka modulacije i demodulacije. Postupci analize odnosa signal/šum zasnovani su na složenom matematičkom aparatu, pa ćemo u ovom odjeljku navesti samo gotove rezultate koji se odnose na uticaj šuma na kvalitet prenosa amplitudski moduliranih signala.

### 1.5.1. Odnos $S/N$ pri prenosu KAM signala u postupku produktne demodulacije

Pretpostavimo da se veza između predajnika i prijemnika ostvaruje KAM signalom, a da se u prijemniku demodulacija obavlja produktnim demodulatorom. Na ulazu prijemnika, ispred produktnog demodulatora, postavlja se filter propusnik opsega učestanosti (slika 1.27). Ako se spektar prenošenog signala nalazi u opsegu učestanosti od  $f_1$  do  $f_2$ , pošto se veza ostvaruje KAM signalom sa nosiocem i dva bočna opsega, ovaj filter ima propusni opseg od  $f_0 - f_2$  do  $f_0 + f_2$ , gdje je  $f_0$  učestanost nosioca.

Na izlaz demodulatora takođe je priključen filter propusnik opsega učestanosti kojim se izdvaja prenošeni signal. Zbog toga su granice njegovog propusnog opsega  $f_1$  i  $f_2$ .



**Slika 1.27.** Blok-šema prijemnika sa produktnim demodulatorom KAM signala

Pored korisnog signala na ulazu u prijemnik, postoji i slučajni šum. On potiče od izvora šuma sa linije prenosa i sopstvenog šuma prijemnika.

**Faktor šuma  $\bar{F}$**  jeste veličina koja vrednuje karakteristike nekog telekomunikacionog sklopa, uređaja ili kompletnog prijemnika.

Faktor šuma je odnos ukupne raspoložive snage šuma na izlazu iz sistema, kada je temperatura izvora šuma na ulazu u sistem jednaka sobnoj temperaturi ( $T = 290$  K), i dijela ove snage koja potiče od samog izvora šuma priključenog na ulaz u sistem.

Pokazuje se da je snaga šuma na izlazu iz prijemnika,  $P_{Ni} = \bar{F}kTB$ , gdje je  $k$  – Bolcmanova konstanta,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K;  $T$  – apsolutna temperatura (u K);  $B$  – opseg učestanosti (u Hz).

Kako  $P_m$  predstavlja snagu obje bočne komponente koje nose informaciju, onda je odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \frac{P_S}{P_{Ni}} = \frac{P_m}{\bar{F}kTB}. \quad (1.23)$$

Ukupan šum na ulazu u demodulator transformiše se u postupku demodulacije u šum na izlazu, koji je sadržan u dva bočna opsega učestanosti, i to od  $f_0 + f_1$  do  $f_0 + f_2$ , i od  $f_0 - f_2$  do  $f_0 - f_1$ , pa će snaga šuma na ulazu u prijemnik biti:

$$P_{Nu} = 2\bar{F}kTB. \quad (1.24)$$

Odnos signal/šum na ulazu u prijemnik će biti:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_u = \frac{P_S}{P_{Nu}} = \frac{P_m}{2\bar{F}kTB} = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{N}\right)_i. \quad (1.25)$$

Zaključujemo:

Pri produktnoj demodulaciji KAM signala, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika dva puta je veći od odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik.



## 1.5.2. Odnos $S/N$ pri prenosu AM-2BO signala

Prenos poruke AM-2BO signalom razlikuje se od prenosa KAM signala jedino po tome što u AM-2BO signalu ne postoji nosilac. Kako ni u KAM signalu nosilac ne nosi informaciju, i kako se i kod prenosa poruke AM-2BO signalom koriste isti filtri kao kod prenosa KAM signala, onda je analiza koja se odnosi na odnos  $S/N$  šum ista za ova dva tipa prenosa.

Iz ovoga se izvodi zaključak da je i u slučaju AM-2BO modulacije odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika isti kao i za KAM signal, odnosno da važi:

Pri demodulaciji AM-2BO signala, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika dva puta je veći od odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik.

## 1.5.3. Odnos $S/N$ pri prenosu AM-1BO signala

Pri prenosu poruka AM-1BO signalom, poruka je sadržana u jednom bočnom opsegu, a u prijemniku se koristi sinhrona demodulacija. Blok-šema prijemnika biće ista onakva kao kod blok-šeme prijemnika KAM signala, osim što ulazni filter propušta opseg učestanosti od  $f_0 + f_1$  do  $f_0 + f_2$  ako se prenosi gornji bočni opseg, odnosno od  $f_0 - f_2$  do  $f_0 - f_1$  ako se prenosi donji bočni opseg.

Što se šuma tiče, ulazni filter propušta samo one komponente šuma koje se nalaze na ulazu u prijemnik u opsegu učestanosti od  $f_0 + f_1$  do  $f_0 + f_2$ .

Analizom sličnom analizi u prethodnim odjeljcima, može se pokazati da:

Pri prenosu poruka AM-1BO signalom, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika jednak je odnosu signal/šum na ulazu u prijemnik.

## 1.5.4. Odnos $S/N$ pri prenosu KAM signala u postupku detekcije anvelope

U slučaju da se prenos informacije vrši signalom tipa KAM, a da se u prijemniku prenošeni signal detektuje detektorom anvelope, na izlazu iz detektora anvelope dobija se napon koji je sastavljen iz dvije komponente: (1) anvelope KAM signala i (2) komponente koja potiče od šuma. Amplituda komponente šuma približno je jednaka amplitudi odgovarajuće komponente

šuma na ulazu u detektor, a učestanost komponente šuma jednaka je razlici učestanosti komponente šuma na ulazu  $f_0 + f_N$  i učestanosti nosioca  $f_0$ .

Na ulazu u detektor takođe postoji i komponenta šuma čija je učestanost  $f_0 - f_N$  pa će se i ona pojaviti na izlazu iz detektora, a njena učestanost će biti  $f_N$ . Odgovarajućom analizom, uz primjenu složenijeg matematičkog aparata, pokazuje se tačnost tvrdnje:

Relacije za odnos signal/šum, u postupku detekcije KAM signala detektorom anvelope, pod uslovom da je na ulazu u prijemnik snaga šuma znatno manja od snage korisnog signala, iste su kao i u postupku sinhronne demodulacije KAM signala.

## Rezime

- Proces obrade signala u kojem se signal transponuje iz svog osnovnog opsega u opseg viših učestanosti, naziva se modulacija signala. Signal koji je nosilac poruke naziva se modulišući signal. Periodični signal, kojim se modifikuju neki osnovni parametri tako da on postaje nosilac originalnog signala, naziva se nosilac. Nosilac modifikovan modulišućim signalom naziva se modulirani signal.
- Kada je modulišući signal kontinualan, onda se ove modulacije nazivaju analogne modulacije. Kada je nosilac u obliku povorke periodično ponavljanih pravougaonih impulsa, onda je riječ o impulsnim modulacijama.
- Razlikujemo tri osnovna oblika modulacije: (1) amplitudska modulacija (AM) – amplituda nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu; (2) frekventijska modulacija (FM) – učestanost nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu; (3) fazna modulacija (PM) – faza nosioca direktno je proporcionalna modulišućem signalu.
- Konvencionalna amplitudska modulacija dva puta povećava širinu opsega amplitudski moduliranog signala. Svakoj komponenti modulišućeg signala odgovaraju dvije komponente moduliranog signala, odnosno dva bočna opsega: donji i gornji bočni opseg.
- AM signal koji ima nosioca i dva bočna opsega naziva se konvencionalno amplitudski modulirani signal, odnosno KAM signal. Osim KAM, postoji još nekoliko vrsta amplitudski moduliranih signala, koji se međusobno razlikuju po tome koji se karakteristični dio spektra moduliranog signala prenosi: AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO), AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO) i AM signal sa nesimetričnim bočnim opsegom (AM-NBO).
- AM signali dobijaju se u električnim sklopovima koji se nazivaju amplitudski modulatori.
- Demodulacija je postupak kojim se u prijemniku iz moduliranog signala izdvaja informacija. U zavisnosti od toga da li se na prijemu koristi pomoćni signal za proces demodulacije, razlikuje se sinhrona (koherentna ili produktna) demodulacija i asinhrona demodulacija. Sinhrona AM demodulacija u prijemniku se odvija sinhrono, odnosno istovremeno sa AM modulacijom u predajniku. Asinhrona demodulacija AM signala podrazumijeva postupak kojim se modulišući signal izdvaja iz moduliranog nosioca bez upotrebe lokalnog oscilatora.
- Odnos signal/šum definiše se kao odnos srednje snage signala i srednje snage šuma. Pri produktnoj demodulaciji KAM signala, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika dva puta je veći od odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik. Pri demodulaciji AM-2BO signala, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika dva puta je veći od odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik. Pri prenosu poruka AM-1BO signalom, odnos signal/šum na izlazu iz prijemnika jednak je odnosu signal/šum na ulazu u prijemnik.

## Manje poznate riječi

koherentan – koji se drži zajedno, skopčan, povezan, spojen; sinhrono – istovremeno; asinhron – vremenski neusklađen, neistovremen.

## Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *M. Filipović: Osnovi telekomunikacija za drugi razred srednjeg obrazovanja za elektrotehničke škole*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.

U knjizi su obrađene osnovne komponente, kola i postupci na kojima počivaju telekomunikacije, što će ti omogućiti lakše praćenje i potpunije razumijevanje materije stručnih predmeta koje izučavaš u školi.

## Zadatak za samostalan rad

Postoje mnogi sajtovi sa video-prikazima osnovnih modulacionih tehnika i njihovim simulacijama. Potraži na Jutjubu video-zapise o razlozima za korišćenje modulacione tehnike, zapise o osnovnim

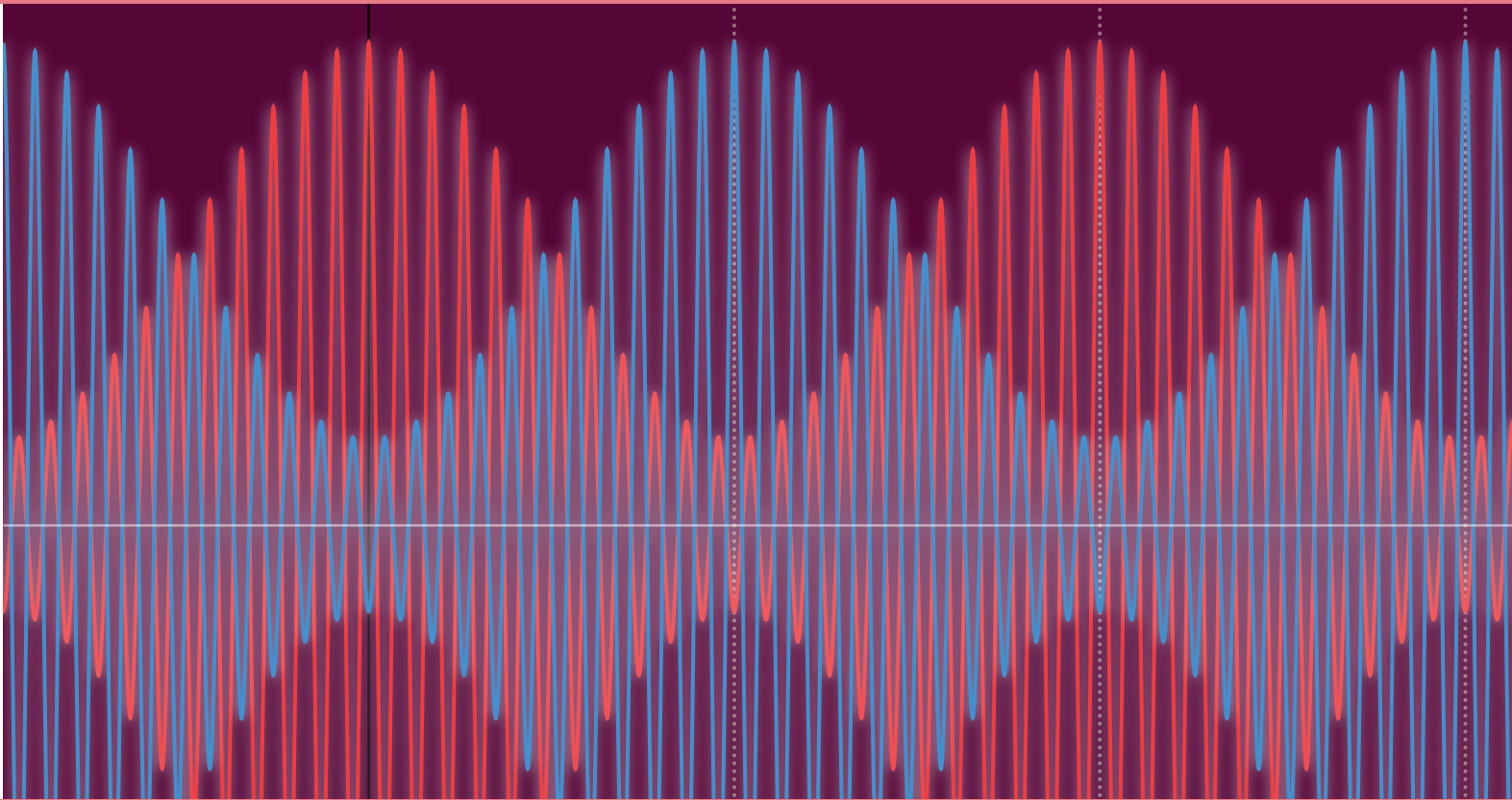
principima modulacionih tehnika, kao i animacije u kojima se prikazuje kako se za različite oblike korisnog signala mijenja talasni oblik AM signala.

## Pitanja za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Opiši ulogu sklopova u blok-šemi realnog primopredajnog telekomunikacionog sistema sa modulatorom i demodulatorom prikazanog na slici 1.1.
2. Koja su tri osnovna oblika analognih modulacija? Po čemu se razlikuju?
3. Objasni postupak dobijanja KAM signala.
4. Navedi načine na koje se može izvršiti demodulacija AM signala, a zatim ih komentariši.
5. Skiciraj diodni detektor anvelope, kao i talasni oblik signala na izlazu detektora.
6. Protumači kako se postupkom produktne demodulacije KAM signala poboljšava odnos signal/šum.
7. Opravdaj tvđenje da se širenjem spektra pri amplitudskoj modulaciji dobija znatno veća otpornost na smetnje pri prijemu signala.

## Zadaci

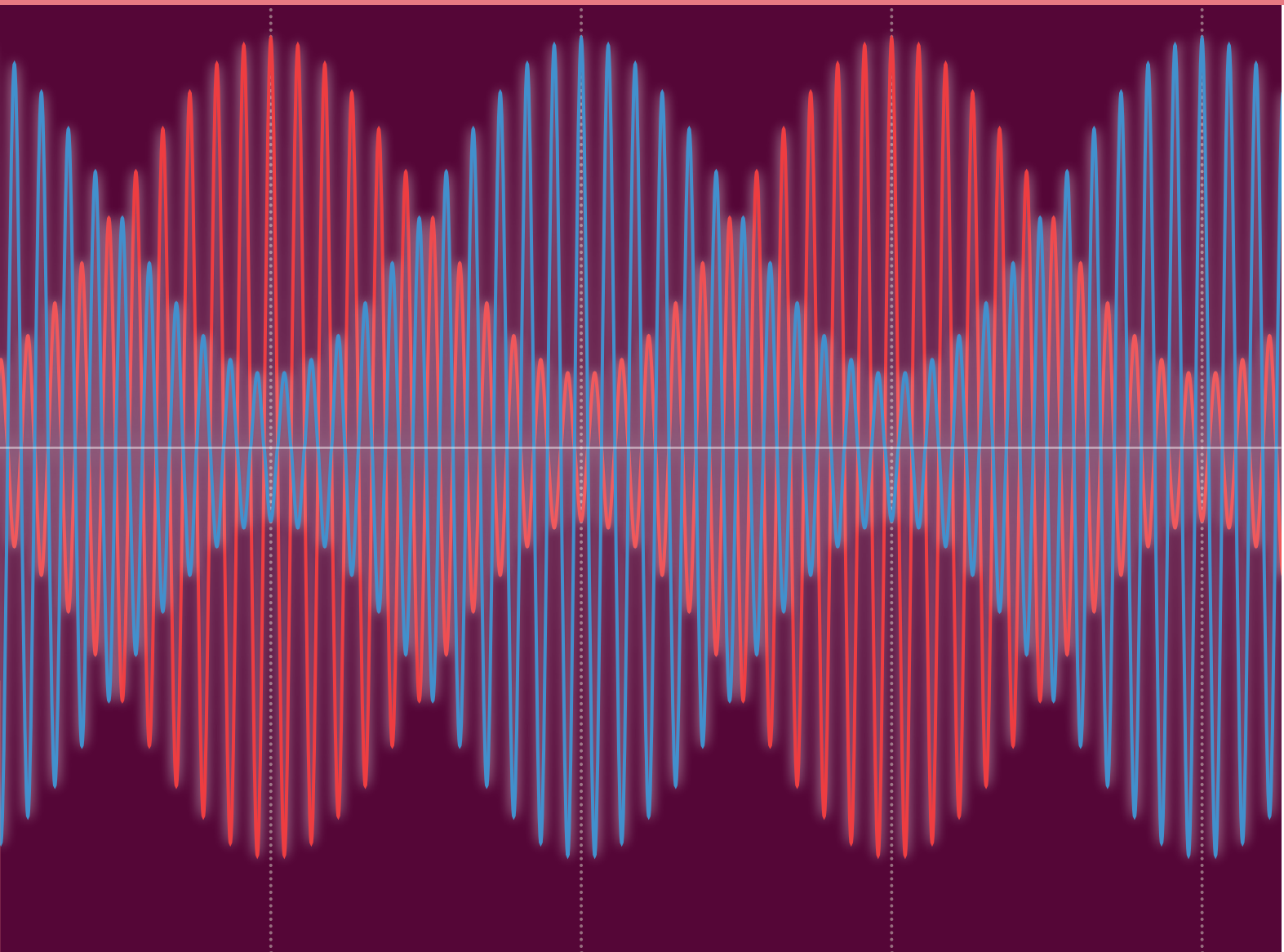
1. Zadati su parametri modulišućeg signala, signala nosioca i KAM signala:  $U_0 = 1 \text{ V}$ ,  $U_m = 1 \text{ V}$  i  $f_0 = 500 \text{ Hz}$ . Izračunaj maksimalnu i minimalnu amplitudu KAM signala za zadate stepene modulacije i skiciraj oblik KAM signala za svaku vrijednost parametra  $m$ .
  - a)  $m = 0$
  - b)  $m = 0,50$
  - c)  $m = 1$
  - d)  $m = 1,25$
2. Za graničnu učestanost govornog signala  $f_g = 3,4 \text{ kHz}$  izračunaj širinu spektra tog signala ako je izvršena AM modulacija sa dva bočna opsega. Kolika je širina spektra istog signala ako se AM modulacija vrši u donjem ili gornjem bočnom opsegu?
3. AM radio-stanici dozvoljeno je emitovanje modulišućih učestanosti do  $5 \text{ kHz}$ . Ako stanica emituje na  $980 \text{ kHz}$ , izračunaj maksimum i minimum gornjeg i donjeg bočnog opsega, kao i ukupnu širinu opsega koju zauzima.
4. Nacrtaj blok-šemu AM modulatora sa signalom nosiocem i sa spektrima i propusnim karakteristikama svih signala i blokova u šemi, ako je modulišući signal sinusni na učestanosti  $f_1$  i ako se prenos vrši u gornjem bočnom opsegu.
5. Nacrtaj blok-šemu AM modulatora sa istisnutim signalom nosiocem ako je modulišući signal složeni signal sa najvećom graničnom učestanošću  $f_g$ , i ako se modulacija vrši u donjem bočnom opsegu.
6. Skiciraj blok-šemu AM-1BO (gornji bočni opseg) prijemnog uređaja sa sinhronim demulatorom AM signala ako je modulišući signal složeni, najveće učestanosti  $f_m$ .



## 2. Ugaone modulacije

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš razliku između ugaonih modulacija (frekvencijska i fazna)
- objasniš postupak dobijanja ugaono moduliranih signala i njihove spektre
- objasniš postupak demodulacije ugaono moduliranih signala
- skiciraš talasni oblik zadanog ugaono moduliranog signala i njegov spektar
- objasniš uticaj šuma na prenos ugaono moduliranih signala
- nacrtaj blok-šemu primopredajnog sistema sa ugaonim modulacijama.



Frekvencijska modulacija (FM) predstavlja najstariji oblik modulacije. Primjenjivana je u telegrafiji kao najsavremenijem vidu komunikacija sredinom 19. vijeka. Početkom 20. vijeka stvoreni su uslovi za primjenu amplitudske modulacije u radio-prenosu. Radi poboljšanja karakteristika sistema koji koriste radio-kanale i rješavanja problema vezanih za povećanje dometa i kapaciteta radio-veze, vršena su dalja istraživanja modulacionih tehnika. Pojavila se ideja da se modulacija ostvaruje promjenom učestanosti signala nosioca. Istraživanja koja su vršena 30-ih godina prošlog vijeka pokazala su da ovaj tip modulacije pruža značajne prednosti u odnosu na sisteme zasnovane na amplitudskoj modulaciji. Prednosti

su se, prije svega, odnosile na kvalitetniju reprodukciju zvuka u opsegu 20 Hz – 15 kHz, te veću otpornost na pojavu šuma u kanalu, odnosno bolji odnos  $S/N$  na izlazu prijemnika. S obzirom na navedene prednosti, frekvencijska modulacija danas predstavlja najzastupljeniju modulacionu tehniku u radio-difuziji, koja se koristi za prenos analognog stereo-signala u frekvencijskom opsegu od 87,5 do 108 MHz, kao i u TV prenosu.

U praktikumu laboratorijskih vježbi data je vježba vezana za sadržaj ovog poglavlja, u kojoj se vrši snimanje talasnog oblika i spektra frekvencijski modulisanog signala korišćenjem laboratorijskih uređaja.

## ZANIMLJIVOST

FM je znatno otporniji na šum od AM, kao što je prikazano u ovoj dramatičnoj demonstraciji koju je 1940. izveo inženjerski tim Dženeral elektrika u Njujorku. Radio ima i AM i FM prijemnike. S električnim lukom od milion volti, kao izvorom smetnji, AM prijemnik proizveo je samo šum, odnosno radio-program se nije mogao emitovati, dok je FM prijemnik jasno reprodukovao muzički program iz eksperimentalnog FM predajnika u Nju Džersiju.



## 2.1. Vrste ugaonih modulacija

Signal nosilac predstavlja sinusni periodični signal koji ima svoju amplitudu, frekvenciju i početnu fazu, pa se može predstaviti izrazom:

$$u_0(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi) = U_0 \cos \phi(t). \quad (2.1)$$

U slučaju amplitudске modulacije, signal nosilac bio je dat izrazom:

$$u_0(t) = U_0 \cos 2\pi f_0 t. \quad (2.2)$$

S obzirom na to da se kod amplitudске modulacije mijenja amplituda signala nosioca, dok je početna faza konstantna, odnosno ne mijenja se, onda se može uzeti da je početna faza signala nosioca jednaka nuli, tj. da je  $\varphi = 0^\circ$ .

U izrazu 2.1 sa  $\varphi$  je označena početna faza (trenutna devijacija faze), a sa  $\phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi$  trenutna faza signala nosioca.

Postupak kojim se mijenja ugao  $\phi(t)$  u skladu sa promjenama signala koji se prenosi, naziva se ugaona modulacija.

Postoje dvije vrste ugaonih modulacija: **frekvencijska** i **fazna** modulacija.

Ako se u ritmu promjena signala koji se prenosi mijenja učestanost signala nosioca, onda je riječ o frekvencijskoj modulaciji. Frekvencijsko modulirani signal ima istu amplitudu kao signal nosilac, ali mu se učestanost mijenja u ritmu promjene modulišućeg (korisnog) signala koji se moduliše i prenosi na daljinu.



Frekvencijsku modulaciju skraćeno ćemo označavati sa FM (FM – engl. *frequency modulation*).

U opštem slučaju, izraz za trenutnu vrijednost učestanosti FM modulisanog signala jeste:

$$f = f_0 + k_f \cdot u_m(t), \quad (2.3)$$

gdje je  $u_m(t)$  modulišući signal (signal koji se prenosi),  $f_0$  učestanost signala nosioca, a  $k_f$  koeficijent proporcionalnosti. Vrijednost ovog koeficijenta zavisi od električnog sklopa u kojem se obavlja proces frekvencijske modulacije.

Ako je modulišući signal:

$$u_m(t) = U_m \cos 2\pi f_m t,$$

onda se prethodni izraz može napisati u obliku:

$$f = f_0 + k_f \cdot U_m \cos 2\pi f_m t = f_0 + \Delta f \cdot \cos 2\pi f_m t = f_0 + \Delta f(t). \quad (2.4)$$

Veličina  $\Delta f = k_f \cdot U_m$  predstavlja maksimalnu promjenu učestanosti, koja se naziva **maksimalna devijacija učestanosti**.

Funkcija  $\Delta f(t) = \Delta f \cdot \cos 2\pi f_m t$  predstavlja vremensku promjenu maksimalne devijacije učestanosti, gdje se promjena učestanosti modulisanog signala vrši u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala.

Dakle, devijacija učestanosti predstavlja vrijednost promjene učestanosti signala nosioca, prouzrokovanu promjenom amplitude modulišućeg signala.

U prethodnom slučaju mijenjala se učestanost signala nosioca. Ako se mijenja faza nosioca, onda se radi o drugom obliku ugaonih modulacija, o faznoj modulaciji.

Ako se u ritmu promjena signala koji se prenosi mijenja faza nosioca, onda je riječ o faznoj modulaciji.

Faznu modulaciju skraćeno ćemo označavati sa PM (PM – engl. *phase modulation*).

Za PM modulisani signal važi:

$$\varphi = k_p \cdot U_m \cos 2\pi f_m t = \Delta\varphi_{max} \cdot \cos 2\pi f_m t. \quad (2.5)$$

U gornjoj formuli, izraz  $U_m \cos 2\pi f_m t$  predstavlja modulišući signal (informaciju koja se prenosi), a  $k_p$  koeficijent proporcionalnosti, čija vrijednost zavisi od električnog sklopa u kojem se obavlja proces fazne modulacije.

Veličina  $\Delta\varphi_{max} = k_p \cdot U_m$  predstavlja maksimalnu promjenu faze, koja se naziva **maksimalna devijacija faze**.

Devijacija faze predstavlja vrijednost promjene faze nosioca prouzrokovanu promjenom amplitude modulišućeg signala.

Frekvencijska i fazna modulacija uvijek se zajedno pojavljuju: nije moguće mijenjati samo fazu bez promjene učestanosti, i obrnuto – nije moguće mijenjati samo učestanost bez mijenjanja faze.

### 2.1.1. Frekvencijska modulacija (FM)

Rekli smo da je frekvencijska modulacija (skraćeno FM) postupak modulacije kod koje se informacija prenosi promjenom učestanosti signala nosioca. Kod frekvencijske modulacije amplituda nosioca se ne mijenja, ali se modifikuje njegova učestanost, tako da ona postaje vremenska funkcija srazmjerna promjenama modulišućeg signala.

Učestanost nosioca mijenja se između najmanje  $f_{min}$  i najveće  $f_{max}$  vrijednosti, u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala. Razlika maksimalne učestanosti nosioca ( $f_{max}$ ) i njegove srednje vrijednosti ( $f_0$ ) predstavlja devijaciju učestanosti, odnosno:

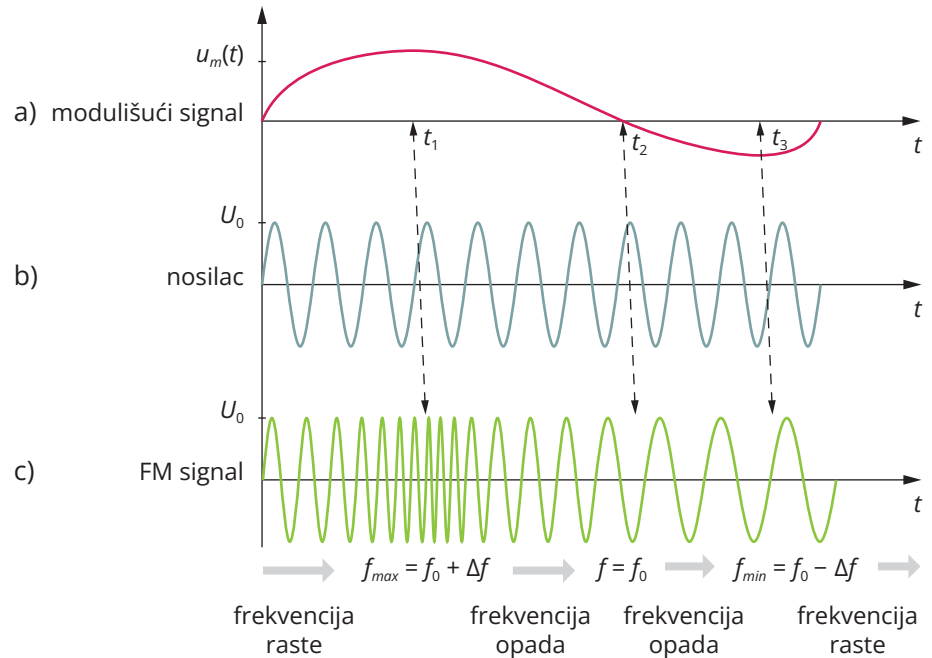
$$\Delta f = f_{max} - f_0. \quad (2.6)$$

Isto tako, devijacija učestanosti predstavlja i razliku između srednje vrijednosti učestanosti nosioca ( $f_0$ ) i njegove najmanje vrijednosti ( $f_{min}$ ), odnosno:

$$\Delta f = f_0 - f_{min}. \quad (2.7)$$

Trenutna vrijednost učestanosti signala koji se prenosi zavisi od trenutne vrijednosti modulišućeg signala: kada je amplituda modulišućeg signala veća, i učestanost nosioca se povećava; a kada je amplituda modulišućeg signala manja, učestanost nosioca se smanjuje. Slika 2.1 ilustruje navedeni proces.

Na slici 2.1a prikazana je promjena modulišućeg signala u vremenu, odnosno prikazan je **talasni oblik** modulišućeg signala. Da se podsjetimo, modulišući signal predstavlja informaciju koja se prenosi. Na slici 2.1b prikazan je talasni oblik nosioca, a na slici 2.1c promjena modulisanog signala u vremenu, tj. prikazan je talasni oblik FM signala. Pretpostavili smo, što se vidi i sa slika, da je učestanost modulišućeg signala mnogo niža u odnosu na učestanost signala nosioca.



**Slika 2.1.** Frekvencijska modulacija: a) talasni oblik modulišućeg signala, b) talasni oblik nosioca, c) talasni oblik FM signala

Sa slike 2.1a uočavamo da se vrijednost amplitude modulišućeg signala povećava, i da u trenutku  $t = t_1$  amplituda signala dostiže svoju maksimalnu vrijednost  $U_m$ . Zatim se vrijednost amplitude modulišućeg signala smanjuje, da bi u trenutku  $t = t_2$  bila jednaka nuli, a u trenutku  $t = t_3$  imala svoju minimalnu vrijednost.

Pogledajmo šta se u tim trenucima dešava sa frekvencijski moduliranim signalom. Do trenutka  $t = t_1$  učestanost nosioca se povećava. Kada modulišućí signal dostigne svoju maksimalnu vrijednost, tada će i ova učestanost dostići svoju najveću vrijednost, koja iznosi  $f_{max} = f_0 + \Delta f$ . Poslije toga učestanost nosioca se smanjuje, i u trenutku  $t = t_2$ , kada je vrijednost modulišućeg signala jednaka nuli, ona je  $f = f_0$ . Učestanost nosioca zatim se i dalje smanjuje sve do trenutka  $t = t_3$ , kada modulišućí signal dostiže svoju minimalnu vrijednost. Tada je i učestanost nosioca minimalna, i ona iznosi  $f_{min} = f_0 - \Delta f$ . Poslije toga ova učestanost počinje da se povećava, jer se povećava i vrijednost modulišućeg signala.

Kao što se vidi, učestanost nosioca mijenja se u granicama od  $f_{min} = f_0 - \Delta f$  do  $f_{max} = f_0 + \Delta f$ . To znači da je širina opsega učestanosti FM signala jednaka

$$B = f_{max} - f_{min} = f_0 + \Delta f - (f_0 - \Delta f) = 2\Delta f. \quad (2.8)$$

Ovaj obrazac važi samo u slučaju da je, kako smo već rekli, učestanost modulišućeg signala mnogo niža u odnosu na učestanost signala nosioca. Međutim, u praksi to često nije slučaj. Naime, signali koji se prenose, imaju svoj sopstveni spektar učestanosti, od neke najmanje do neke najveće učestanosti, koja se naziva granična učestanost signala, i koja se označava



**Džon Karson** (1886–1940), američki inženjer, bavio se tehnikama prenosa u ranim sistemima elektronske komunikacije. Pronašao je AM-1BO sisteme i dao obrazac za izračunavanje propusnog opsega u sistemima frekvencijske modulacije koji je nazvan njegovim imenom.

## PRIMJER 2.1 ▶

sa  $f_m$ . Tako na primjer, signal govora koji se prenosi telefonskim kanalom ima spektar učestanosti od 300 Hz do 3,4 kHz, a signal muzike od 50 Hz do 15 kHz.

U tom slučaju, sa učestanošću nosioca pomjera se i čitav spektar modulišućeg signala, u granicama od  $f_0 - f_m - \Delta f$  do  $f_0 + f_m + \Delta f$ . To znači da je značajna širina spektra FM signala, čija je granična učestanost  $f_m$ , jednaka:

$$B = 2(f_m + \Delta f). \quad (2.9)$$

Ovaj obrazac naziva se Karsonov obrazac.

Proces frekvencijske modulacije u literaturi se veoma često opisuje i jednačinom:

$$u_{FM}(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 + 2\pi \Delta f \cdot u_m(t))t. \quad (2.10)$$

Izraz  $2\pi f_0 + 2\pi \Delta f \cdot u_m(t)$  definiše trenutnu učestanost FM signala. U praksi se često koristi i veličina

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m},$$

koja se naziva **indeks modulacije FM signala**.

Za FM signal  $u_{FM}(t) = 15 \cos(10 \cdot 10^8 + 1000 \cos(12\,200))t$  izračunati učestanost nosioca i učestanost modulišućeg signala. Kolika je maksimalna devijacija učestanosti? Koliki opseg učestanosti ima ovaj signal?

**Rješenje:** Polazeći od izraza za FM signal,

$$u_{FM} = U_0 \cos(2\pi \cdot f_0 + 2\pi \cdot \Delta f \cdot u_m(t))t,$$

i njegovim poređenjem sa datom jednačinom, dobijamo da je

$$f_0 = 10 \cdot \frac{10^8}{2\pi} = 159,1 \text{ MHz} \quad \text{i} \quad f_m = \frac{12\,200}{2\pi} = 1941 \text{ kHz}.$$

Maksimalna devijacija učestanosti je

$$\Delta f = \frac{1000}{2\pi} = 159 \text{ Hz}.$$

Pošto je učestanost modulišućeg signala mnogo niža od učestanosti signala nosioca, onda je širina opsega učestanosti FM signala:

$$B = 2 \cdot \Delta f = 2 \cdot 159 \text{ Hz} = 318 \text{ Hz}. \quad \blacksquare$$

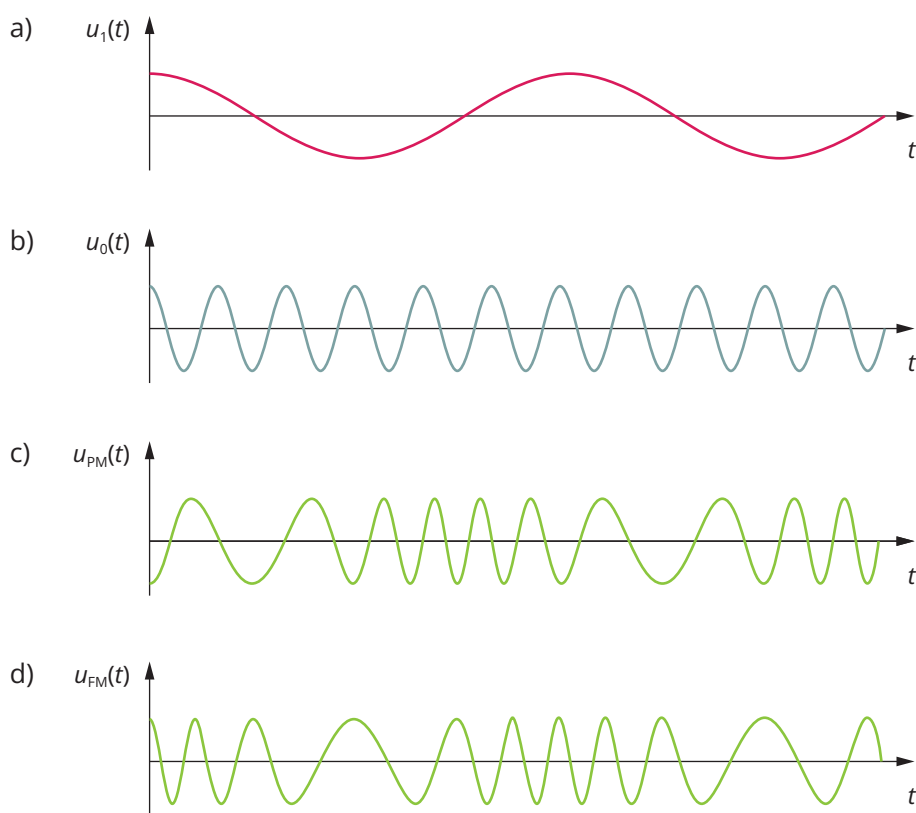
### NAPOMENA

Fazna modulacija rijetko se primjenjuje kod analognih signala. U daljem tekstu vidjećemo da je ona veoma važna u prenosu digitalnih signala.

## 2.1.2. Fazna modulacija

Fazna modulacija (engl. *phase modulation*, PM) vrsta je ugaone modulacije kod koje se fazni pomjeraj signala nosioca mijenja srazmjerno promjenama amplitude modulišućeg signala. Pri tome je amplituda signala nosioca konstantna.

Fazno modulirani signal ima isti oblik kao frekvencijski modulirani signal, samo što je u odnosu na njega fazno pomjeren. Na slici 2.2 prikazani su: a) modulišućí signal, b) signal nosilac, c) PM i d) FM signal. Sa slike se vidi da se praktično ne razlikuju talasni oblici frekvencijski i fazno moduliranih signala istog modulišućeg signala. Oni su međusobno samo pomjereni duž vremenske ose, odnosno razlikuju se samo u fazi.



Slika 2.2. a) Modulišućí signal, b) signal nosilac, c) PM signal, d) FM signal

## 2.1.3. Spektar ugaono moduliranih signala

Do sada smo analizirali vremenske (talasne) oblike FM signala. Sada treba da utvrdimo šta se dešava sa njegovim spektrom. U slučaju amplitudske modulacije, vidjeli smo da se spektar AM signala ne mijenja, on se jednostavno pomjera duž frekvencijske ose (odnosno translira) za učestanost nosioca. Kod FM signala nije tako. Spektar frekvencijski moduliranog signala

teorijski je neograničen. Matematička analiza koja ovo pokazuje prilično je složena, i mi se ovdje nećemo njome baviti. Međutim, da je spektar FM signala neograničen, može se intuitivno naslutiti. Naime, kod frekvencijske modulacije promjena učestanosti nosioca vrši se u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala. Najmanje promjene amplitude modulišućeg signala imaju za posljedicu promjene učestanosti FM signala. Kako je broj promjena amplitude praktično neograničen, to je praktično neograničen i broj harmonika u spektru FM signala.

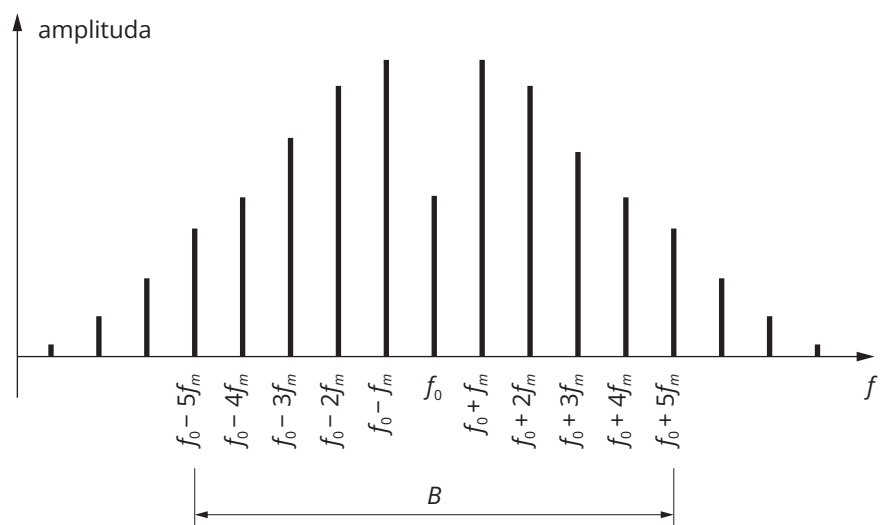
Spektar FM signala ima beskonačan broj bočnih komponenti, simetrično raspoređenih oko noseće učestanosti. Dakle, spektar FM signala sadrži beskonačno mnogo parova harmonika. Svaki par sastoji se od više i niže bočne frekvencije. Učestanosti komponenti donjeg bočnog opsega su:

$$f_0 - f_{m'}, f_0 - 2f_{m'}, f_0 - 3f_{m'} \dots$$

Učestanosti komponenti gornjeg bočnog opsega su:

$$f_0 + f_{m'}, f_0 + 2f_{m'}, f_0 + 3f_{m'} \dots$$

Ovaj spektar prikazan je na slici 2.3.



**Slika 2.3.** Spektar FM signala čiji je modulišuću signal sinusoida

Iz ovoga možemo izvesti zaključak da je za prenos FM signala potreban beskonačno širok propusni opseg. Sistem prenosa beskonačno širokog opsega ne može se ostvariti u praksi. Međutim, nije ni potrebno prenositi sve harmonike FM signala.

FM signal ima beskonačno mnogo bočnih učestanosti, ali sve one nijesu od istog značaja. Važni su samo oni harmonici koji nose najveću snagu signala. Sa slike 2.3 vidi se da se amplitude komponenti FM signala smanjuju udaljanjem od učestanosti nosioca. Samim tim smanjuje se i snaga signala koju ove komponente nose. U praksi se pokazalo da se komponente učestanosti

koje nose snagu manju od pet procenata snage signala ne moraju prenositi. Zbog toga se bočni harmonici koji imaju amplitudu manju od pet procenata maksimalne amplitude korisnog signala zanemaruju, odnosno ne prenose se. Na taj se način, izborom podesnih filtara, obezbeđuje da se spektar FM signala prenosi u ograničenom, prihvatljivom opsegu. Približna vrijednost širine opsega FM signala data je, kako je već rečeno u prethodnom odjeljku, Karsonovim obrascem:

$$B = 2(f_m + \Delta f).$$

Širina opsega FM signala data Karsonovim zakonom uključuje približno 98% ukupne snage signala.

## PRIMJER 2.2 ▶

Izračunati širinu spektra FM signala ako mu je maksimalna devijacija  $\Delta f = 75$  kHz, a najveća učestanost modulišućeg muzičkog signala  $f_m = 15$  kHz.

**Rješenje:** Primjenom Karsonovog obrasca:  $B = 2(f_m + \Delta f)$ , dobijamo da je širina značajnog dijela spektra muzičkog FM signala:

$$B = 2 \cdot (15 \text{ kHz} + 75 \text{ kHz}) = 180 \text{ kHz.} \quad \blacksquare$$

## KONTROLNO PITANJE K2.1 ▶

FM signal ima devijaciju učestanosti 20 kHz i širinu opsega 60 kHz. Učestanost modulišućeg signala iznosi: a) 5 kHz, b) 10 kHz, c) 20 kHz, d) 30 kHz.

**Odgovor:** b), 10 kHz. [Primjenom Karsonovog obrasca  $B = 2(f_m + \Delta f)$ , i s obzirom na to da je  $\Delta f = 20$  kHz,  $B = 60$  kHz, slijedi da je  $f_m = 10$  kHz.]

## Primjer iz prakse

Snaga i broj parova bočnih komponenti FM signala promjenljivi su zavisno od maksimalne devijacije učestanosti  $\Delta f$  i vrste signala. Kod nekih signala, primjenom FM modulacije, biće značajan samo par bočnih komponenti, a kod nekih će značajan biti veći broj parova bočnih komponenti. Praktičnim i teorijskim razmatranjima ustanovljeno je da komponente učestanosti zvučnog signala veće od  $f_0 + 5f_m$  a manje od  $f_0 - 5f_m$  imaju toliko male amplitude da se njihovo odsustvo praktično i ne zapaža. U tom slučaju, slušalac neće osjetiti pad kvaliteta muzike, govora i sl., koji se prenose kao FM signali. Kod radio-difuzije najviša zvučna učestanost koja se prenosi (muzički signal) jeste  $f_m = 15$  kHz, pa je širina spektra FM signala  $B = 150$  kHz.

## DODATAK +

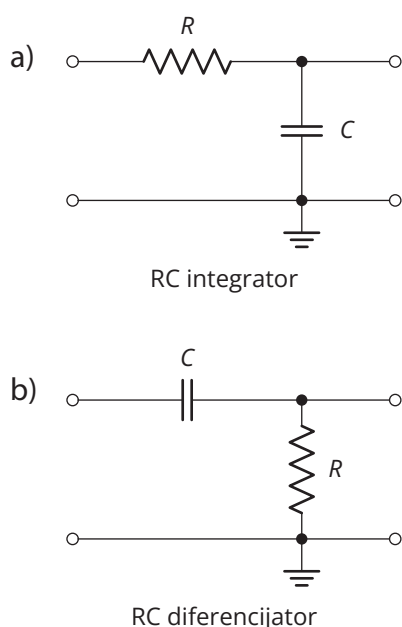
Rekli smo da se u frekvencijskoj modulaciji učestanost nosioca mijenja u skladu sa promjenama modulišućeg signala. Promjena trenutne učestanosti signala nosioca proporcionalna je modulišućem signalu. Zbog toga se javlja razlika u učestanosti modulisanog signala i učestanosti signala nosioca. Maksimalna razlika između trenutne učestanosti modulisanog signala i učestanosti signala nosioca, odnosno devijacija učestanosti, povezana je sa frekvencijskim opsegom. Manja devijacija ima poseban značaj u radio-sistemima prenosa, jer je povezana sa propusnošću, pošto manja devijacija znači da više kanala može stati u raspoloživ frekvencijski spektar. Ovo je posebno važno u radio-sistemima prenosa, gdje se FM signalima (koji se prenose) dodjeljuje ograničeni opseg frekvencija, koji za FM radio iznosi 87,5–108 MHz.

Ovdje nećemo posebno razmatrati analitički oblik za fazno modulisane signale, jer sve što važi za frekvencijski modulisane signale u vezi sa širinom spektra, važi i za fazno modulisane signale. Dakle, fazno modulisani signal ima isti spektar frekvencija kao FM signal, i prenose se samo oni harmonici koji imaju amplitudu veću od 5% maksimalne amplitude modulišućeg signala.



## 2.2. Postupak dobijanja ugaono moduliranih signala

### 2.2.1. Veza između fazne i frekvencijske modulacije



Slika 2.4. Integrator i diferencijator

Zbog svojstva fazno moduliranog signala da ima isti oblik kao frekvencijski modulirani signal, odnosno zbog činjenice da se frekvencijska i fazna modulacija uvijek zajedno javljaju, ove vrste modulacije imaju zajednički naziv – ugaone modulacije. Zahvaljujući odnosima između ove dvije modulacije, moguće je napraviti električne sklopove čijom je upotrebom moguće od faznog modulatora napraviti frekvencijski, i obrnuto: od frekvencijskog napraviti fazni modulator. To isto važi i u postupku demodulacije, procesu inverznom modulaciji, kada se iz FM i PM signala dobijaju modulišući signali, odnosno korisni signal. Ti posebni sklopovi nazivaju se **integrator** i **diferencijator**. Nazivi im potiču od pojmova koji se izučavaju u višoj matematici. Najprostija varijanta diferencijatora i integratora, realizovanih kao RC filtri, prikazana je na slici 2.4.

Kao primjer navedimo vezu između faznog i frekvencijskog demodulatora. S obzirom na činjenicu da između ugaonih modulacija postoji veza, koja se manifestuje u odgovarajućim faznim pomjerajima, onda se detekcija fazno moduliranih signala svodi na primjenu FM demodulatora, na koji se priključuje kolo integratora. Zadatak ovog kola jeste da izvrši fazno pomjeranje demoduliranog signala za odgovarajući fazni ugao. Zaključujemo da važi:

$$PD = FD + \text{integrator.}$$

Sličnim razmišljanjem, uz matematičku analizu koja prevazilazi srednjoškolski nivo znanja, može se pokazati da važi:

$$PM = \text{diferencijator} + FM$$

$$PD = FD + \text{integrator}$$

$$FM = \text{integrator} + PM$$

$$FD = PD + \text{diferencijator.}$$

Na primjer, fazni modulator (PM) može se dobiti tako što se na ulaz frekvencijskog modulatora (FM) priključi diferencijator, dok se fazni demodulator (PD) dobija kad se na izlaz frekvencijskog demodulatora (FD) priključi integrator.

Opšta veza između fazne i frekvencijske modulacije znatno pojednostavljuje izradu sklopova za generisanje i demodulaciju ugaono moduliranih signala.

## 2.2.2. Frekvencijski modulator

Postupak frekvencijske modulacije vrši se u nekom električnom kolu koje obezbeđuje da trenutna devijacija učestanosti bude direktno srazmjerna modulišućem signalu.

Kolo u kojem se obavlja postupak frekvencijske modulacije naziva se frekvencijski modulator.

Postoje dvije metode generisanja FM signala: indirektna i direktna metoda.

Indirektna metoda karakteristična je po tome što se u njoj kao modulator koristi fazni modulator, na koji se prethodno priključi integrator.

Ako se učestanost nosioca, odnosno oscilatora koji generiše njegovu učestanost, direktno mijenja pod uticajem modulišućeg signala, onda je riječ o direktnoj metodi generisanja FM signala. Ovaj princip se po pravilu ostvaruje tako što se neki od parametara oscilatora koji generiše signal učestanosti  $f_0$  mijenja u zavisnosti od modulišućeg signala. Najčešće su to kapacitivnost kondenzatora i induktivnost kalema, kao glavnih elemenata oscilatornih kola.



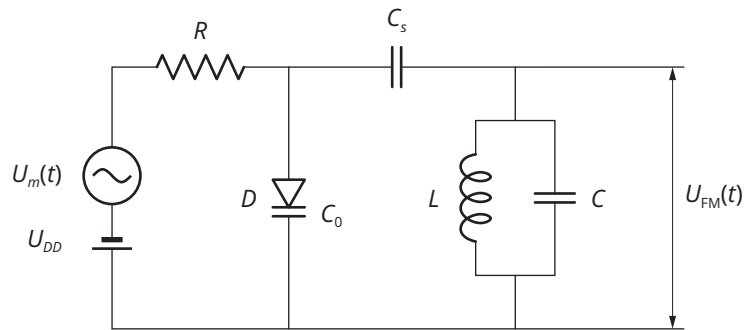
### Veza sa drugim modulima

Obnovi usvojene sadržaje iz modula „Analogna i digitalna elektronika“ (za drugi razred elektrotehničke škole), gdje su detaljno objašnjene varikap diode.

U praksi se generisanje FM signala vrši promjenom kapacitivnosti kondenzatora u rezonantnom oscilatornom kolu. Tipičan predstavnik modulatora u kojem se vrši promjena kapacitivnosti jeste **modulator sa varikap diodom**.

Varikap diode su one čija se kapacitivnost mijenja promjenom vrijednosti inverznog napona koji je priključen na njih.

Na slici 2.5 prikazana je uprošćena varijanta takvog modulatora. Izvor modulišućeg signala  $U_m(t)$  preko otpornika  $R$  napaja električno kolo koje čini oscilator i varikap dioda. Induktivnost  $L$  i kapacitivnost  $C$  elementi su oscilatornog kola. Sa  $U_{DD}$  označen je napon polarizacije varikap diode  $D$ . Jednosmjerni napon  $U_{DD}$  određuje vrijednost srednje kapacitivnosti varikap diode  $C_0$ . Sa  $C_s$  označen je kondenzator za spregu. Njegova je uloga da varikap diodu priključi paralelno oscilatornom kolu. Paralelna veza varikap diode sa oscilatornim kolom istovremeno predstavlja paralelnu vezu kapacitivnosti diode i kapacitivnosti kondenzatora oscilatornog kola. Na taj način obezbeđuje se da kapacitivnost varikap diode bude dio ukupne kapacitivnosti oscilatornog kola.



Slika 2.5. FM modulator sa varikap diodom

Modulišući napon  $U_m(t)$  mijenja napon na varikap diodi, čime mijenja i njenu kapacitivnost oko srednje vrijednosti  $C_0$ , od  $C_1$  do  $C_2$ . Promjenom kapacitivnosti varikap diode istovremeno se mijenja i ukupna kapacitivnost oscilatornog kola. Promjenom ukupne kapacitivnosti oscilatornog kola pomoću modulišućeg signala, mijenja se i učestanost oscilovanja oscilatora, čime se ostvaruje frekvencijska modulacija.

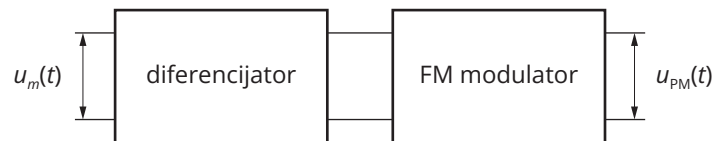
### 2.2.3. Fazni modulator

U prethodnom odjeljku rečeno je da postoji veza između frekvencijske i fazne modulacije:

$$PM = \text{diferencijator} + FM.$$

Ova činjenica sugerira način na koji se može realizovati modulator za faznu modulaciju – jednostavnom serijskom vezom diferencijatora i FM modulatora.

Na slici 2.6 prikazana je blok-šema faznog modulatora.



Slika 2.6. Blok-šema faznog modulatora

## 2.3. Demodulacija ugaono moduliranih signala

### 2.3.1. FM detektor

Da bi se iz ugaono moduliranog signala mogao izdvojiti originalni, korisni signal, koji predstavlja poslatu informaciju, u prijemu se mora obaviti postupak inverzan modulaciji. Ovaj postupak naziva se detekcija ugaono moduliranih signala. Postupak detekcije obavlja se u detektorima ugaono moduliranih signala.

Pošto postoji veza između frekvencijske i fazne modulacije, obradimo samo FM detektore. Naime, kako je  $PD = FD + integrator$ , zaključujemo da se fazni demodulator može dobiti priključenjem integratora na frekvencijski detektor.

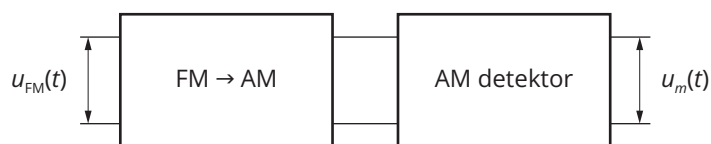
FM detektor je sklop koji iz frekvencijski moduliranog signala izdvaja informaciju, odnosno modulišući signal.

Podsjetimo se da je, u postupku frekvencijske modulacije, učestanost nosioca FM signala srazmjerna veličini modulišućeg signala. Ovo nam daje ideju da FM detektor mora biti takav električni sklop kod koga je veličina napona na izlazu srazmjerna promjeni učestanosti ulaznog FM signala.

Kako se ponaša taj sklop kada na njegov ulaz stiže FM signal? Kada nema modulacije, učestanost nosioca je konstantna, i jednaka je  $f_0$ , pa je izlazni napon na detektoru jednak nuli. U trenutku kada počinje modulacija, i na ulazu detektora se pojavljuje signal čija se učestanost mijenja u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala, tada se na izlazu detektora pojavljuje NF napon. Taj napon se pri porastu učestanosti ulaznog signala povećava, i smanjuje se kada se i učestanost ulaznog signala smanjuje.

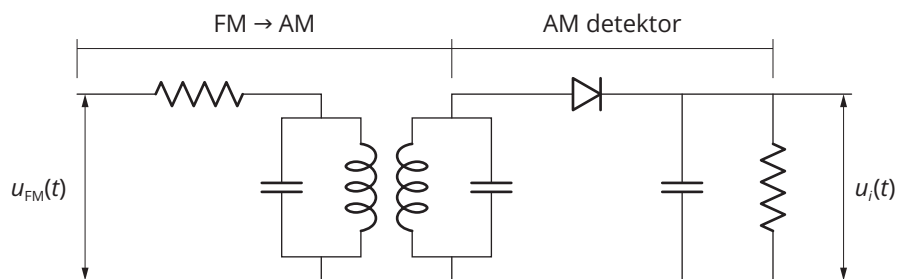
Detekcija FM signala obavlja se u sklopu koji se naziva **diskriminator**. Idealni diskriminator je sklop čiji izlazni napon linearno zavisi od trenutne učestanosti ulaznog signala, uz uslov da je amplituda ulaznog FM signala konstantna.

Diskriminatori mogu da se realizuju na više načina, ali se svi oni sastoje iz dva dijela (slika 2.7). U prvom dijelu diskriminatora FM signal se pretvara u AM signal, a u drugom se AM signal detektuje i iz njega izdvaja informacija. Kako u diskriminatoru postoji AM detektor, onda se i ovaj postupak naziva detekcija.



Slika 2.7. Blok-šema FM diskriminatora

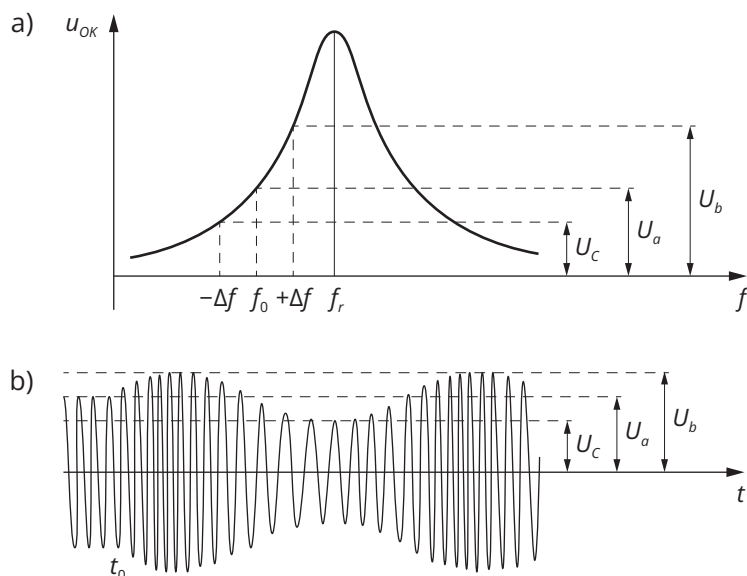
Na slici 2.8 prikazana je električna šema najprostijeg diskriminatora sa paralelnim oscilatornim kolom.



Slika 2.8. Električna šema diskriminatora sa paralelnim oscilatornim kolom

Oscilatorno kolo, koje čine paralelno vezani kalem i kondenzator, ima ulogu pretvarača frekvencijskog u amplitudski modulirani signal (FM/AM pretvarač). U prethodnom odjeljku vidjeli smo da se ovo pretvaranje obavlja podešavanjem učestanosti oscilatornog kola na učestanost nosioca FM signala.

Na slici 2.9a prikazana je rezonantna kriva oscilatornog kola podešena na učestanost nosioca FM signala.



Slika 2.9. Detekcija FM signala: a) rezonantna kriva oscilatornog kola, b) napon na oscilatornom kolu

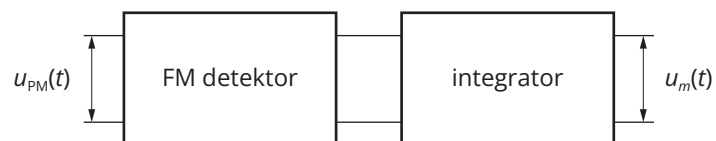
Oblik napona na oscilatornom kolu prikazan je na slici 2.9b. Kada nema modulacije, učestanost napona oscilatornog kola je  $f_0$ , a napon na izlazu kola ima amplitudu  $U_a$  (slika 2.9b). Kada u trenutku  $t_0$  počne proces modulacije, učestanost nosioca počne da se povećava, i približava se rezonantnoj učestanosti oscilatornog kola. Pošto na rezonantnoj učestanosti amplituda signala dobija najveću vrijednost, onda se zbog toga povećava i amplituda napona na oscilatornom kolu. U trenutku doseganja maksimalne devijacije učestanosti  $+\Delta f$  (odnosno dostizanja maksimalnog povećanja učestanosti), amplituda napona postaje maksimalna i jednaka  $U_b$ . Kada se učestanost smanjuje, smanjuje se i amplituda napona na oscilatornom kolu. U trenutku kada se devijacija učestanosti spusti na minimalnu vrijednost  $-\Delta f$  (odnosno na najmanju vrijednost učestanosti), amplituda napona postaje minimalna, i postaje jednaka  $U_c$ . Dakle, na izlazu paralelnog oscilatornog kola, dobija se napon čija se amplituda mijenja u ritmu promjene učestanosti na ulazu kola, odnosno oscilatorno kolo pretvara FM u AM signal.

Napon na izlazu oscilatornog kola dalje se vodi na detektor anvelope, odnosno na detektor AM signala. Na izlazu detektora se, na način objašnjen u prethodnom poglavlju, dobija signal koji je po obliku isti kao i signal koji se u predajniku moduliše u FM modulatoru, tj. dobija se originalni signal.

### 2.3.2. PM detektor

Talasnici oblici frekvencijski i fazno moduliranih signala istog modulišućeg signala praktično se ne razlikuju. Oni su međusobno samo pomjereni duž vremenske ose, odnosno razlikuju se samo u fazi. S obzirom na činjenicu da između dvije vrste ugaone modulacije (FM i PM) postoji opšta veza, odnosno da im je razlika samo u faznom pomjeraju od  $\pi/2$ , detekcija fazno moduliranih signala svodi se na primjenu detektora za FM signal. Pri tome se poslije FM detekcije mora izvršiti fazno pomjeranje detektovanog signala za fazni ugao od  $\pi/2$ . Fazno pomjeranje vrši se u posebnom električnom kolu – integratoru, koje se priključuje na FM detektor.

Blok-šema detektora PM signala prikazana je na slici 2.10



Slika 2.10. Blok-šema PM detektora

## 2.4. Uticaj šuma na prenos ugaono moduliranih signala

FM sistemi su daleko manje osjetljivi na šum u odnosu na AM sisteme. Matematički postupak koji to pokazuje je složen, pa ćemo ga u ovom odjeljku izostaviti.

### Primjer iz prakse

Kako se, u zavisnosti od odnosa signal/šum, procjenjuje kvalitet veze ostvarene FM signalom? Ako je odnos signal/šum u rasponu od 16 do 24 dB, kvalitet veze smatra se lošim, onaj u rasponu od 25 do 40 dB dobrim, a u slučaju da je 41 dB ili veći, smatra se odličnim.

Šum je slučajni proces. Najčešće je (kao npr. bijeli šum) ravnomjerno raspodijeljen po svim učestanostima signala, odnosno širom njegovog spektra. Zbog toga se amplituda šuma slučajno mijenja na svim učestanostima spektra. Promjene amplitude mogu dodatno modulirati signal i na taj način uticati na AM modulaciju. Kao posljedicu imamo da su AM sistemi osjetljivi na slučajni šum.

Da bi šum unosio smetnju u FM signal, morao bi nekako da moduliše učestanost signala. Kako se šum ravnomjerno raspodjeljuje čitavim spektrom, i uglavnom se mijenja po amplitudi, njegov uticaj na prijem signala u FM prijemu mnogo je slabiji, pa zaključujemo:

FM sistemi su mnogo manje osjetljivi na slučajni šum u odnosu na AM sisteme.

Dvije vrste ugaone modulacije (frekvencijska i fazna) pokazuju različite osobine u pogledu odnosa signal/šum na izlazu iz odgovarajućih prijemnika. Naime, pokazuje se da je:

Spektralna gustina srednje snage šuma na izlazu iz diskriminatora fazno moduliranih signala je konstantna, dok spektralna gustina srednje snage šuma na izlazu iz diskriminatora frekvencijski moduliranih signala nije konstantna, već zavisi od kvadrata učestanosti.

## NAPOMENA

Činjenica da je šum na izlazu iz prijemnika veći na višim učestanostima, ima poseban značaj u sistemima multipleksa, kod kojih se multipleksni signal, obrazovan na bazi frekvencijske raspodjele kanala, prenosi sistemom fazne, odnosno frekvencijske modulacije.

Kod fazne modulacije, ako signal ima spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti  $B$ , šum na izlazu prijemnika uvijek će biti isti, bez obzira na to gdje se ovaj opseg nalazi na skali učestanosti.

U sistemima sa frekvencijskom modulacijom, šum na izlazu iz prijemnika biće veći što je taj opseg više pomjeren ka višim učestanostima.

U sistemima sa frekvencijskom modulacijom, povećanjem devijacije učestanosti može da se poboljša odnos signal/šum. Međutim, povećanje devijacije zahtijeva i povećanje propusnog opsega  $B$ . Dakle, i u slučaju frekvencijske modulacije odnos signal/šum može da se poveća na račun povećanja širine opsega prenosnog sistema. To povećanje ne može da bude neograničeno, jer se proširenjem propusnog opsega sistema povećava i šum, pa u jednom trenutku snaga šuma može postati i veća od snage nosioca.

Odnos signal/šum kod sistema sa ugaonom modulacijom može se poboljšati proširenjem propusnog opsega sistema. U sistemima sa amplitudskom modulacijom odnos signal/šum ne može se poboljšavati na taj način. Iz ovoga možemo izvesti važan zaključak:

Sa stanovišta odnosa signal/šum, sistemi sa ugaonom modulacijom imaju prednost u odnosu na sisteme sa amplitudskom modulacijom.

## KONTROLNO PITANJE K2.2 ▶

Koje od sljedećih tvrđenja, koja se odnose na PM, nije tačno?

- a) PM jedino zavisi od frekvencije modulišućeg signala.
- b) Faza nosioca mijenja se u ritmu modulišućeg signala.
- c) Manje je podložan šumu.
- d) Talasni oblici frekvencijski i fazno moduliranih signala istog modulišućeg signala se ne razlikuju.

Objasni odgovor.

**Odgovor:** a) PM zavisi i od amplitude i od frekvencije modulišućeg signala. Veća amplituda prouzrokuje veći fazni pomjeraj, a veća frekvencija veće promjene faze u nosiocu.



### Postupci poboljšanja odnosa S/N za FM prijemnik

Radi ocjene kvaliteta veze pri prenosu FM signala, uvodi se pojam **prag prijema** prijemnika FM signala. Prag prijema predstavlja minimalni odnos  $S/N$  pri kojem veza funkcioniše. Kada srednja snaga signala nosioca postane jednaka desetostrukoj snazi šuma na ulazu u FM prijemnik, tj. kada odnos nosilac/šum postane jednak 10 dB, on će početi naglo da opada. Vrijednost snage signala nosioca u tom trenutku, naziva se prag prijema. Kada signal nosilac dostigne prag ili se spusti ispod njega, šum na izlazu iz prijemnika naglo poraste i veza se prekida.

Spektralna gustina srednje snage slučajnog šuma na izlazu iz FM prijemnika srazmjerna je  $f^2$ ,  $f_1 < f < f_2$ . Znači, kako se ide ka višim učestanostima u spektru modulišućeg signala, šum postaje sve veći.

U FM sistemima, radi poboljšanja odnosa  $S/N$  koriste se sklopovi u predajniku i prijemniku koji se nazivaju *preemfazis* i *deemfazis*. Oni se koriste kako bi se korigovala zavisnost spektralne gustine srednje snage šuma od učestanosti.

## Rezime

- Postupak kojim se ugao  $\phi(t)$  mijenja u skladu sa promjenama signala koji se prenosi, naziva se ugaona modulacija. Postoje dvije vrste ugaonih modulacija: frekvencijska i fazna modulacija. Ako se u ritmu promjena signala koji se prenosi mijenja učestanost signala nosioca, onda je riječ o frekvencijskoj modulaciji. Ako se u ritmu promjena signala koji se prenosi mijenja faza signala nosioca, onda je riječ o faznoj modulaciji.
- Devijacija učestanosti predstavlja vrijednost promjene učestanosti nosioca prouzrokovanu promjenom amplitude modulišućeg signala. Devijacija faze predstavlja vrijednost promjene faze signala nosioca prouzrokovanu promjenom amplitude modulišućeg signala.
- Frekvencijska i fazna modulacija uvijek se zajedno javljaju: nije moguće mijenjati samo fazu bez promjene učestanosti, i obrnuto.
- Spektar ugaono moduliranih signala teorijski je neograničen. Međutim, u praksi nije potrebno prenositi sve harmonike ugaono moduliranih signala. Približna vrijednost širine opsega FM signala data je Karsonovim obrascem:  $B = 2(f_m + \Delta f)$ .
- Kolo u kojem se obavlja postupak frekvencijske modulacije naziva se frekvencijski modulator. Postoje dva metoda generisanja FM signala: indirektna i direktna metoda. Indirektna metoda karakteristična je po tome što se u njoj kao modulator koristi fazni modulator, kojem prethodi integrator. Direktna metoda generisanja FM signala podrazumijeva da se učestanost oscilatora direktno mijenja pod uticajem modulišućeg signala.
- U praksi se generisanje FM signala vrši promjenom kapacitivnosti kondenzatora u rezonantnom oscilatornom kolu. Tipičan predstavnik modulatora u kome se vrši promjena kapacitivnosti jeste modulator sa varikap diodom.
- Modulator za faznu modulaciju realizuje se u obliku serijske veze diferencijatora i FM modulatora.
- FM detektor je sklop koji iz frekvencijski moduliranog signala izdvaja informaciju, odnosno modulišući signal. Detekcija FM signala obavlja se u sklopu koji se naziva diskriminator. S obzirom na činjenicu da između dvije vrste ugaone modulacije (FM i PM) postoji opšta veza, detekcija fazno moduliranih signala svodi se na primjenu detektora za FM signal.
- Sa stanovišta odnosa signal/šum, sistemi sa ugaonom modulacijom imaju prednost u odnosu na sisteme sa amplitudskom modulacijom. Spektralna gustina srednje snage šuma na izlazu iz diskriminatora fazno moduliranih signala konstantna je, dok spektralna gustina srednje snage šuma na izlazu iz diskriminatora frekvencijski moduliranih signala nije konstantna, već zavisi od kvadrata učestanosti.

## Manje poznate riječi

devijacija – odstupanje; intuitivno – neposrednim opažanjem, naslućivanjem.

## Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *M. Filipović: Osnovi telekomunikacija za drugi razred srednjeg obrazovanja za elektrotehničke škole*, Zavod

za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998, koju smo već preporučili na kraju prethodnog poglavlja.

## Zadatak za samostalan rad

Postoje mnogi sajtovi sa video-prikazima FM i PM tehnika modulacije i njihovim simulacijama. Potraži na Jutjubu video-zapise o razlozima korišćenja ove modulacione tehnike, primjere njenog korišćenja

u modernoj tehnologiji, kao i animacije u kojima se prikazuje kako se za različite oblike korisnog signala mijenja talasni oblik FM i PM signala.

## Pitanja za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Navedi vrste ugaonih modulacija.
2. Obrazloži činjenicu da FM i PM signali pripadaju istoj grupi – grupi ugaono moduliranih signala.
3. Uporedi karakteristike frekvencijski i fazno moduliranih signala.
4. Objasni zbog čega je spektar ugaono moduliranih signala neograničen.
5. Protumači zbog čega se u praksi prenosi samo dio učestanosti ugaono moduliranih signala.
6. Da li se povećanjem kapacitivnosti varikap diode u FM modulatoru sa slike 2.5 smanjuje ili povećava ukupna kapacitivnost oscilatornog kola FM modulatora? Argumentuj odgovor.
7. Objasni potrebu da amplituda ulaznog FM signala na ulazu u diskriminator bude konstantna.
8. Obrazloži tvrdjenje da su FM sistemi mnogo manje osjetljivi na slučajni šum u odnosu na AM sisteme.
9. Opravdaj činjenicu da komercijalne radio-stanice koje emituju muzičke programe isključivo koriste FM predajnike.

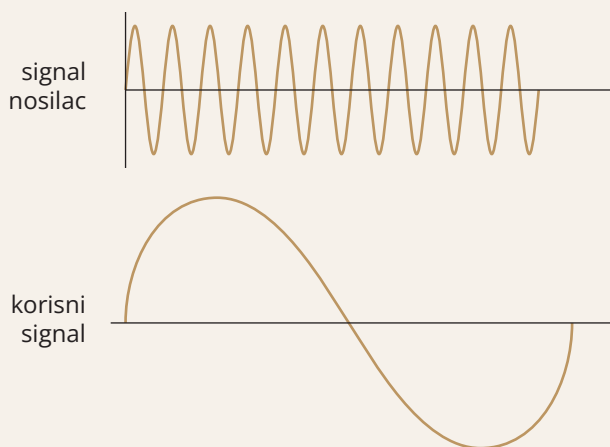
## Zadaci

1. Za FM signal

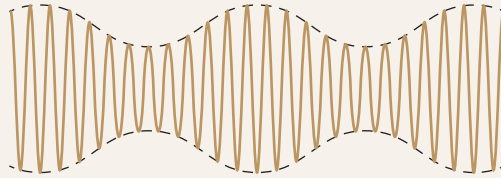
$$u_{FM}(t) = 25 \cos(15 \cdot 10^8 + 2000 \cos(15000))t$$

izračunaj učestanost signala nosioca, učestanost modulišućeg signala, indeks modulacije, maksimalnu devijaciju učestanosti i širinu opsega učestanosti FM signala.

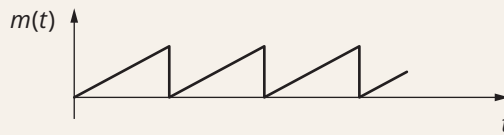
2. FM signal modulisan je signalom učestanosti 1 kHz sa odgovarajućom devijacijom učestanosti. Na izlazu zvučnika prijemnika izmjeren je nivo snage signala od 100 mW. U odsustvu FM signala izmjerena je snaga šuma od 0,1  $\mu$ W na izlazu prijemnika. Dokaži da je odnos signal/šum 60 dB.
3. Skiciraj spektar FM signala sa tri para bočnih komponenti ako je modulišući signal govorni, najveće granične frekvencije  $f_m = 3,4$  kHz. Izračunaj širinu spektra FM signala.
- 4.\* Na slici su prikazani talasni oblici signala nosioca i korisnog signala. Skiciraj talasni oblik odgovarajućeg FM signala. Na talasnom obliku FM signala označi trenutke vremena u kojima su učestanosti signala najviše i najniže.



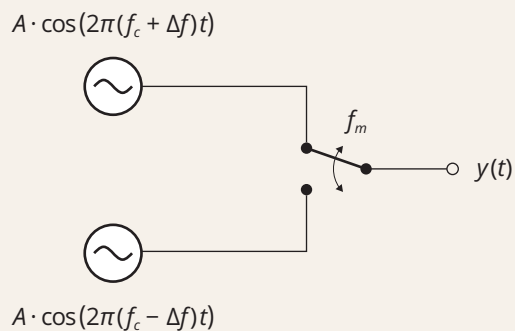
- 5.\* Na slici je prikazan talasni oblik amplitudsko modulisanog signala. Za taj signal skiciraj talasne oblike FM i PM signala.

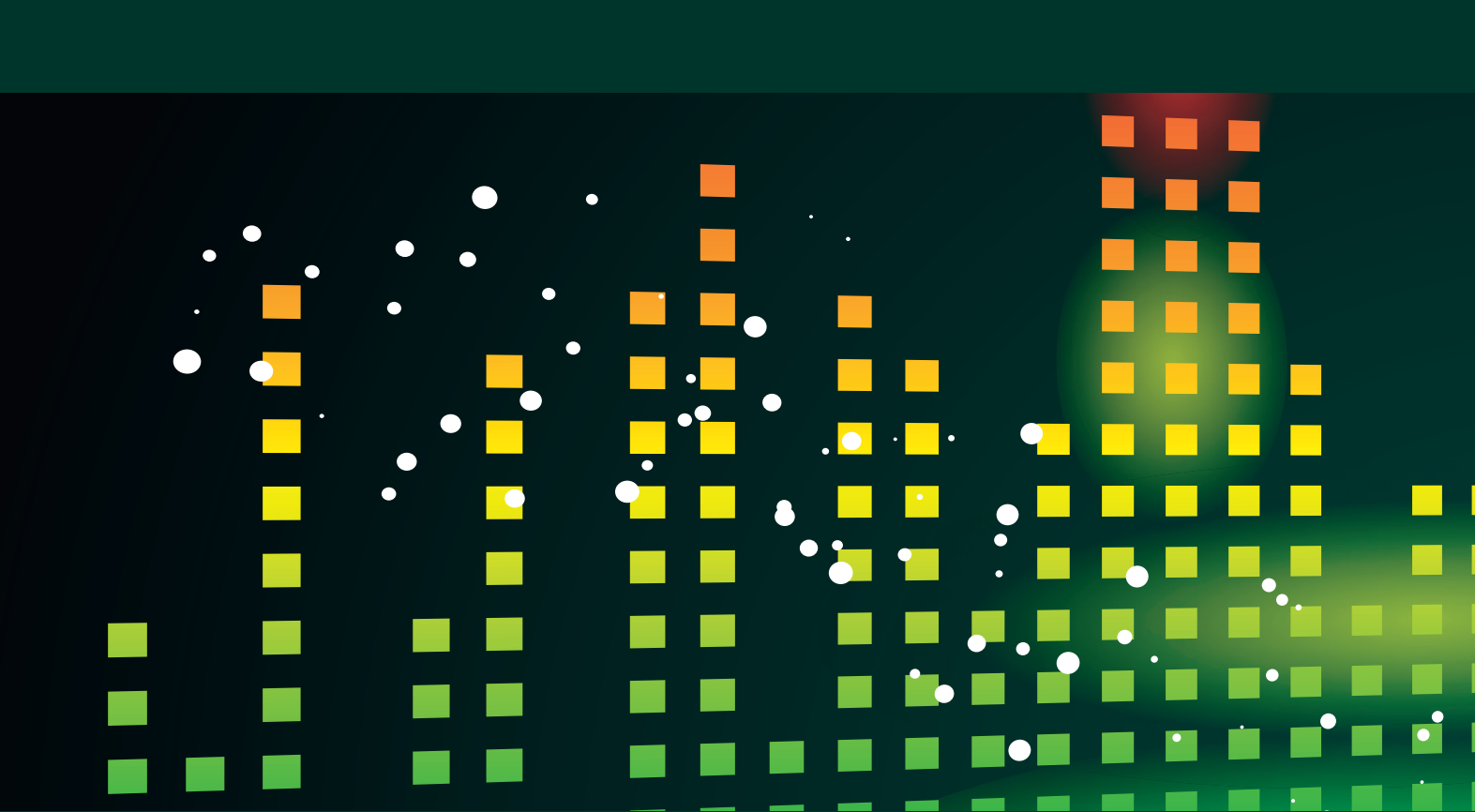


- 6.\* Signal čiji je oblik prikazan na slici naziva se testerasti signal. Skiciraj talasne oblike PM i FM testerastog signala.



7. Skiciraj vremenske oblike i spektre signala pri frekvencijskoj modulaciji ako je modulišući signal govorni (audio – muzički signal).
8. Skiciraj fazno i frekvencijski modulisan signal ako je modulišući signal sinusoida.
- 9.\* Dva izvora generišu signale frekvencija  $f_c + \Delta f$  i  $f_c - \Delta f$  koji se kombinuju u izlazni signal  $y(t)$ , kontrolisan prekidačem kako je prikazano na slici. Prekidač se prebacuje iz jednog u drugi položaj frekvencijom  $f_m$ .
- a) O kojem se tipu multipleksa u ovom slučaju radi?
- b) Skiciraj talasni oblik signala  $y(t)$ .





# 3. Impulsne modulacije

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš načine generisanja različitih vrsta impulsnih modulacija (impulsna amplitudska modulacija, impulsna modulacija po trajanju i impulsna položajna modulacija – IPM)
- objasniš faze u postupku digitalizacije analognog signala – odabiranje, kvantizacija i kodiranje
- opišeš veličine koji utiču na kvalitet prenosa impulsno kodnog modulisanog signala IKM – šum kvantizacije i slučajan šum
- nacrtáš impulsno modulisane signale za zadate parametre
- nacrtáš blok-šemu primopredajnog sistema za zadatu vrstu impulsnih modulacija.



Kao što smo već rekli, prema obliku nosioca postupci modulacije dijele se u dvije grupe: postupci u kojima je nosilac kontinualni signal, i postupci kod kojih je nosilac u obliku periodično ponavljane povorke pravougaonih impulsa.

Do sada smo izučavali modulacije sa nosiocem kao kontinualnim signalom. U ovom poglavlju izučavaćemo **impulsne modulacije** kod kojih signal

nosilac nije kontinualan, već je **diskretan**, u obliku povorke periodičnih pravougaonih impulsa.

U praktikumu laboratorijskih vježbi data je vježba povezana sa sadržajem ovog poglavlja. Njome se vrši snimanje talasnog oblika i spektra impulsno moduliranih signala upotrebom laboratorijskih uređaja.

Engleski inženjer Alek Rivs (1902–1971) patentirao je postupak impulsne kodne modulacije. Kao član tima inženjera odgovornih za prvu komercijalnu telefonsku vezu preko Atlantskog okeana, Rivs je prepoznao mogućnosti koje impulsna kodna modulacija ima za smanjenje šuma kada se govor prenosi na velike udaljenosti. Kod analognog signala, svaki put kada se signal pojačava, šum sadržan u signalu takođe se pojačava. Na taj način stvara se dodatni šum. Kod impulsne modulacije vrši se regeneracija signala, tako da se šum u signalu dodatno ne povećava. Svoj izum Rivs je patentirao 1938. godine. Tada nije bio svjestan da je postavio temelj savremenim telefonskim komunikacijama, pošto je njegova ideja zahtijevala složena kola koja se tada nijesu mogla napraviti. Impulsna kodna modulacija nije se komercijalno koristila sve do

1950-ih, kada ju je pronalazak tranzistora učinio isplativom. Međutim, tokom Drugog svjetskog rata ovaj postupak je ipak korišćen, i to za šifrovanu glasovnu komunikaciju između američkog predsjednika Ruzvelta i britanskog premijera Čerčila.

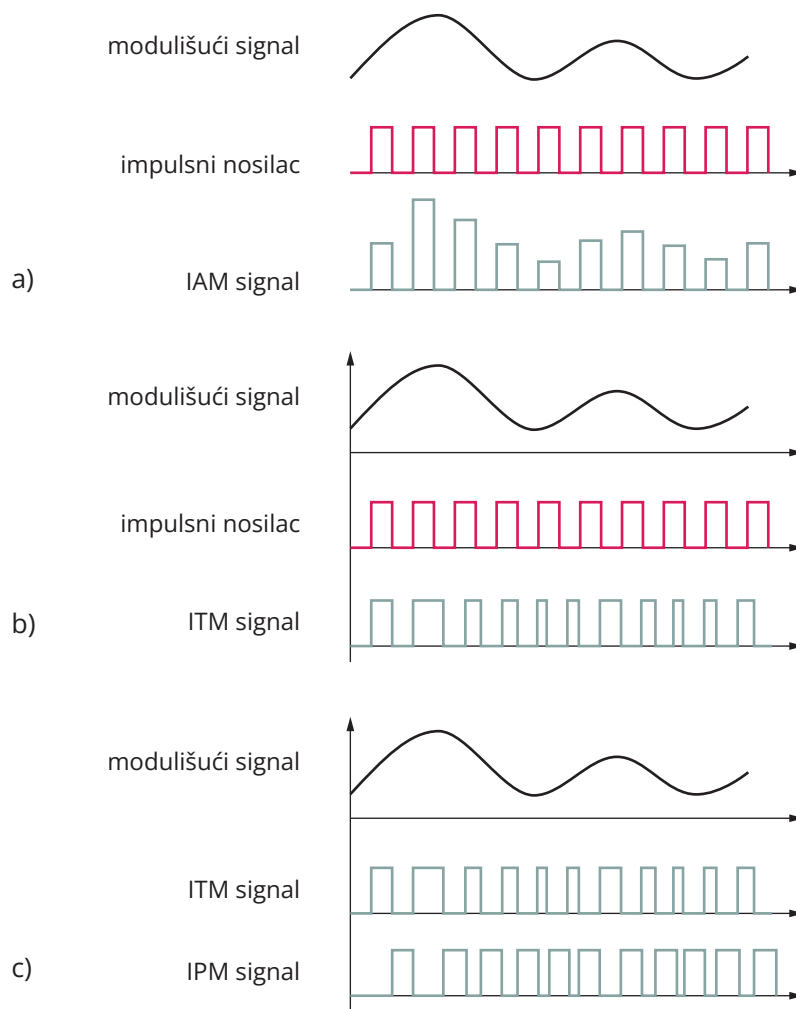


## 3.1. Vrste impulsnih modulacija

U procesu prenosa impulsno moduliranih signala uočavaju se dva različita stanja: u jednom signal postoji, dok ga u drugom nema. Svako od ovih stanja traje određeno konačno vrijeme. To znači da se u jednom intervalu vremena prenosi dio modulišućeg signala, a u drugom vremenskom intervalu signal se ne prenosi, i tako se proces ponavlja odgovarajućom brzinom prema tačno određenoj periodi.

Povorka pravougaonih impulsa ima tri karakteristične veličine: amplitudu  $U_0$ , dužinu trajanja impulsa  $\tau$  i periodu ponavljanja  $T$ . Svaka od ovih veličina može da se mijenja pod dejstvom informacije koja se prenosi. Ako se pod dejstvom informacije mijenja amplituda, a ostale dvije veličine ostaju nepromijenjene, onda se radi o **impulsnoj amplitudskoj modulaciji (IAM)**, slika 3.1a. Ako se trajanje impulsa mijenja tako da ono bude srazmjerno vrijednosti signala informacije, riječ je o **impulsnoj modulaciji po trajanju (ITM)**, slika 3.1b. U slučaju da se u ritmu promjena vrijednosti signala informacije impuls pomjera u odnosu na položaj kada nema modulacije, tada je modulacija **impulsno položajna modulacija (IPM)**, slika 3.1c.





**Slika 3.1.** a) IAM signal u zavisnosti od modulišućeg signala, b) ITM signal u zavisnosti od modulišućeg signala, c) IPM signala u zavisnosti od modulišućeg signala

Posmatranjem slike 3.1c zapažamo da se impulsni nosilac ne pojavljuje kod IPM signala, već je umjesto njega predstavljen ITM signal. Kasnije ćemo vidjeti da je razlog tome što se IPM signal obično dobija iz ITM signala.

Glavna primjena impulsne modulacije jeste u realizaciji sistema multipleksa, kada se po jednom medijumu želi istovremeno prenijeti veći broj poruka. Multipleksi sa vremenskom raspodjelom kanala zasnovani su na prenosu impulsno moduliranih signala. Prisjetimo se da kod multipleksnih sistema zasnovanih na vremenskoj raspodjeli kanala, barem u teoriji, nije moguće da signali iz dva ili više kanala budu istovremeno prisutni u sistemu prenosa, te da su zbog toga sistemi sa vremenskim multipleksom otporni na preslušavanje.

Generisanje impulsno moduliranih signala zasnovano je na odabiranju signala, odnosno na teoremi o odabiranju.



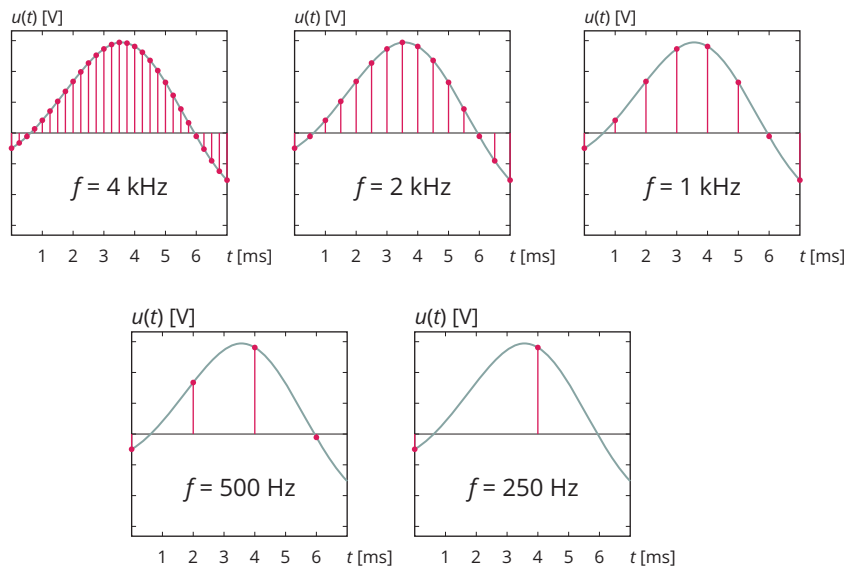
### Veza sa drugim modulima

Multipleksi sa vremenskom raspodjelom kanala objašnjeni su u četvrtom poglavlju udžbenika Elektronske komunikacije I.

### 3.1.1. Odabiranje signala

Sve realne kontinualne poruke koje nose informaciju (govor, muzika, video) imaju beskonačno širok spektar, što teorijski znači da je za njihov prenos potreban beskonačno širok kanal. Međutim, sve značajne komponente tih signala skoncentrisane su u nekom konačnom opsegu učestanosti, od 0 do  $f_m$ . To praktično znači da je spektar realne kontinualne poruke moguće ograničiti, do najveće značajne frekvencije  $f_m$ . Spektralne komponente signala koje su veće od  $f_m$  zanemarljive su, pa se u praktičnim razmatranjima smatra da su jednake 0. Na primjer, za signal govora koji se prenosi telefonskim kanalom, dovoljno je prenijeti njegove komponente koje se nalaze ispod učestanosti od  $f_m = 4$  kHz.

Odabiranje je proces uzimanja (engl. *sampling*) određenog broja vrijednosti iz nekog kontinualnog signala na unaprijed određen način. Ove vrijednosti nazivaju se **odbirci** ili **uzorci**. Signal treba odabirati tako da se on može rekonstruisati i ponovo koristiti ravnopravno kao i originalni. Suština odabiranja jeste da se u određenim vremenskim trenucima, periodično, uzimaju odbirci analognog signala. Zato se kaže da je **odabiranje** prvi korak ka digitalizaciji i predstavlja diskretizaciju kontinualnog signala po vremenu.



**Slika 3.2.** Odbirci analognog signala uzeti različitim učestanostima odabiranja

Sa slike se vidi da će signal biti vjerniji originalnom što je učestanost odabiranja veća. Postavlja se pitanje: kolika treba da bude učestanost odabiranja da bi se signal mogao vjerno rekonstruisati?

Trenutke u kojima treba uzimati odbirke definiše Nikvistova **teorema o odabiranju**:

Ako kontinualni signal  $u(t)$  ima spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti od 0 do  $f_m$ , onda je taj signal u potpunosti definisan svojim trenutnim vrijednostima, uzetim u trenucima vremena, koje se nalaze na međusobnom rastojanju

$$T \leq \frac{1}{2f_m}.$$

Veličina  $T$  naziva se **period odabiranja**. Sklop koji generiše impulse sa periodom  $T$ , koji vrše proces odabiranja, naziva se **takt-generator** (engl. *clock generator*). Recipročna vrijednost periode odabiranja zove se **frekvencija odabiranja** ili brzina odabiranja, i označava sa  $f = \frac{1}{T}$ . Iz gornjeg izraza

može se zaključiti da je  $f \geq 2 \cdot f_m$ . Znači, minimalna brzina odabiranja je  $2 \cdot f_m$ ; ona se naziva i **Nikvistova brzina**. Odbirci imaju konačno trajanje. Ako odbirak traje vrijeme  $\tau$ , onda se količnik trajanja odbirka i periode odabiranja naziva **faktor režima odabiranja**, i označava sa  $\alpha$ . Njegova vrijednost uvijek je manja od 1, jer je  $\tau < T$ , i računa se prema obrascu  $\alpha = \frac{\tau}{T}$ .

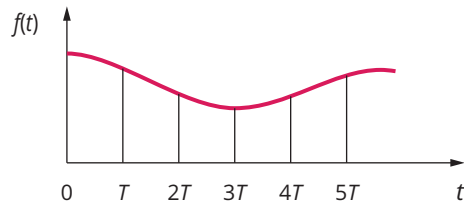
## DODATAK +

### Nikvistova teorema

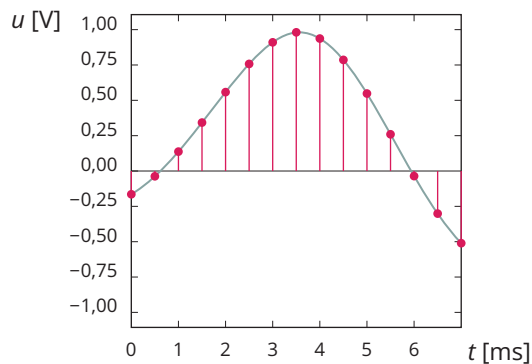
Teorema odabiranja proizilazi iz Nikvistove teoreme. Ona kaže da je uzimanje odbiraka signala sa učestanostima dva puta većim od njegove maksimalne učestanosti, dovoljno da se prenesu sve informacije koje nosi taj signal. Dakle, brzina odabiranja treba da bude jednaka  $2f_m$ . Ako se uzimaju odbirci sa nižom učestanosti, onda se originalni signal ne može vjerno rekonstruisati. Ovo je suština teoreme o odabiranju: ako analogni signal ima spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti od 0 do  $f_m$ , onda je taj signal u potpunosti definisan svojim trenutnim vrijednostima, uzetim u vremen-

skim trenucima  $T = \frac{1}{2f_m}$ .

Trenuci u kojima se vrši odabiranje signala  $u(t)$  prikazani su na slici 3.3. Odbirci signala uzimaju se periodično u vremenu  $T$ , i kratkog su trajanja.



Slika 3.3. Odbiranje kontinualnog signala



Slika 3.4. Uzorkovani kontinualni signal

### PRIMJER 3.1 ▶

Na slici 3.4 prikazan je kontinualni signal sa odbircima uzetim u trenucima sa periodom  $T$ . Izračunati učestanost odabiranja signala ako je period odabiranja  $T = 0,5$  ms.

**Rješenje:**  $f = 1/T = 1/0,0005 \text{ s} = 2 \text{ kHz}$ . ■

### PRIMJER 3.2 ▶

Izračunati period odabiranja i minimalnu brzinu odabiranja govornog signala čija je granična frekvencija  $f_m = 4$  kHz.

**Rješenje:** Po Nikvistovoj teoremi o odabiranju, kontinualni govorni signal, koji ima ograničen spektar od 0 do  $f_m$ , definisan je svojim trenutnim vrijednostima, koje se nalaze na rastojanju  $T$ , pa je perioda odabiranja:

$$T \leq \frac{1}{2f_m} \leq \frac{1}{2 \cdot 4 \text{ kHz}} \leq 125 \mu\text{s}.$$

Minimalna učestanost – brzina odabiranja je:

$$f \geq 2 \cdot f_m \geq 2 \cdot 4 \text{ kHz} \geq 8 \text{ kHz}.$$

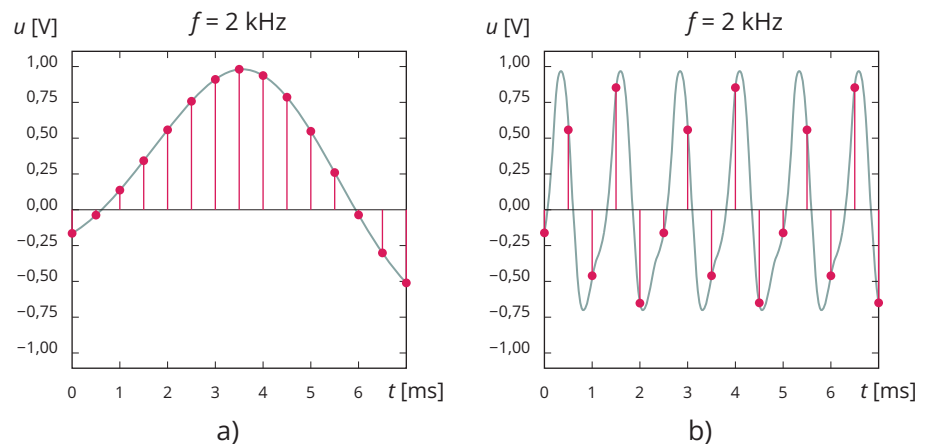
Učestanost odabiranja mogla se dobiti i kao recipročna vrijednost periode odabiranja, što predstavlja minimalnu učestanost odabiranja:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{125 \mu\text{s}} = 8 \text{ kHz}.$$

Dakle, minimalnom brzinom odabiranja govornog signala od  $f = 8 \text{ kHz}$  može se originalni signal vjerno rekonstruisati ako se njegov spektar nalazi do granične frekvencije  $f_m = 4 \text{ kHz}$ . ■

Posljedica teoreme odabiranja jeste da se niskofrekvencijski signali odabiraju manjom, a visokofrekvencijski signali većom brzinom odabiranja.

Na slici 3.5 prikazani su a) niskofrekvencijski, NF i b) visokofrekvencijski VF signal, koji se odabiraju istom učestanosti. NF signal (slika a) iz uzetih odbiraka može se rekonstruisati, dok se VF signal (slika b) ne može uspješno rekonstruisati jer se mijenja isuviše brzo u odnosu na brzinu odabiranja.

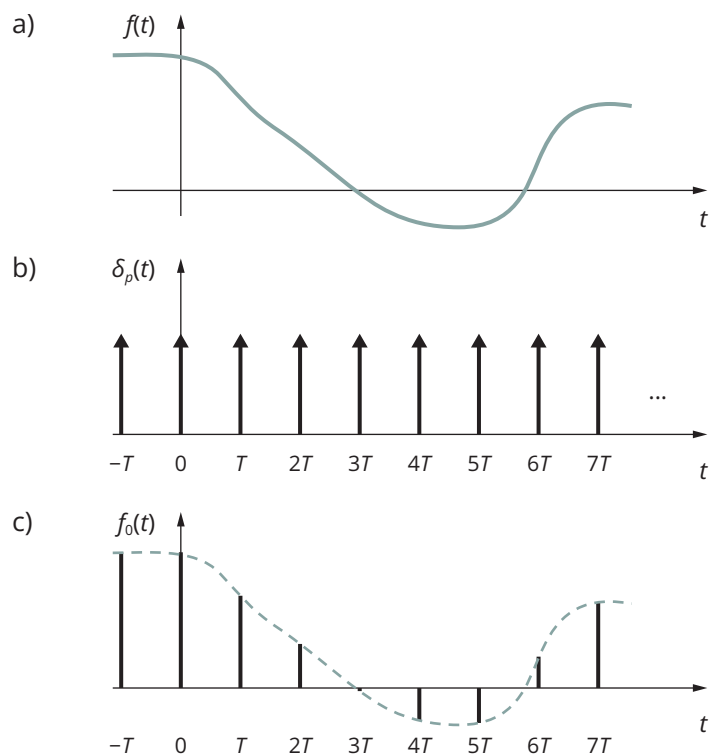


Slika 3.5. Uzimanje odbiraka: a) NF i b) VF signala istom brzinom odabiranja

Iz prethodnog izlaganja može se zaključiti da se može odabirati samo kontinualni signal koji ima ograničen spektar, do granične frekvencije  $f_m$ . Perioda odabiranja, odnosno brzina uzimanja odbiraka, definisane su Nikvistovom teoremom o odabiranju. Broj odbiraka treba da bude takav da se signal na osnovu uzetih odbiraka (uzorkovani signal) može vjerno rekonstruisati u korisni kontinualni signal.

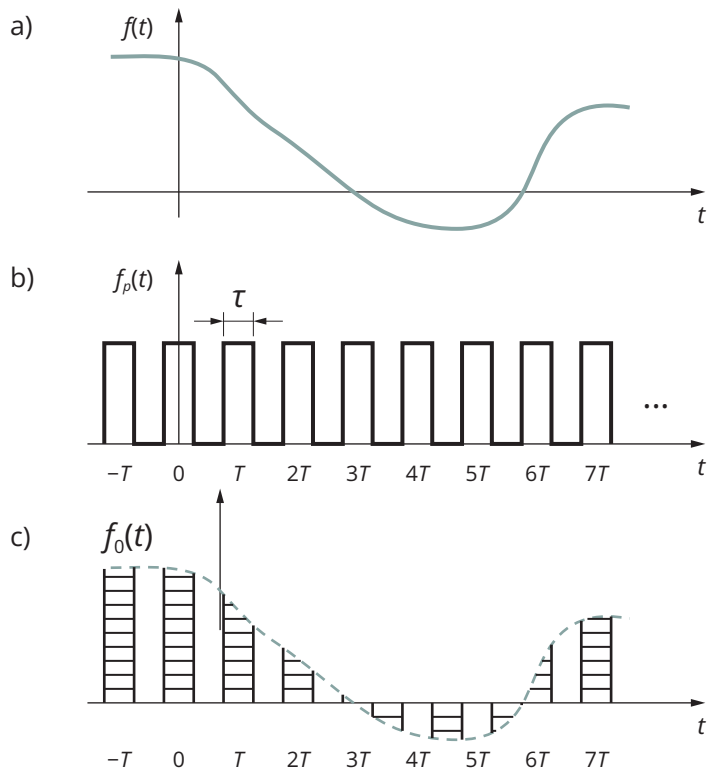
Postoje tri vrste odabiranja: **idealno**, **prirodno** i **regularno odabiranje** kontinualnog signala. U sva tri slučaja odabiranja važi Nikvistova teorema o odabiranju. Razlika je u načinu dobijanja i obliku odbiraka signala.

U slučaju **idealnog** odabiranja signala, u periodičnim trenucima vremena, uzimaju se odbirci signala kojima se prate amplitude korisnog signala. Odbirci traju kratko vrijeme. Ovakav tip odabiranja signala može se dobiti množenjem kontinualnog složenog korisnog signala sa periodičnim pravougaonim signalom, periode  $T$ , čije trajanje teži ka nuli, dok mu amplituda ima veliku vrijednost. Takva funkcija u matematici se zove *Dirakova* ili *delta* funkcija. Na slici 3.6 prikazan je način idealnog odabiranja korisnog signala, gdje je  $f(t)$  – signal koji se odabira,  $\delta_p(t)$  – Dirakova funkcija i  $f_0(t)$  funkcija sa odbircima pri idealnom odabiranju signala.



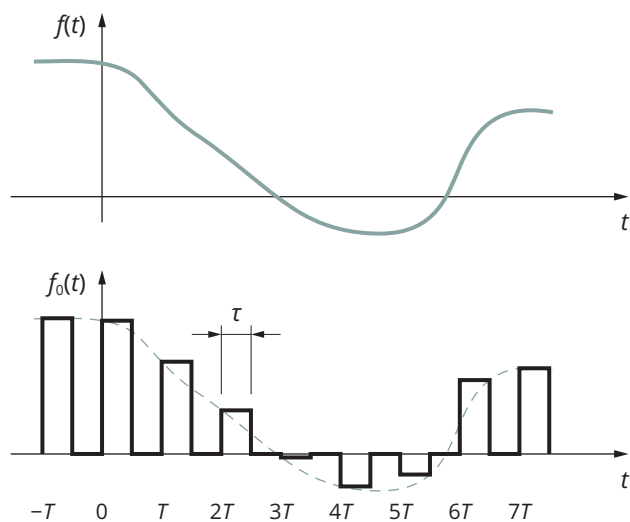
**Slika 3.6.** Idealno odabiranje kontinualnog signala

Proces **prirodnog** odabiranja kontinualnog signala može se predstaviti množenjem signala koji se uzorkuje, sa povorkom niza pravougaonih impulsa periode  $T$  i trajanja  $\tau$ . Amplitude uzorkovanog signala prate amplitude signala koji se uzorkuje. Odabiranje korisnog signala može se izvesti i pomoću prekidača, koji radi brzinom  $f$  i koji ima dva položaja: u prvom položaju prekidač propušta korisni signal, i to traje  $\tau$  (onoliko koliko traje pravougaoni impuls); u drugom položaju korisni signal ne prenosi se na izlaz (tada nema odbirka i na izlazu se dobija 0). Na slici 3.7 prikazan je proces prirodnog odabiranja kontinualnog signala, gdje je  $f_p(t)$  niz pravougaonih impulsa, periode  $T$ .



Slika 3.7. Prirodno odabiranje kontinualnog signala

**Regularno** odabiranje signala slično je prirodnom odabiranju. Signal koji vrši odabiranje takođe je niz pravougaonih impulsa, kao i kod prirodnog odabiranja. Odbirci signala u ovom slučaju se dobijaju tako što se u trenucima odabiranja uzimaju vrijednosti signala koji se odabira i ta vrijednost se zadržava za vrijeme  $\tau$ . Postupak regularnog odabiranja prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8. Regularno odabiranje korisnog kontinualnog signala

### PRIMJER 3.3 ▶

Izračunati faktor režima odabiranja pri regularnom odabiranju korisnog kontinualnog signala ako je trajanje odbiraka signala jednako polovini periode odabiranja.

**Rješenje:** Kod regularnog odabiranja korisnog kontinualnog signala, odbirak traje vrijeme  $\tau$ . Faktor režima odabiranja jeste količnik trajanja odbirka i periode odabiranja. Iz uslova zadatka važi da je  $\tau = \frac{1}{2} \cdot T$ , pa je faktor režima odabiranja:

$$\alpha = \frac{\tau}{T} = \frac{\frac{1}{2} \cdot T}{T} = \frac{1}{2} = 0,5.$$

Faktor režima odabiranja uvijek je manji od 1 zato što vrijedi da je  $\tau < T$ . ■

### KONTROLNO PITANJE K3.1 ▶

Provjeri tačnost tvrđenja: da bi se signali visokih frekvencija mogli rekonstruisati, potrebno je da se odabiraju sa manjom periodom odabiranja.

**Odgovor:** Tvrđenje je tačno. Posljedica teoreme odabiranja jeste da se visokofrekvencijski signali odabiraju većom brzinom odabiranja. Period odabiranja predstavlja recipročnu vrijednost brzine odabiranja.

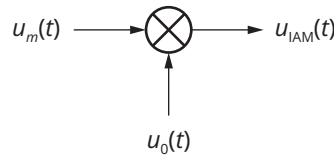
## 3.1.2. Generisanje i demodulacija impulsno modulisanih signala

### 3.1.2.1. Generisanje i demodulacija impulsno amplitudski modulisanih signala (IAM)

Postupkom prirodnog odabiranja, opisanim u prethodnom odjeljku, iz analognog, modulišućeg signala dobija se impulsno-amplitudski modulisani (IAM) signal. Modulisani signal nastao u ovom postupku, predstavlja povorku impulsa čije je vrijeme trajanja, kao i perioda odabiranja, konstantne veličine. Amplituda impulsa zavisi od amplitude modulišućeg signala u tački odabiranja.

IAM signal  $u_{IAM}(t)$  dobija se množenjem modulišućeg, korisnog signala  $u_m(t)$  i signala  $u_0(t)$  koji predstavlja povorku pravougaonih impulsa, periode  $T$  i učestanosti  $f$ . Na slici 3.9 prikazan je sklop za dobijanje IAM signala.

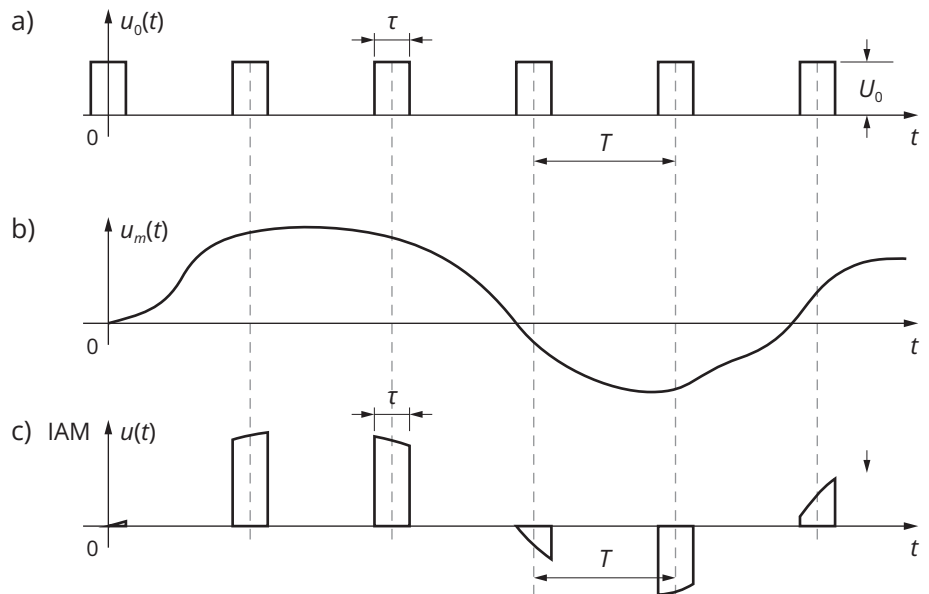




**Slika 3.9.** Blok-šema uređaja za dobijanje IAM signala

Na slici 3.10a je signal nosilac, povorka pravougaonih impulsa sa periodom ponavljanja  $T$ . Modulišući signal, odnosno signal koji nosi informaciju, prikazan je na slici 3.10b.

Impulsno amplitudsko modulirani signal (IAM) prikazan je na slici 3.10c. IAM signal je povorka impulsa čiji su parametri trajanje i perioda ponavljanja konstantni, tj. isti kao i kod signala nosioca, dok mu se amplituda mijenja u ritmu promjena modulišućeg signala.



**Slika 3.10.** Formiranje IAM signala: a) signal nosilac, b) modulišući signal, c) IAM signal

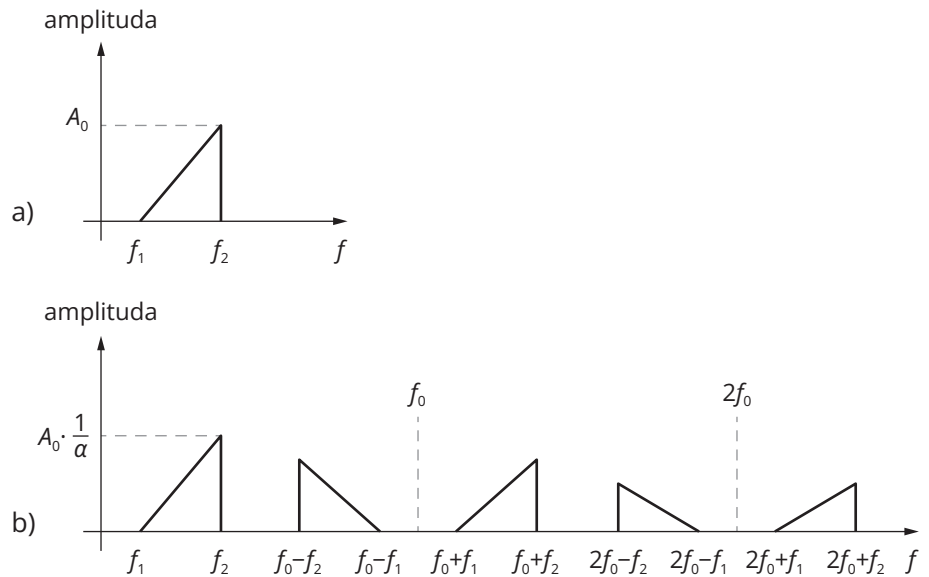
IAM signal u vremenskom obliku sastoji se od odbiraka, koji traju vrijeme  $\tau$ ; oni se ponavljaju poslije vremena  $T$  sa učestanošću  $f$ .

Spektar IAM signala određuje se složenim matematičkim postupkom, koji ćemo izostaviti.

Spektar IAM signala beskonačno je širok. Sastoji se od beskonačnog broja spektralnih komponenti, koje su grupisane oko cjelobrojnog umnoška učestanosti nosilaca  $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, \dots, nf_0$ , od kojih svaka komponenta predstavlja spektar modulišućeg signala sa dva bočna opsega. Pored grupisanih spektralnih komponenti, spektar IAM signala ima i dio spektra od  $f_1$  do  $f_2$ , koji odgovara

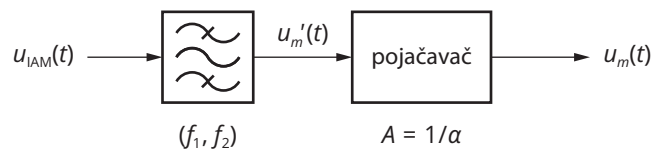
spektru modulišućeg signala. Spektar IAM signala ne sadrži spektralne komponente signala nosioca. Amplitude spektralnih komponenti bočnih opsega se smanjuju, sa povećanjem umnožaka učestanosti signala nosioca.

Izgled spektra modulišućeg i IAM signala, prikazan je na slici 3.11.



Slika 3.11. a) Spektar modulišućeg signala, b) spektar IAM signala

Izgled spektra IAM signala ukazuje na način njegove demodulacije. Jednostavno, potrebno je ukloniti sve bočne opsege čija učestanost prevazilazi maksimalnu učestanost u spektru modulišućeg signala. To se može postići filtrom propusnikom opsega učestanosti, od  $f_1$  do  $f_2$ . Zaključujemo da je postupak demodulacije IAM signala jednostavan, i da se izvodi dovođenjem IAM signala na filter propusnik opsega učestanosti. Na izlazu filtra dobija se modulišućí signal  $u_m'(t)$  koji je oslabljen  $\frac{1}{\alpha}$  puta, gdje je  $\alpha$  faktor režima odabiranja. Zato je potrebno na izlazu filtra propusnika opsega učestanosti povezati pojačavač čije je pojačanje  $A = \frac{1}{\alpha}$ . Blok-šema za prijem IAM signala data je na slici 3.12.



Slika 3.12. Blok-šema demodulatora IAM signala

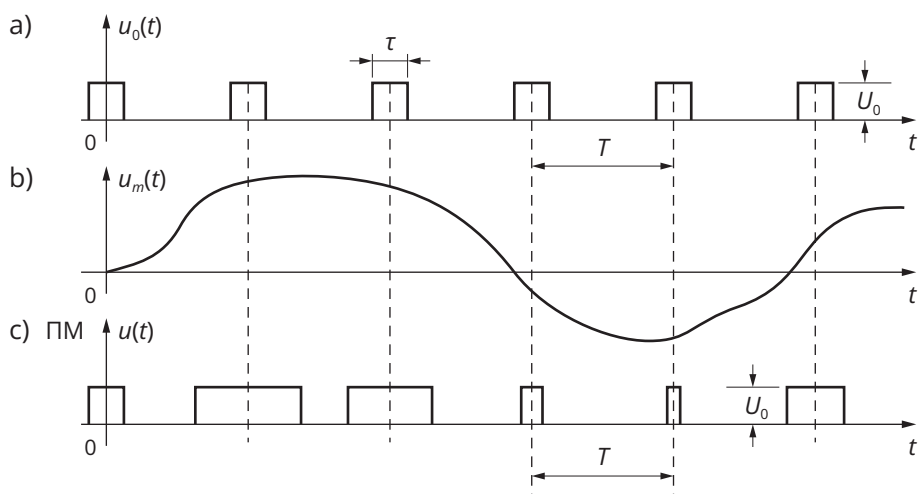
Na postupku odabiranja zasnovan je rad uređaja koji generišu i ostale impulsno modulisane signale.

## Primjer iz prakse

Osim u telekomunikacijama, IAM signali primjenjuju se u računarskoj tehnici – u lokalnim računarskim mrežama za povezivanje računara (ethernet standard), kao i u grafičkim karticama namijenjenim za prenos signala velikim brzinama – radi smanjenja odnosa signal/šum. Osim toga, IAM signali često se koriste i kao upravljački signali u mikrokontrolerima, kao i u sistemima energetske efikasnosti za upravljanje LED osvjetljenjem. Posebno važnu ulogu imaju u digitalnoj televiziji, gdje se koriste za dobijanje oštrijih slika. Primjenjuju se i u foto-biologiji za mjerenje odgovarajućih procesa tokom fotosinteze.

### 3.1.2.2. Generisanje i demodulacija impulsno modulisanih signala po trajanju (ITM)

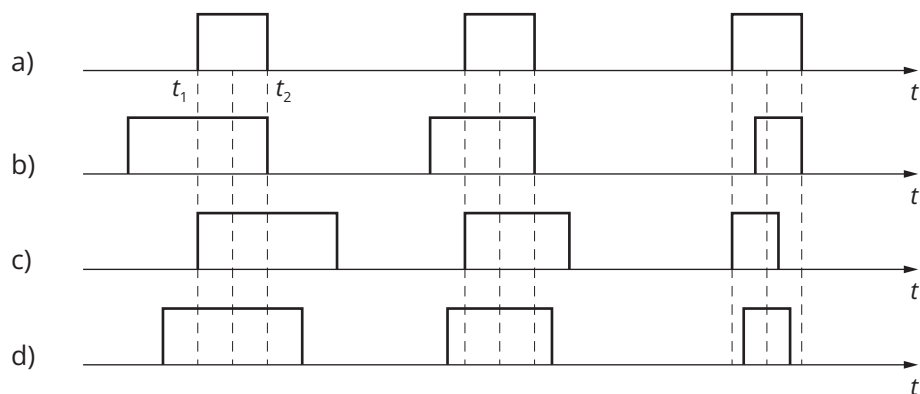
Ako se trajanje impulsa mijenja tako da ono bude srazmjerno vrijednosti amplituda signala informacije, riječ je o ITM modulaciji. Signal na slici 3.13c impulsno je modulisan po trajanju. Sa slike se vidi da se promjena dužine trajanja ITM impulsa mijenja u skladu sa promjenama modulišućeg signala, dok su druga dva parametra – perioda ponavljanja i amplituda – konstantni.



**Slika 3.13.** Formiranje ITM signala:

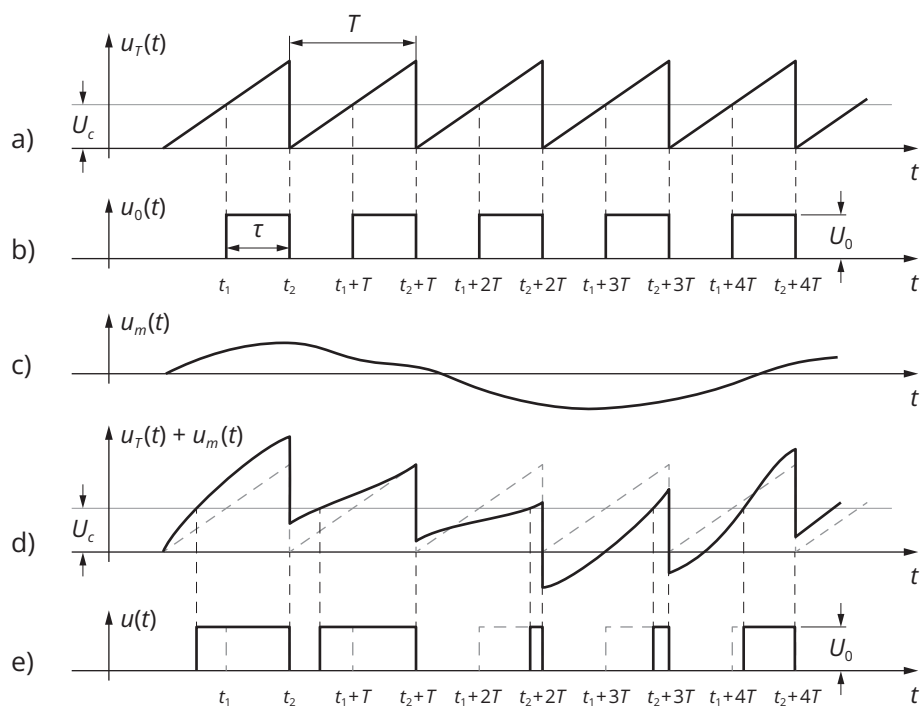
a) signal nosilac, b) modulišući signal, c) ITM signal

Znači, dužina trajanja ITM impulsa mijenja se u skladu sa promjenom amplitude modulišućeg signala. Dužina trajanja može se ostvariti na tri načina: pomjeranjem samo prednje ivice impulsa ( $t_1$ ), pomjeranjem samo zadnje ivice impulsa ( $t_2$ ), ili simetričnim pomjeranjem prednje i zadnje ivice impulsa u odnosu na sredinu nemonulisanog impulsa. Načini pomjeranja impulsa prikazani su na slici 3.14 (b, c, d).



**Slika 3.14.** Vrste ITM po trajanju: a) nemodulirani signal, b) modulacija položaja prednje ivice, c) modulacija položaja zadnje ivice, d) modulacija položaja prednje i zadnje ivice impulsa

Jedan od postupaka realizacije impulsne modulacije po trajanju, ako je korisni signal testerasti, prikazan je na slici. 3.15.



**Slika 3.15.** Talasni oblici karakteristični u realizaciji ITM: a) ulazni testerasti signal, b) signal nosilac, c) modulišući signal, d) zbir testerastog napona i modulišućeg signala, e) pravougaoni signal na izlazu generatora

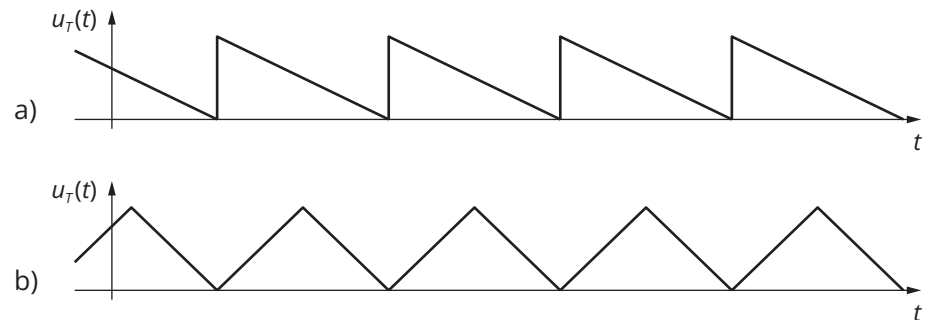
U ovom postupku koristi se elektronski sklop koji ima osobinu da na svom izlazu generiše pravougaoni impuls, koji traje sve dok je pobudni napon veći od neke određene vrijednosti. Ako se na ulaz ovakvog sklopa dovede napon testerastog oblika  $u_T(t)$  kao što je prikazano na slici 3.15a, i ako je za pobudu potrebno da ulazni napon bude veći od  $U_c$ , onda će se u svakom intervalu

## NAPOMENA

Promjena položaja zadnje i/ili obje ivice impulsa postiže se generisanjem oblika testerastog napona onako kako je prikazano na slici 3.16. To znači da se sa oblikom testerastog napona može promijeniti položaj prednje, zadnje ili obje ivice impulsa, i na taj način promijeniti trajanje impulsa, i to tako da bude srazmjerno vrijednosti amplitude modulišućeg signala.

vremena u kojem je  $u_T(t) > U_c$  generisati na izlazu po jedan pravougaoni impuls. Na taj se način od testerastog napona dobija povorka pravougaonih impulsa, što je prikazano na slici 3.15b.

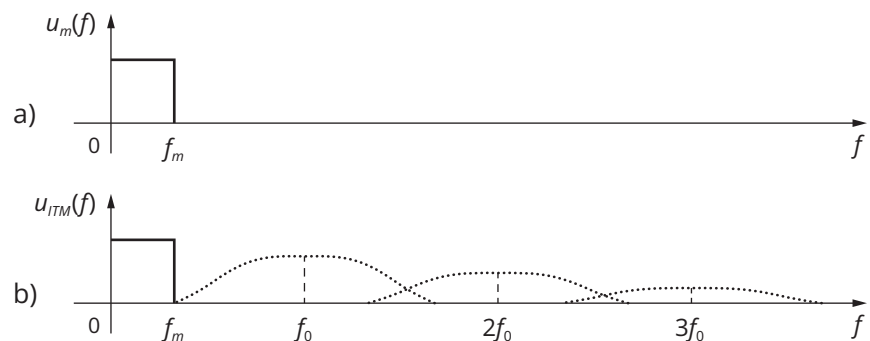
Ako se izvori testerastog i modulišućeg napona redno povežu, onda će pobudni napon sklopa biti jednak njihovom zbiru:  $u_T(t) + u_m(t)$ . Na izlazu sklopa dobiće se impulsi modulisani po trajanju, kod kojih se pomjera prednja ivica, a zadnja ostaje u fiksnom položaju. Vrijeme trajanja impulsa definisano je relacijom  $u_T(t) + u_m(t) > U_c$ .



**Slika 3.16.** Talasni oblici testerastog napona koji moduliše položaj: a) zadnje i b) obje ivice impulsa

Spektar ITM signala složen je i sadrži spektar modulišućeg signala, kao i beskonačan niz harmonika na višim učestanostima grupisanih oko umnožaka učestanosti signala nosioca. Zbog toga je postupkom demodulacije ITM signala iz složenog spektra potrebno izdvojiti NF učestanosti, koje predstavljaju spektar modulišućeg signala. Na izlazu filtra dobija se modulišućí signal.

Na slici 3.17 prikazan je spektar signala poruke i spektar ITM signala.



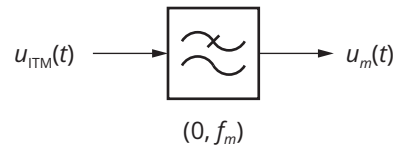
**Slika 3.17.** Spektar signala poruke i ITM signala: a) spektar signala poruke, b) spektar ITM signala

Demodulacija ITM signala se, dakle, zasniva na dovođenju ITM signala na filter propusnik niskih učestanosti. Ovo je direktna demodulacija ITM signala,

## NAPOMENA

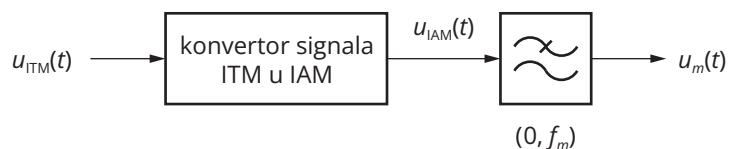
U realnim uslovima, usljed preklapanja dijela spektra modulišućeg signala i grupisanih djelova spektra oko umnožaka učestanosti signala nosioca, može doći do izobličenja. Izobličenje će biti manje ako je učestanost signala nosioca veća.

i predstavlja prvi način demodulacije. Na slici 3.18 prikazana je blok-šema demodulatora ITM signala metodom direktnog filtriranja.



Slika 3.18. Demodulacija ITM signala direktnim filtriranjem

Drugi način demodulacije ITM signala vrši se tako što se prvo ITM signal pretvori u IAM signal, koji se zatim demoduliše upotrebom filtra propusnika niskih učestanosti, na čijem se izlazu dobija modulišuci signal. Blok-šema demodulatora ITM signala sa konvertorom signala prikazana je na slici 3.19.



Slika 3.19. Blok-šema demodulatora ITM signala sa konvertorom signala

ITM signali imaju veliki nedostatak, jer se u njihovim impulsima troši energija koja ne nosi informaciju. Zbog toga se u praksi sistemi sa ITM, kao što ćemo vidjeti u narednom odjeljku, uglavnom koriste za generisanje IPM signala, koji u telekomunikacijama imaju mnogo veću primjenu.

## Primjer iz prakse

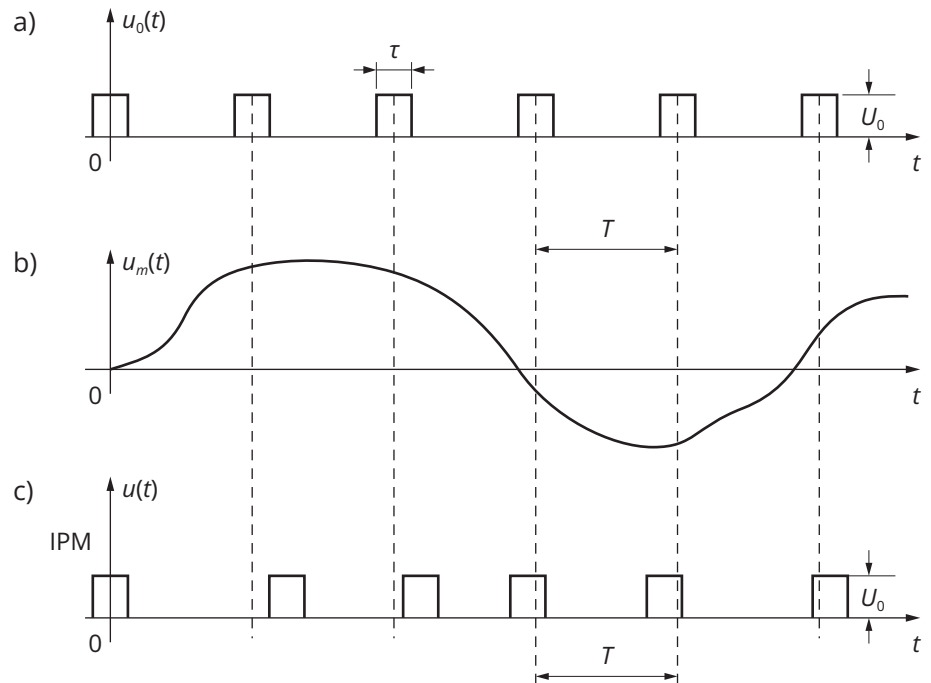
ITM signali, osim u telekomunikacijama, imaju možda značajniju primjenu u drugim oblastima. U elektroenergetici se koriste za regulaciju napona napajanja, za kontrolu brzine DC i AC motora, za upravljanje kolima koja pretvaraju naizmjeničnu struju u jednosmjernu i slično. U robotici se koriste za kontrolu brzine motora koji upravljaju robotima. ITM ima primjenu i u akustici, u procesu sinteze zvuka, radi stvaranja posebnih zvučnih efekata.

Na primjeni ITM u audio-tehnici zasnovana je nova klasa audio-pojačavača, koja se naziva „klasa D“. Ti pojačavači proizvode ITM ekvivalent analognog ulaznog audio-signal, koji se potom vodi na zvučnike preko odgovarajuće mreže filtera. Filtriranjem se ITM signal demoduliše i vraća na originalan audio-signal. Ovaj postupak daje visok kvalitet zvuka i sa zvučnicima manjih veličina i manje snage.

Zanimljiv primjer ITM signala u industriji zabave jeste u upravljanju osvjetljenjem. ITM signal upravlja prekidačem za uključivanje i isključivanje sijalice. Dok je prekidač uključen, sijalica svijetli; kada je prekidač isključen, sijalica ne svijetli. Podešavanjem trajanja ITM signala podešava se vrijeme tokom kojeg sijalica svijetli.

### 3.1.2.3. Generisanje i demodulacija impulsno položajnog modulisanog signala (IPM)

Modulacija je impulsno položajna (IPM) ako se, u ritmu promjena vrijednosti korisnog signala, impuls pomjera u odnosu na položaj kada nema modulacije. Na slici 3.20 prikazan je način formiranja IPM signala.



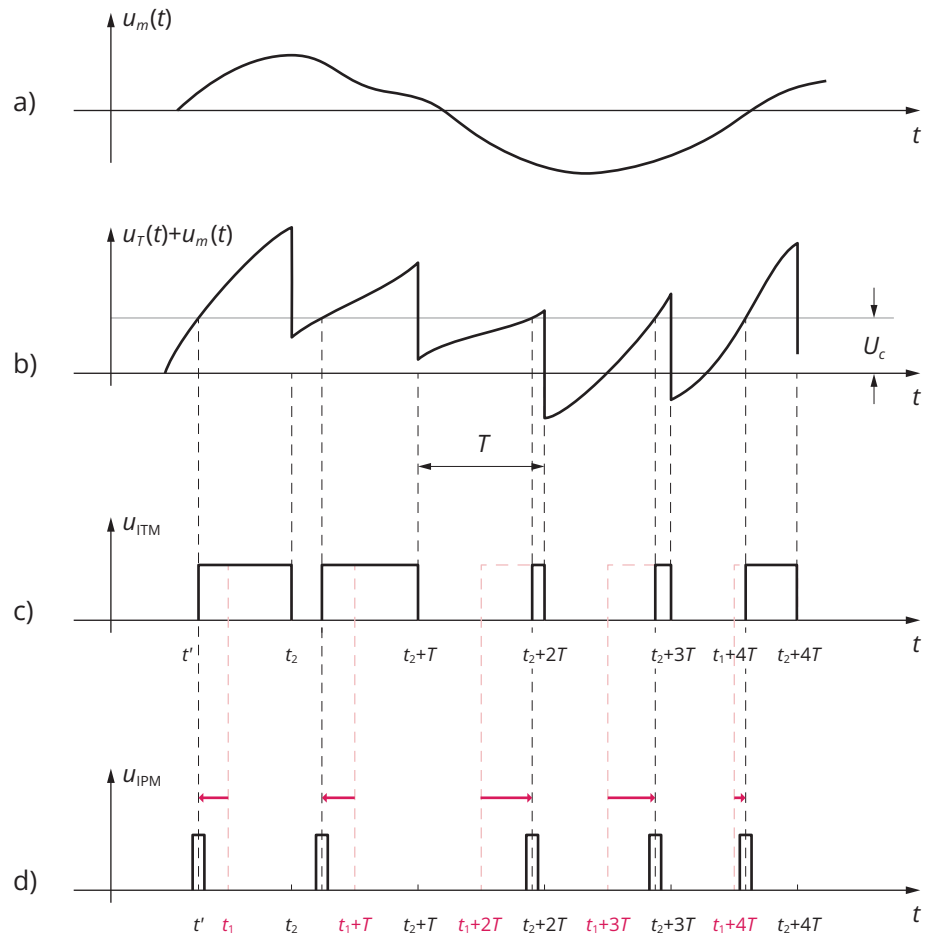
**Slika 3.20.** Formiranje IPM signala:  
a) signal nosilac, b) modulišući signal, c) IPM signal

Signal na slici 3.20c impulsno je modulisan po položaju (IPM). IPM impuls pomjera se lijevo-desno, pri čemu je njegovo odstupanje od srednjeg položaja srazmjerno promjenama modulišućeg signala. Ostala dva parametra – amplituda i dužina trajanja IPM impulsa – konstantni su.

Kod ITM signala samo promjenljivi položaj ivice impulsa predstavlja informaciju. Kako ostali dio impulsa ne sadrži nikakvu informaciju, onda ga je, radi uštede energije, nepotrebno i prenositi. Na ovoj ideji zasnovana je realizacija sistema sa IPM. Ako promjena položaja prednje ivice predstavlja informaciju, onda se umjesto cijelog signala može prenositi samo uzak impuls, konstantnog trajanja, koji svojim položajem u vremenu definiše položaj prednje ivice ITM signala. Tako i nastaje impulsna položajna modulacija.

Modulatori IPM signala na svom ulazu imaju električno kolo koje generiše ITM signal. Dobijeni ITM signal zatim se vodi na ulaz sljedećeg elektronskog sklopa. Ovaj sklop je konstruisan tako da na svom izlazu generiše impuls kratkog trajanja u onom trenutku kada ivica ITM signala

dostigne napon unaprijed definisane vrijednosti, kontrolni napon. Na slici 3.21 prikazani su talasni oblici za dobijanje IPM signala. Kontrolni napon označen je sa  $U_c$ .



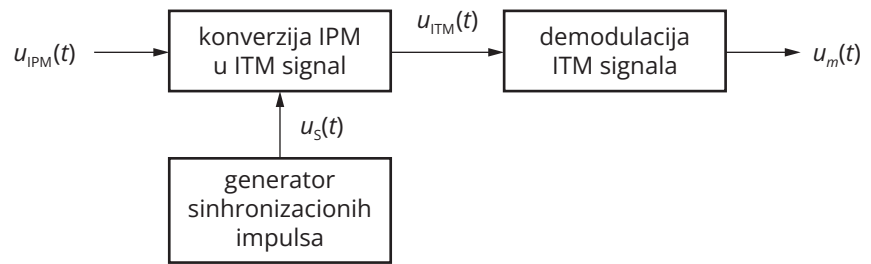
**Slika 3.21.** Talasni oblici za dobijanje IPM signala: a) modulišući signal, b) zbir testerastog napona i modulišućeg signala c) ITM signal i d) IPM signal

Zaključujemo da se IPM signal dobija vezivanjem generatora ITM signala sa sklopom koji vrši konverziju ITM u IPM signal. Zbog ove konverzije, spektar IPM signala složeniji je u odnosu na spektar ITM signala.

Postupak demodulacije IPM signala najčešće se obavlja tako što se na prijemu obavi konverzija IPM u ITM signal, pa se ITM signal demoduliše na način opisan u prethodnom odjeljku.

Na slici 3.22 prikazana je blok-šema demodulatora IPM signala koji se konvertuje u ITM signal.





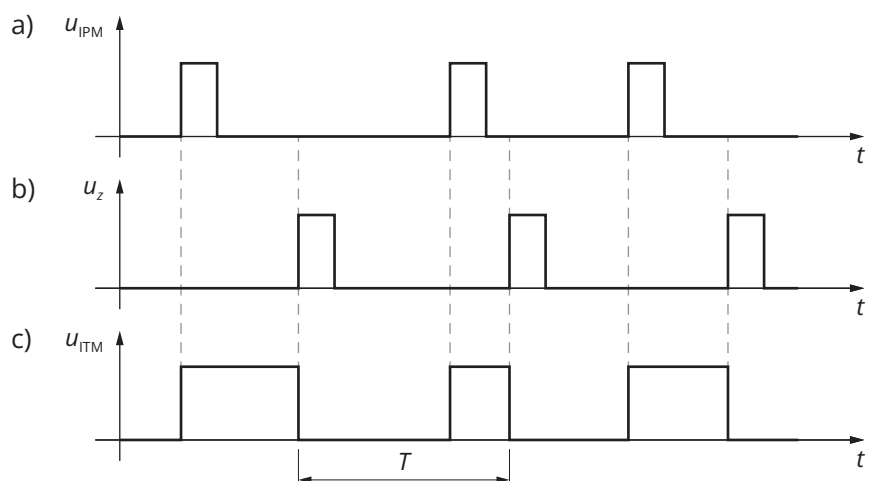
**Slika 3.22.** Blok-šema demodulatora IPM signala koji se konvertuje u ITM signal

Konverzija IPM u ITM signal obavlja se u elektronskom kolu koje ima dva ulaza i izlaz sa dva stabilna stanja. Na jedan ulaz dovode se impulsi IPM signala, a na drugi ulaz dovode se impulsi za sinhronizaciju. Jedno stabilno stanje uspostavlja se pod uticajem IPM signala, a drugo pod uticajem sinhronizacionih impulsa, koje generiše odgovarajući generator.

U trenutku kada se na jednom ulazu kola pojavi prednja ivica impulsa IPM signala, tada se na njegovom izlazu uspostavi prvo stabilno stanje – napon konstantne vrijednosti. Impuls iz sinhronizacionog generatora, koji se dovodi na drugi ulaz sklopa, uspostavlja drugo stabilno stanje – napon čija je vrijednost jednaka nuli.

Generator sinhronizacionih impulsa generiše periodičnu povorku impulsa. Zadatak sinhronizacionih impulsa jeste da se, podešavanjem njihove periode, podešava vrijeme uspostavljanja drugog stabilnog stanja (vraćanje prethodno uspostavljenog, konstantnog napona, na nulu) na izlazu iz kola. Na ovaj način određuje se trajanje napona konstantne vrijednosti, tj. dobijaju se signali modulisani po trajanju.

Talasnici za dobijanje IPM signala prikazani su na slici 3.23.



**Slika 3.23.** Konverzija IPM u ITM signal:

a) IPM signal, b) sinhronizacioni impulsi, c) ITM signal

IPM signali su manje osjetljivi na šum u odnosu na IAM signale. Osim toga, u IPM impulsima se, za razliku od ITM signala, ne prenosi energija koja nema nikakvu funkciju. Ovo su osnovne prednosti IPM u odnosu na IAM i ITM. Zbog ovih osobina, IPM ima glavnu primjenu u sistemima multipleksnog prenosa govora sa malim brojem kanala (12, 24, 36 i 60 kanala).

Iz izloženog možemo izvesti zaključak da se u impulsnim modulacijama spektar korisnog modulisanog signala zadržava u svom opsegu, odnosno da u spektru tog signala postoje komponente niskih učestanosti. Zbog toga se prenos ovakvih signala realizuje preko fizičkih vodova, bez potrebe prenošenja njihovog spektra učestanosti u VF oblasti. Osnovna operacija pri obradi korisne poruke jeste odabiranje signala poruke. Demodulacija impulsno modulisanih signala jednostavna je, i vrši se propuštanjem poruke odbiraka kroz filter propusnik opsega učestanosti.

#### Primjer iz prakse

Osim u telekomunikacijama, impulsna položajna modulacija ima i druge primjene. Na primjer, IPM signali koriste se za daljinsko upravljanje letjelica, automobila, čamaca i drugih vozila, a odgovorni su za prenos upravljačkih signala između upravljačke jedinice i prijemnika u vozilima na daljinsko upravljanje. Pozicija svakog impulsa može opisati odgovarajuću naredbu koju uređaj može primiti. IPM signali koriste se i u uređajima za kontrolu pristupa, kao što su beskontaktno kartice.

## 3.2. Impulsna kodna modulacija

Impulsna kodna modulacija (IKM) spada u grupu impulsnih modulacija, jer modulirani signal ima diskretan talasni oblik. Međutim, filozofija sistema za prenos signala IKM-om bitno se razlikuje od koncepcija usvojenih u realizaciji svih ostalih vrsta modulacije, uključujući tu i impulsne modulacije.

IKM se mnogo češće označava sa PCM (engl. *pulse code modulation*). Ona predstavlja standard u prenosu digitalnog audio-signala u telefoniji, računarima, u snimanju na optičkim diskovima, a ima i mnoge druge primjene u audio-tehnici.

Princip na kojem se zasniva postupak impulsne kodne modulacije zasnovan je na postupku pretvaranja (konverzije) analognih signala u digitalne.

### 3.2.1. Pretvaranje analognog signala u digitalni

Postupak pretvaranja analognih signala u digitalni oblik naziva se analo-digitalna konverzija, ili skraćeno A/D konverzija. Pri A/D konverziji mijenja se talasni oblik signala: kontinualni signal pretvara se u povorku pravougaonih impulsa, odnosno u digitalni signal.

Ovaj proces mora se pažljivo izvesti. U telekomunikacijama, analogni signal nosi informaciju. Ako se u predajniku, zbog potreba prenosa, signal digitalizuje, tj. izvrši njegova A/D konverzija, onda se u prijemniku digitalni signal mora rekonstruisati, odnosno vratiti u analogni oblik. Ovaj postupak, suprotan A/D konverziji, naziva se digitalno-analoga konverzija, ili skraćeno D/A konverzija. Ako je postupak A/D konverzije bio takav da se u njemu izgubi dio informacije koja se prenosi, onda se ta informacija ne može rekonstruisati.

Proces pretvaranja analognih signala u digitalni oblik odvija se u tri glavne faze: **odabiranje**, **kvantizacija** i **kodiranje**.

Faza odabiranja detaljno je objašnjena u prethodnom odjeljku, pa ćemo u daljem tekstu razmotriti faze kvantizacije i kodiranja.

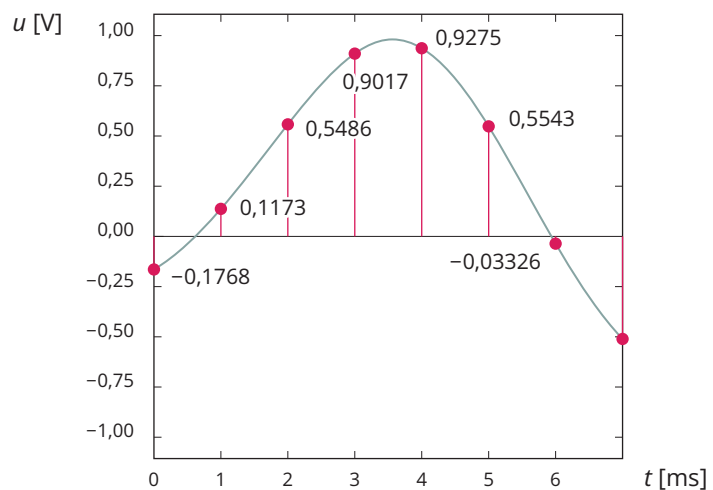
#### 3.2.1.1. Kvantizacija

Odabiranje, tj. uzimanje uzoraka analognog signala, predstavlja prvu fazu u A/D konverziji. Postupkom odabiranja signala modulišući signal predstavljen je konačnim brojem odbiraka kontinualno promjenjivih amplituda. Druga faza je kvantizacija signala. Kvantizacija signala predstavlja zaokruživanje odbiraka na odgovarajuću, definisanu vrijednost. Kao što smo ranije naveli, odabiranje predstavlja diskretizaciju po vremenu, dok kvantizacija predstavlja diskretizaciju po trenutnim vrijednostima.

Tačnost rekonstruisanog signala zavisi i od vrijednosti amplituda koje se dodjeljuju odbircima. U postupku kvantizacije, beskonačan skup vrijednosti amplituda analognog signala čini se konačnim. To se vrši dodjelom odgovarajućih vrijednosti amplitudama iz prethodno definisanog skupa. Ovaj postupak se naziva kvantizacija.

Razmotrimo postupak kvantizacije na sljedećem primjeru.

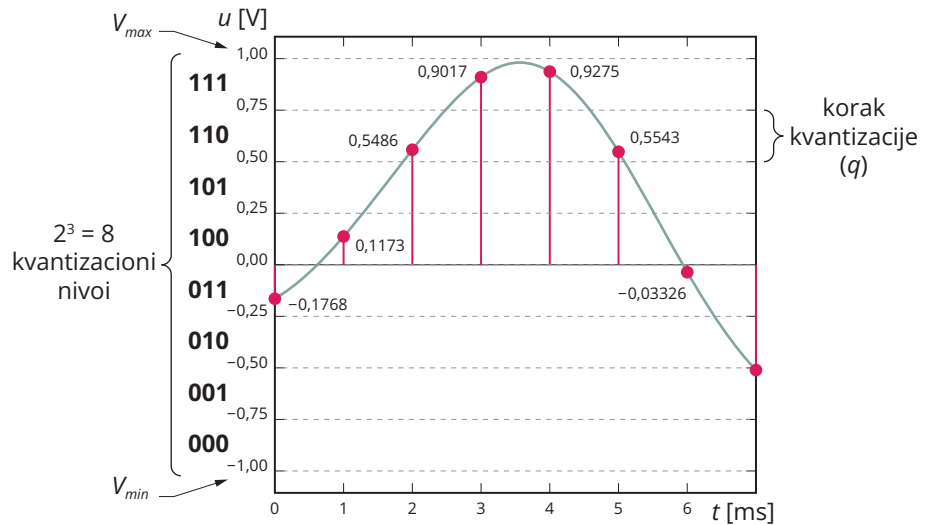
Posmatrajmo signal sa slike 3.24 koji smo, primjenom teoreme o odabiranju, predstavili skupom njegovih diskretnih vrijednosti uzetih u osam trenutaka odabiranja. Tačne vrijednosti osam odbiraka amplituda ovog signala date su, na primjer, u voltima.



Slika 3.24. Analogni signal sa vrijednostima osam odbiraka

U praksi je sasvim dovoljno da se svakoj amplitudi signala dodijeli neka brojčana vrijednosti iz prethodno definisanog skupa. Ove vrijednosti, koje se mogu predstaviti određenim brojem nivoa signala, nazivaju se **kvantizacioni nivoi** signala. Rastojanje između nivoa kvantizacije jeste **korak kvantizacije** ( $\Delta q$ ).

Na slici 3.25 prikazan je slučaj gdje je amplitudski opseg signala podijeljen u osam kvantizacionih nivoa ( $q = 8$ ). Kako se označava osam vrijednosti signala, to se svakoj amplitudi dodjeljuje odgovarajuća vrijednost od 0 do 7. Tako će, na primjer, vrijednost amplitude odbiraka 0,9017 i 0,9275 volti, imati istu vrijednost 7. Ova razlika u vrijednostima amplituda kojima se dodjeljuje ista binarna vrijednost, naziva se **greška** ili **šum kvantizacije**. Obično se označava sa  $u_N(t)$ . Greška kvantizacije unosi grešku u prenosu korisne informacija. Imajući u vidu da je u svakom telekomunikacionom sistemu prisutan šum, realni prenos informacija uvijek se obavlja uz postojanje određene greške. Da bi se uticaj greške smanjio, povećava se broj kvantizacionih nivoa.



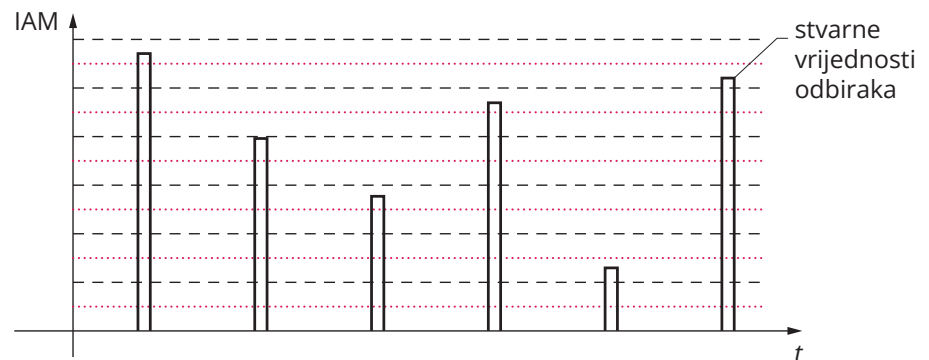
Slika 3.25. Dodjela kvantizacionih nivoa

Broj kvantizacionih nivoa potreban za kvalitetnu rekonstrukciju signala zavisi od vrste signala koji se prenosi i tipa obrade. Tako se, na primjer, radi dobijanja kvaliteta koji se smatra zadovoljavajućim, za telefonski kanal koristi  $q = 256$  kvantizacionih nivoa.

Predstavljanje kvantizacionih nivoa vrši se pomoću odgovarajućeg broja bita. Broj bita za predstavljanje nivoa kvantizacije dobija se iz relacije  $q = 2^n$ , gdje je  $q$  broj kvantizacionih nivoa, a  $n$  broj bita potreban za predstavljanje broja kvantizacionih nivoa. Na primjer, za predstavljanje 256 kvantizacionih nivoa u binarnom obliku potrebno je osam bitova, jer je  $2^8 = 256$ .

### PRIMJER 3.4 ▶

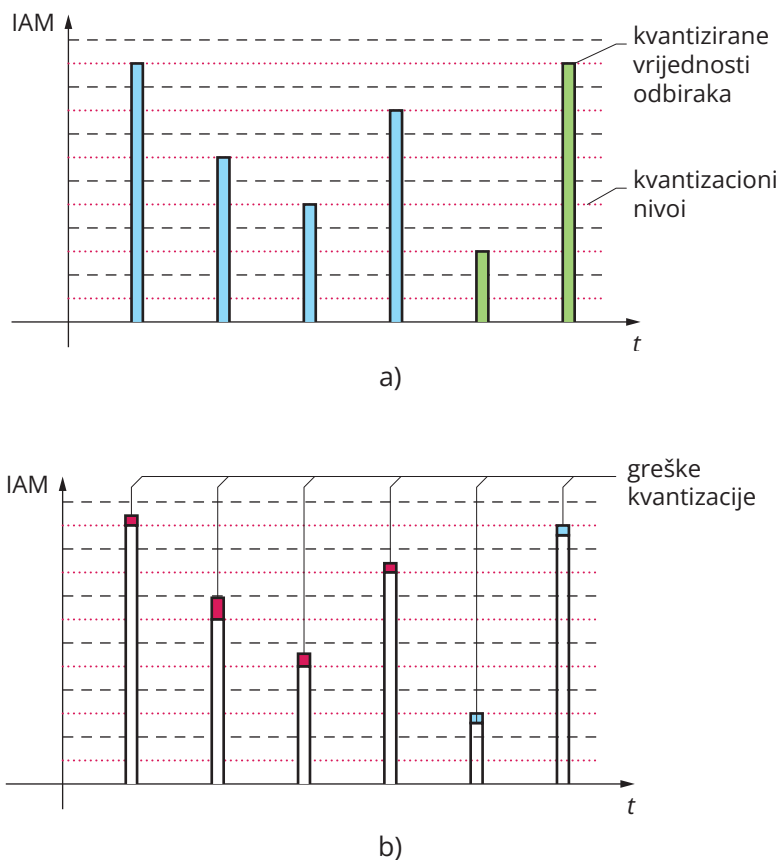
Na slici 3.26 prikazan je izgled IAM signala sa odgovarajućim nivoima kvantizacije.



Slika 3.26. Izgled IAM signala sa odgovarajućim nivoima kvantizacije

- Nacrtati kvantizirane vrijednosti odbiraka.
- Za svaki odbirak označiti grešku kvantizacije.

**Rješenje:** Sa sljedeće slike se može uočiti da IAM signal ima šest nivoa kvantizacije, za šta su potrebna tri bita (slika 3.27).



**Slika 3.27.** a) Kvantizirane vrijednosti odbiraka IAM signala, b) greška kvantizacije pri IAM signala

U dosadašnjem izlaganju podrazumijevali smo da je korak kvantizacije isti za svaki nivo kvantizacije. Taj tip kvantizacije naziva se **ravnomjerna kvantizacija**.

Međutim, neki signali imaju osobinu da vrlo rijetko dostižu neku vrijednost mogućih amplituda. Tako, na primjer, signal govora rijetko doseže vrijednosti svojih maksimalnih amplituda, pa nije praktično imati isti korak kvantizacije za amplitude signala koje se rijetko javljaju kao za amplitude njegovih uobičajenih vrijednosti. Uobičajeno je da se u ovim slučajevima uzima veći korak za kvantizaciju amplituda signala koje se rijetko pojavljuju. Greška kvantizacije, koja je veća ako je korak kvantizacije veći, neće imati veći značaj za pravilnu reprodukciju signala pošto se javlja u rijetkim slučajevima. Ako koraci kvantizacije nijesu jednaki, onda se taj tip kvantizacije naziva **neravnomjerna kvantizacija**.

Neravnomjernu kvantizaciju obradićemo kasnije, dok ćemo u daljem tekstu, radi jednostavnosti, pod pojmom kvantizacija podrazumijevati ravnomjernu kvantizaciju.

### 3.2.1.2. Kodiranje

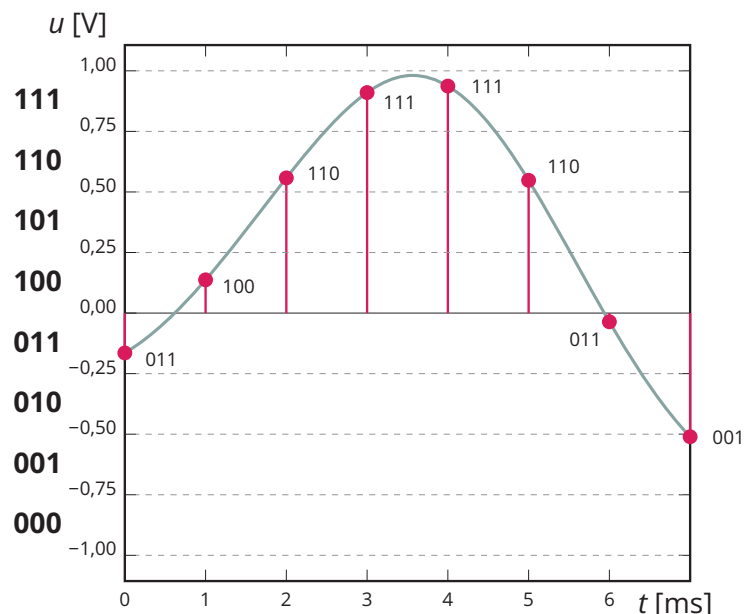
Dodjela binarnih vrijednosti odbircima, odnosno kodiranje odbiraka, predstavlja treću fazu A/D konverzije. U ovoj fazi, kvantiziranim odbircima dodjeljuju se odgovarajuće brojne vrijednosti, koje se prenose umjesto odbiraka.

Nepraktično je vršiti prenos cifara decimalnog brojnog sistema. Mnogo je povoljnije numerisanje odbiraka ciframa binarnog brojnog sistema, jer on ima svega dva različita stanja: 0 i 1. Ta dva stanja u nekom električnom sistemu mogu vrlo lako da se predstave (npr. 1 – ima „struje“, 0 – nema „struje“). Tako, na primjer, umjesto brojeva 3, 1, 6, 7 treba prenijeti brojeve 011, 001, 110, 111. Ovakvi skupovi u nekom električnom sistemu mogu da se predstave povorkom impulsa i pauza. Broju 1 odgovara znak, a broju 0 pauza. Na taj način vrši se kodiranje kvantiziranih odbiraka signala  $u(t)$ .

Dakle, kvantiziranim odbircima se u fazi kodiranja dodjeljuju binarne vrijednosti koje odgovaraju njihovim amplitudama. Na slici 3.28 prikazana je dodjela binarnih vrijednosti kvantiziranim odbircima.

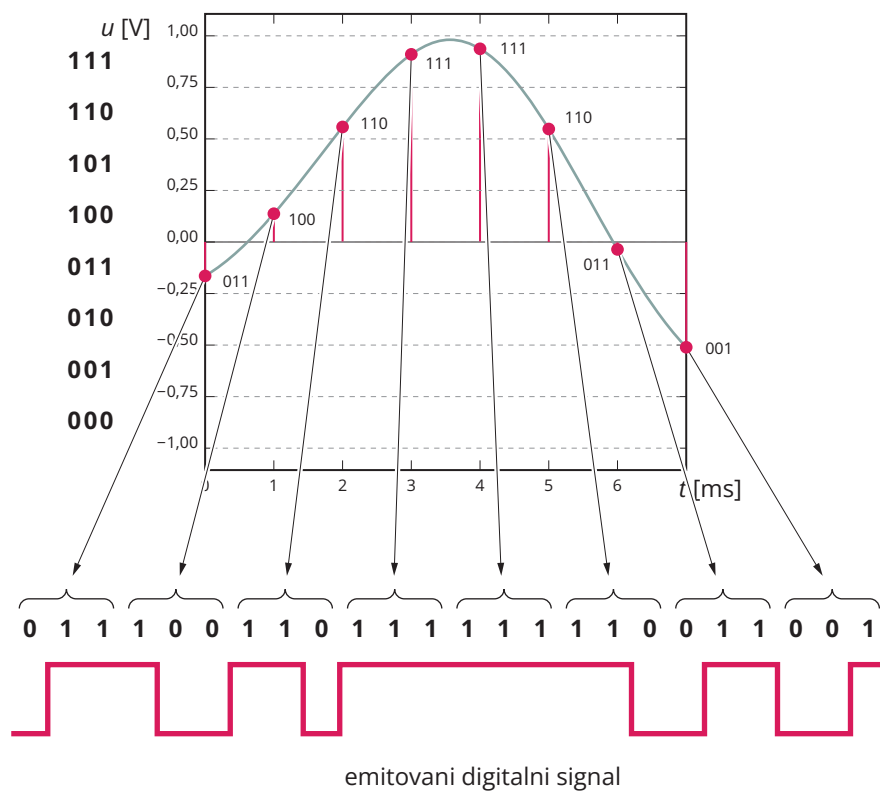
#### Veza sa drugim modulima

Obnovi znanja iz informatike o pretvaranju pozitivnih i negativnih decimalnih brojeva u binarne.



**Slika 3.28.** Dodjela binarnih vrijednosti kvantiziranim odbircima

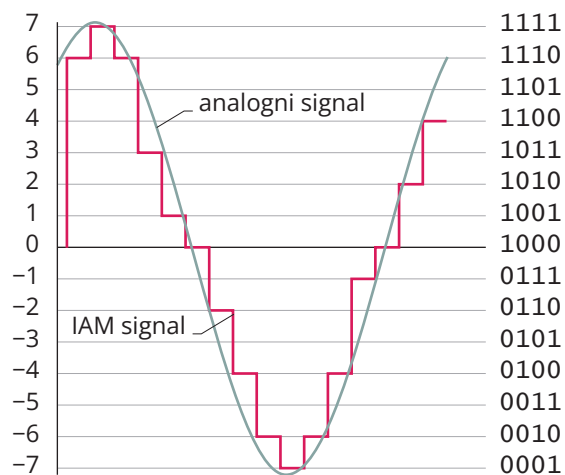
Amplitudske vrijednosti odbiraka šalju se do prijemnika kao digitalni signal. Izgled emitovanog digitalnog signala prikazan je na slici 3.29.



Slika 3.29. Dodjela binarnih vrijednosti odbircima i izgled dobijenog digitalnog signala

### 3.2.2. Generisanje IKM signala

Kao što smo rekli, princip na kojem se zasniva postupak impulsne kodne modulacije zasnovan je na postupku pretvaranja (konverzije) analognih signala u digitalne.

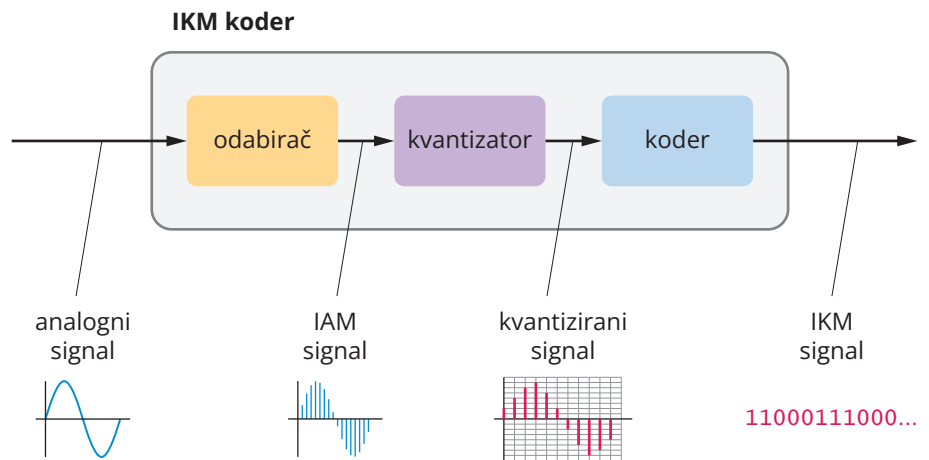


Slika 3.30. Izgled kvantiziranog signala



Na slici 3.30 prikazan je postupak impulsne kodne modulacije dobijen kroz faze analogno-digitalne konverzije, koji se često naziva i digitalizacija analognog – kontinualnog signala. Prvo je izvršeno uzorkovanje kontinualnog signala po vremenu – odabiranje signala, a zatim odabiranje signala po trenutnim vrijednostima amplituda – kvantizacija signala, i na kraju je svakom odbirku signala dodijeljena odgovarajuća binarna vrijednost – kodiranje signala.

Na slici 3.31 prikazana je blok-šema **IKM koder**, odnosno sklopa u kojem se obavlja impulsna kodna modulacija. IKM koder sačinjavaju tri elementa u kojima se vrši odabiranje, kvantizacija i kodiranje.



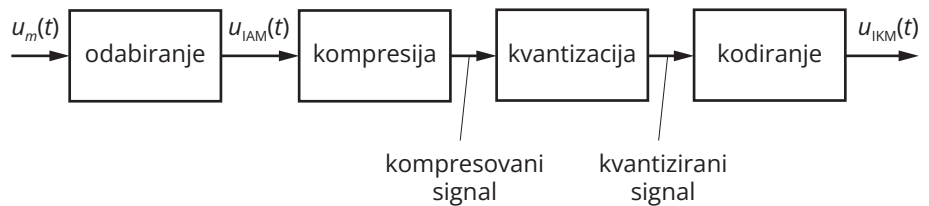
**Slika 3.31.** Blok-šema sklopa u kojem se obavlja postupak IKM

Najprije se, postupkom odabiranja, signal ograničenog spektra diskretizuje po vremenu, tj. obavlja se postupak impulsne amplitudske modulacije. Izgled IAM signala prikazan je na slici 3.31 nakon bloka odabirača. Uzeti odbirci se kvantiziraju, odnosno diskretizuju po amplitudi. Izgled kvantiziranog signala prikazan je na slici 3.31 nakon bloka kvantizatora. Poslije kvantizacije kvantizirani signali se kodiraju, uobičajeno binarnim kodom, odnosno pretvaraju u povorku digitalnih podataka. Izgled kodiranog signala prikazan je na slici 3.31 nakon bloka koda.

Povorka IKM impulsa ima dva osnovna svojstva, koji određuju vjernost povorke originalnom analognom signalu: brzina odabiranja i broj kvantizacionih nivoa.

Brzina odabiranja definisana je teoremom o odabiranju, i zavisi od granične učestanosti signala koji se prenosi. Odbirci signala uzimaju se sa učestanošću  $2f_m$ . Za signal govora ta učestanost je  $f_m = 4$  kHz, dok za muzički signal ona iznosi  $f_m = 15$  kHz. Broj kvantizacionih nivoa zavisi od prirode signala koji se prenosi. U telefoniji se odbircima dodjeljuje 256 kvantizacionih nivoa. Broj bitova potrebnih da predstavi 256 kvantizacionih nivoa jeste 8 ( $2^8 = 256$ ), pa se svaki odbirak u digitalnoj telefoniji kodira sa osam bitova.

U dosadašnjim razmatranjima korak kvantizacije bio je konstantan ili ravnomjerman. To znači da se odabrani broj nivoa, na kojima će biti kvantovani odbirci, dijeli na više jednakih intervala. Ovo se dešava u slučaju ako se u posmatranom intervalu signal pojavljuje ravnomjerno sa malim, srednjim i većim amplitudama. U slučaju govornog signala, u najvećem dijelu preovladavaju male amplitude, dok se velike amplitude rijetko pojavljuju. U tom slučaju greška kvantizacije bila bi velika. Zbog toga se kvantizacija govornog signala vrši promjenjivim korakom kvantizacije. Ovakva kvantizacija zove se neravnomjerna kvantizacija. Neravnomjerna kvantizacija može se realizovati dodavanjem novog sklopa, koji se zove **kompresor**. On se ubacuje između sklopa za odabiranje i uređaja sa ravnomjernom kvantizacijom. Kompresor smanjuje razliku između veličine odbiraka. Kompresor se pravi od elektronskih elemenata (tranzistori) koji imaju nelinearnu karakteristiku. Na taj način manji odbirci više se pojačavaju a veći odbirci manje, što znači da se ujednačavaju. Na slici 3.32 prikazana je blok-šema **IKM sklopa** u kojem se obavlja impulsna kodna modulacija sa neravnomjernom kvantizacijom.



**Slika 3.32.** Blok-šema predajnog sklopa u kojem se obavlja postupak IKM sa neravnomjernom kvantizacijom

Na izlazu kompresora dobija se povorka ujednačenih odbiraka koji se zatim kvantiziraju a potom kodiraju i šalju u prijemnik. U prijemniku je potrebno izvršiti operaciju inverznu kompresiji. Uređaj koji vrši operaciju inverznu kompresiji zove se **ekspander**. Ekspander se takođe pravi od nelinearnih elemenata, kao što su diode. Nelinearni elementi više slabe manje amplitude, nego što slabe veće amplitude odbiraka.

### Primjer iz prakse

U tehnici snimanja na CD optičke diskove, muzika se na CD-u kodira digitalnim svjetlosnim signalima korišćenjem IKM. Muzički signal ima opseg frekvencija do 15 kHz. Ali, za razliku od telefonije, u kojoj je važno prepoznavanje sagovornika i razumljivost komunikacije, pri slušanju muzike bitan je kvalitet reprodukcije. Treba prenijeti što više tonova iz raspoloživog opsega muzičkog signala, jer ljudsko uho razlikuje tonove iz opsega od 20 do 20 000 Hz. Zbog toga IKM kodiranje muzičkog signala – u poređenju sa kodiranjem telefonskog signala – zahtijeva veću brzinu odabiranja i veći broj kvantizacionih nivoa, odnosno veći broj bitova po odbirku. Obično se uzima da je frekvencija odabiranja u tehnici snimanja na CD-u optičkom disku 44,1 kHz, dok se odbirci kodiraju sa 16 bitova.

### PRIMJER 3.5 ▶

Za telefonski kanal u kome se vrši impulsna kodna modulacija – IKM, izračunati:

- a) broj odbiraka u sekundi,
- b) period uzimanja odbiraka,
- c) broj bitova koji se prenesu u jednoj sekundi (bitsku brzinu).

#### Rješenje:

a) Telefonski kanal ima opseg od 0 Hz do  $f_m = 4$  kHz. Odbirci signala uzimaju se frekvencijom  $2f_m$ , odnosno uzima se 8 000 odbiraka u sekundi.

b) Iz izraza  $T = \frac{1}{2f_m}$  slijedi da je period odabiranja odbiraka

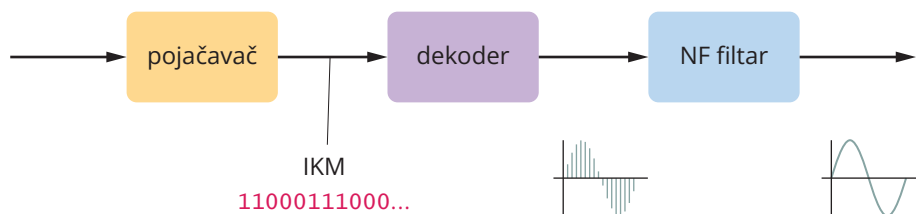
$$T = \frac{1}{2 \cdot 4 \text{ kHz}} = \frac{1}{8 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{sec}}} = 125 \text{ } \mu\text{s}.$$

c) Odbircima se dodjeljuje 256 kvantizacionih nivoa. Broj bitova potrebnih da predstavi 256 kvantizacionih nivoa jeste osam ( $2^8 = 256$ ), pa se svaki odbirak kodira sa osam bitova. Iz ovih podataka slijedi da je bitska brzina koja se ostvaruje u IKM telefonskom kanalu:

$$V_b = 8 \text{ bitova/odbirku} \cdot 8\,000 \text{ odbiraka/sec} = 64 \text{ kb/s.} \quad \blacksquare$$

### 3.2.3. Demodulacija IKM signala

Demodulacijom IKM signala dobija se originalni analogni signali, odnosno signal koji je jednak predajnom korisnom (modulišućem) signalu. Demodulacija se obavlja u prijemniku. Na slici 3.33 prikazana je blok-šema sklopa koji vrši demodulaciju IKM signala.



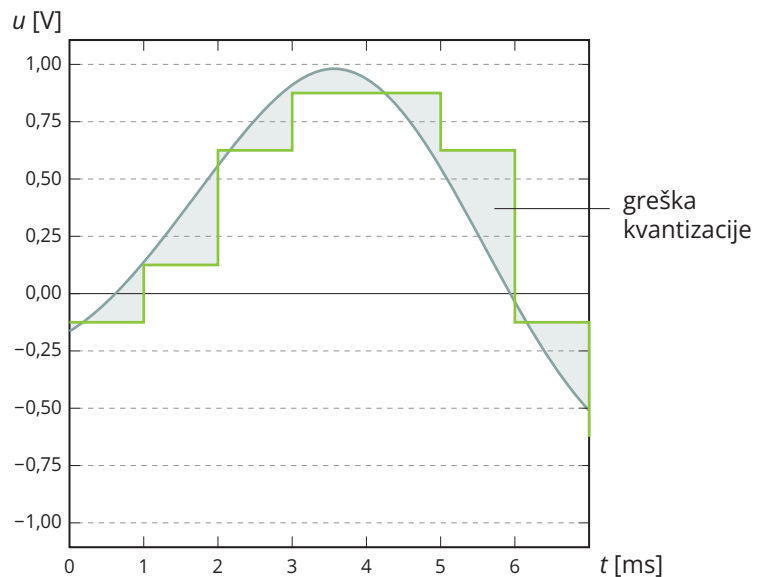
Slika 3.33. Sklop za demodulaciju IKM signala

Na ulazu sklopa postavlja se kolo za regenerisanje IKM signala, koji se izobličio na prenosnoj liniji. Kola za regenerisanje obično su pojačavačka kola koja povorku bitova sa linije pojačavaju tako da liči na povorku IKM bitova poslanih na liniju veze, na predajnom dijelu telekomunikacionog sistema.

Sljedeći element sklopa jeste dekodera. Uloga dekodera je da IKM signal pretvori u kvantizirane odbirke signala. U postupku generisanja IKM signala u predajniku se obavlja analognodigitalna (A/D) konverzija. U postupku demodulacije signala, u prijemniku se obavlja obrnuti postupak – digitalnoanalognodigitalna (D/A) konverzija. D/A konverzija je, kao što smo i ranije naveli, pretvaranje digitalnog signala u analogni signal. Dekoder mora biti sinhronizovan sa koderom, tj. kodiranje na strani predaje mora biti usaglašeno sa dekodiranjem na strani prijema kako bi kombinacija nula i jedinica, dobijena u prijemniku, bila pretvorena u odgovarajući odbirak. Na izlazu dekodera dobijaju se kvantizirani odbirci signala.

Na dekodera se priključuje NF filter, koji vrši rekonstrukciju signala na bazi kvantiziranih odbiraka. Rekonstrukcija signala obavlja se tako što NF filter blokira više harmonike na izlazu dekodera, i na taj način „zaobljuje“ IAM signal dobijen na izlazu dekodera, te ga približava izgledu originalnog analognog signala, nosioca informacije.

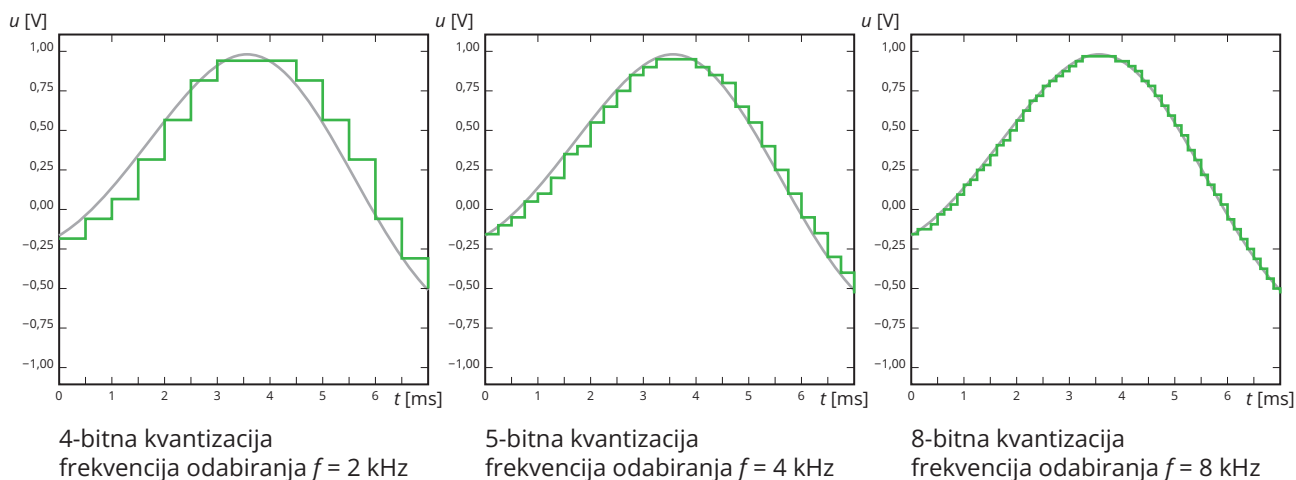
Dobijeni signal na izlazu će se razlikovati od originalne poruke za grešku kvantizacije (slika 3.34). Ova greška predstavlja razliku između ulaznog analognog signala i rekonstruisanog signala.



**Slika 3.34.** Greška kvantizacije

Greška kvantizacije može se smanjiti povećanjem broja kvantizacionih nivoa (bitova koji definišu odbirak) i povećanjem učestanosti odabiranja.

Na slici 3.35 prikazano je kako broj kvantizacionih nivoa, odnosno učestanost odabiranja, utiče na grešku kvantizacije, tj. na odstupanje dekodiranog od originalnog signala. Vidi se da je ovo odstupanje najmanje za slučaj kada je broj bitova (odnosno učestanost odabiranja) najveći.



Slika 3.35. Uticaj broja kvantizacionih nivoa, odnosno učestanosti odabiranja, na grešku kvantizacije

### 3.2.4. Blok-šema primopredajnog sistema za IKM

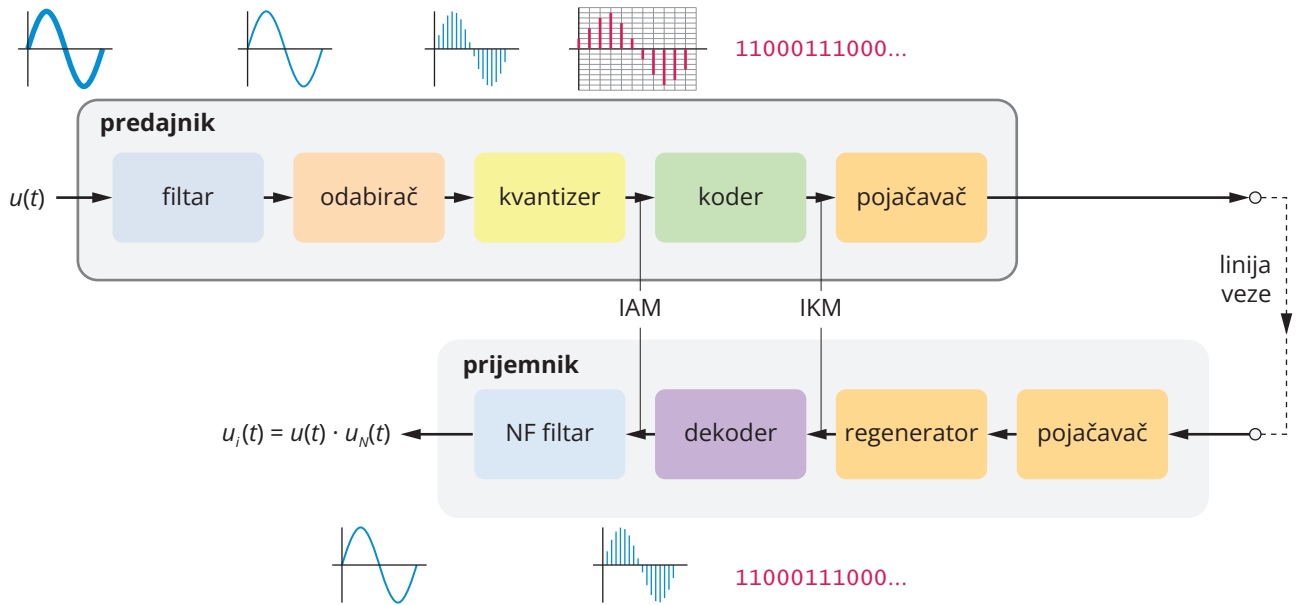
Na slici 3.36 prikazana je blok-šema primopredajnog sistema za IKM sa ravnomjernom kvantizacijom, sa prikazima talasnih oblika signala na izlazu svakog sklopa blok-šeme.

Analogni signal, koji nosi informaciju, prvo se na ulazu u predajnik filtrira kako bi mu se opseg učestanosti ograničio na vrijednost  $f_m$ . U IKM koderu, koji čine sklopovi odabirač, kvantizer i koder, onako kako je objašnjeno u prethodnim odjeljcima, uzimaju se odbirci ovog signala sa učestanošću  $2f_m$  i ravnomjerno kvantiziraju u  $q = 2^n$  kvantizacionih nivoa. Tako dobijeni odbirci pretvaraju se u binarni signal – svakom odbirku pripada jedna kodna riječ obrazovana od  $n$  binarnih simbola. Binarni signali se u pojačavaču predajnika pojačaju na odgovarajući nivo snage kako bi se nadoknadilo gubljenje snage signala na liniji veze.

Na prijemnoj strani, oslabljeni primljeni signal (digitalni podaci) najprije se u pojačavaču prijemnika pojača na nivo pogodan za dalju obradu. Zatim se dovodi do regeneratora signala. Zašto je potreban regenerator?

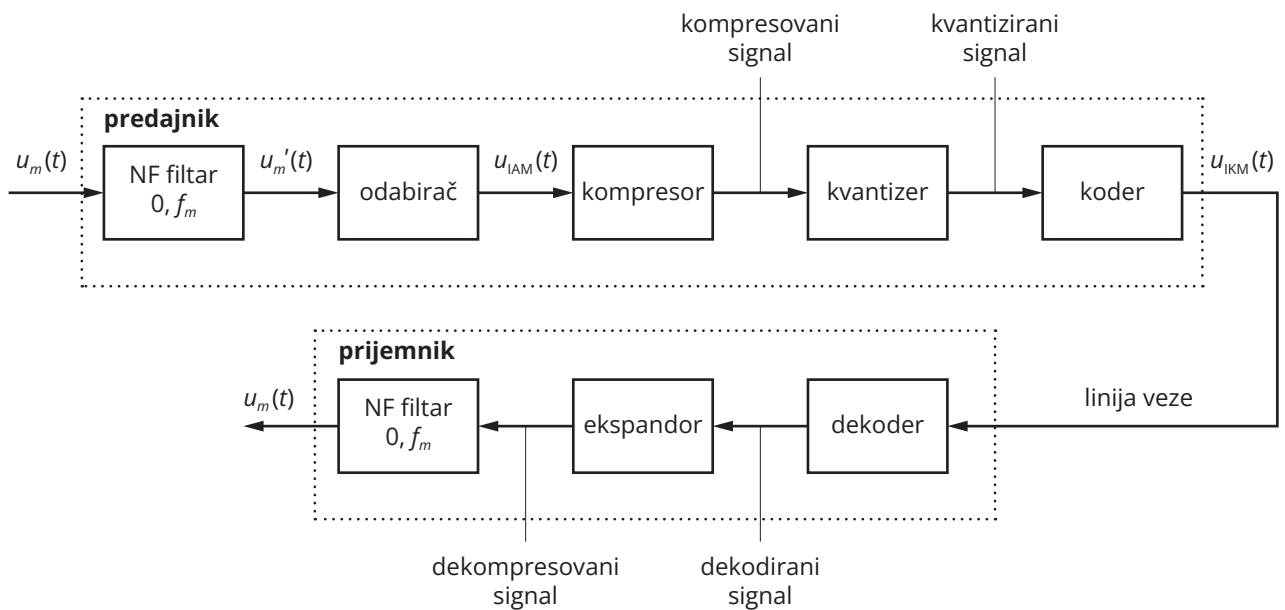
Na liniji veze neizbježan je šum. Slučajan šum se superponira binarnom signalu i izobličava ga. Tako, na primjer, bit 0 pod uticajem šuma postaje impuls sa vrijednošću koja približno odgovara bitu 1. Zbog toga primljeni bitovi, na osnovu kojih prijemnik donosi odluku, mogu se toliko razlikovati od poslanih da prijemnik može donijeti pogrešne odluke, odnosno ne može rekonstruisati poslani, originalni signal. Da bi se u dekoderu prijemnika u svakom signalizacionom intervalu mogla donijeti odluka o tome da li je primljena binarna brojka 0 ili 1, potreban je regenerator signala koji binarni signal regeneriše tako da odgovara poslatom IKM binarnom signalu.

Regenerisani signal vodi se na dekoder, gdje se vrši njegovo dekodiranje. Dekodirani signal se filtrira u NF filtru prijemnika, na čijem se izlazu dobija analogni signal, koji nosi informaciju.



Slika 3.36. Blok-šema primopredajnog sistema za IKM u slučaju ravnomjerne kvantizacije

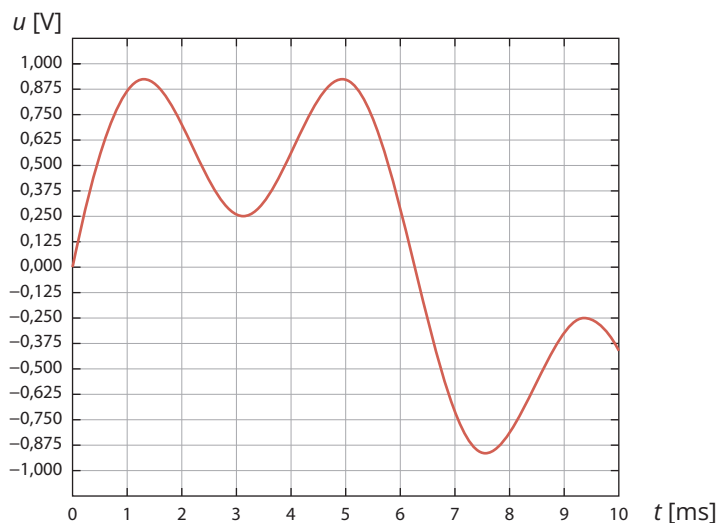
Na slici 3.37 prikazana je blok-šema primopredajnog sistema za IKM u slučaju kad je kvantizacija neravnomjerna.



Slika 3.37. Blok-šema primopredajnog sklopa u kojem se obavlja postupak IKM sa neravnomjernom kvantizacijom

PRIMJER 3.6 ▶

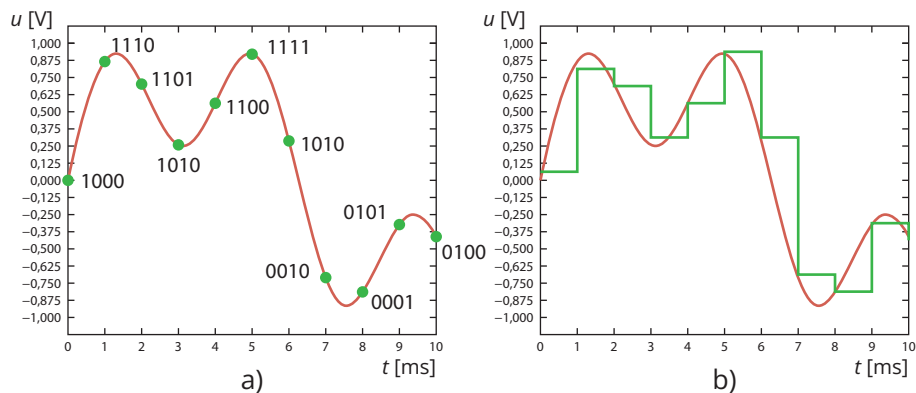
Na slici 3.38 prikazan je analogni signal koji se odabira brzinom odabiranja od 1 kHz i kvantizuje 4-bitnim kvantizatorom.



Slika 3.38. Slika uz primjer 3.6

- a) Odrediti kvantizacione intervale i odgovarajuće binarne vrijednosti.
- b) Odrediti binarnu vrijednost dodijeljenu svakom odbirku.
- c) Skicirati rekonstruisani signal nakon D/A konverzije.

**Rješenje:** Kako je brzina odabiranja 1 kHz, odnosno 1 000 odbiraka u sekundi, onda se odbirci uzimaju svake milisekunde. Kvantizacioni intervale sa odgovarajućim binarnim, četvorobitnim vrijednostima, dodijeljenim svakom odbirku, prikazani su na slici 3.39a. Rekonstruisani signal nakon D/A konverzije prikazan je na slici 3.39b.



Slika 3.39. Slika uz rješenje primjera 3.6

## Primjer iz prakse

Digitalan je zvuk koji je pretvoren u digitalni oblik. U digitalnom zvuku, zvučni talas audio-signala kodira se postupcima impulsne modulacije kao niz bitova. Bitovi predstavljaju vrijednosti odbiraka audio-signala. Rekli smo da se pri snimanju zvuka na optički disk (CD) uzorci uzimaju 44 100 puta u sekundi, i da se za određivanje vrijednosti odbiraka koristi 16 bitova.

Analogni audio-signali osjetljivi su na šumove i izobličenja koja se javljaju u elektronskim sklopovima. Poremećaji u digitalnim sistemima za snimanje, obradu i prenos zvuka ne rezultiraju greškama, izuzev u rijetkim slučajevima, kada je šum toliko snažan da ima za posljedicu pogrešno tumačenje bitova, koji odgovaraju muzičkom signalu. Time je omogućeno da digitalni zvuk ima visok kvalitet. Digitalne audio-tehnologije koriste se u snimanju, obradi, masovnoj produkciji i distribuciji zvuka, uključujući snimke pjesama, instrumentala, podkastova (digitalnih datoteka koje sadrže audio ili audio-video zapis koji se distribuira internetom, i koji je namijenjen za slušanje ili gledanje na računaru ili televiziji), zvučnih efekata i slično.

Savremena distribucija muzike sve manje se zasniva na prodaji muzičkih komada snimljenih na CD-u, a sve više na slanju internetom. Distribucija muzike na internetu zavisi od digitalnog snimanja, obrade i kompresije podataka. Kompresijom se smanjuje broj bitova koji se prenose, odnosno skladište, pri čemu se ne pogoršava kvalitet zvuka. Jedna od tehnike kompresije zvuka jeste MP3. Dostupnost muzike kao datoteke podataka znatno je smanjila troškove distribucije. Digitalnim audio i mrežnim sistemima distribucije, kao što je na primjer iTunes, muzičke kompanije prodaju digitalne zvučne datoteke, koje potrošač dobija putem interneta.

### 3.2.5. Veličine koji utiču na kvalitet prenosa

Važne veličine koji utiču na kvalitet prenosa IKM signala jesu šum kvantizacije i slučajan šum.

Za procjenu greške kvantizacije koristi se **snaga šuma kvantizacije**. Snaga šuma kvantizacije, koja ne može da se izbjegne, zavisi od koraka kvantizacije  $\Delta u$ . Ako su koraci kvantizacije jednaki, i iznose  $\Delta u$ , pokazuje se da je srednja snaga šuma kvantizacije  $P_N$ :

$$P_N = \frac{1}{12}(\Delta u)^2. \quad (3.1)$$

Mjera kvaliteta kvantizacije jeste odnos srednje snage korisnog signala i srednje snage šuma kvantizacije. Ako sa  $q$  označimo broj koraka kvantizacije, odnosno nivoa kvantizacije, pokazuje se da je srednja snaga korisnog signala  $P_s$  jednaka



$$P_S = \frac{1}{12} q^2 (\Delta u)^2 \quad (3.2)$$

pa će odnos srednje snage korisnog signala i srednje snage šuma kvantizacije biti:

$$\frac{P_S}{P_N} = q^2. \quad (3.3)$$

Ovo se naziva odnosom signal/šum kvantizacije. Vidimo da taj odnos ne zavisi od koraka kvantizacije, već samo od broja kvantizacionih nivoa. Ako se ovaj broj povećava, onda će se poboljšati i odnos signal/šum kvantizacije.

Odnos signal/šum kvantizacije često se izražava kao logaritam:

$$a_{S/N} = 10 \log \frac{P_S}{P_N} = 20 \log q \text{ [dB]}. \quad (3.4)$$

### PRIMJER 3.7 ▶

Izračunati odnos signal/šum kvantizacije kod IKM sistema kod koga se signal kodira sa osam bitova.

**Rješenje:** Broj kvantizacionih nivoa je  $q = 2^8 = 256$ , pa je

$$a_{S/N} = 20 \log q = 20 \log 256 = 48,16 \text{ dB}. \quad \blacksquare$$

Pored šuma kvantizacije, na kvalitet prenosa IKM signala utiče i slučajni šum. Razmotrimo šta se dešava u prisustvu slučajnog šuma na ulazu u prijemnik IKM signala.

Slučajni šum sabira se sa binarnim signalom; odbirci njihove sume, na osnovu kojih prijemnik donosi odluku, mogu da se razlikuju od odbiraka korisnog binarnog signala, tako da prijemnik donosi pogrešne odluke. Umjesto binarnog signala „1“ može da odluči da je primio binarni signal „0“, i obrnuto. Zbog pogrešnog tumačenja primljenog bita, biće pogrešno primljena i čitava kodna riječ u kojoj se taj bit nalazi. Usljed toga razlikovaće se poslati i primljeni signal. Pošto je ovo odstupanje slučajnog karaktera, ono se manifestuje kao slučajni šum.

Da bismo matematički opisali uticaj slučajnog šuma na kvalitet prenosa IKM signala, uvedimo novi pojam: vjerovatnoću da je neki bit pogrešno protumačen. Tu vjerovatnoću označićemo sa  $e$ , i ona se naziva **vjerovatnoća greške po bitu**. U realnim uslovima ova vjerovatnoća je mala. Na primjer, ako se od  $10^5$  (sto hiljada) bitova pogrešno protumači jedan bit, tada je  $e = 10^{-5}$ .

Neka je kodna riječ sastavljena od  $n$  bita. Kako je vjerovatnoća greške po bitu mala, još je mnogo manja vjerovatnoća da u nekoj kodnoj riječi budu pogrešna dva ili više bitova. Smatraćemo da je u kodnoj riječi koja je pogrešna, pogrešan samo jedan bit.

Za ovakav slučaj, kvalitet prenosa IKM sistemom ocjenjuje se kao odnos signala i šuma na ulazu u prijemnik. Pokazuje se da je ovaj odnos jednak:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{IKM} = \frac{2^{2n}}{1 + 4e2^{2n}}. \quad (3.5)$$

Iz ovog izraza možemo zaključiti sljedeće: kako je vjerovatnoća greške  $e$  mala, odnosno približno jednaka nuli, izraz u imeniocu gornjeg izraza približno je jednak jedinici. Zbog toga na odnos signal/šum utiče broj bitova koji čine kodnu riječ. Kako je broj bitova povezan sa brojem kvantizacionih nivoa ( $q = 2^n$ ), zaključujemo da na odnos signal/šum IKM signala utiče samo proces kvantizacije. Podešavanjem ovog procesa, podešava se i kvalitet prenosa IKM sistemom.

Zbog ove mogućnosti, IKM sistemi u telekomunikacijama imaju široku primjenu.



### Veza sa drugim modulima

Primjena IKM u postupcima vremenskog multipleksiranja detaljno je opisana u udžbeniku Elektronske komunikacije I.

### KONTROLNO PITANJE K3.2 ▶

Zaokruži slovo ispred tačnih tvrđenja:

- a) IKM je otporan na pojavu šumova.
- b) IKM zahtijeva veliki propusni opseg.
- c) IKM ne zahtijeva sinhronizaciju predajnika i prijemnika.
- d) IKM je kompatibilan sa analognim sistemima.

**Odgovor:** a), b).

# Rezime

- Impulsne modulacije su vrsta modulacija kod kojih nosilac nije kontinualan signal, već je diskretan, u obliku povorka periodičnih pravougaonih impulsa. Povorka pravougaonih impulsa ima tri karakteristične veličine: amplitudu  $U_0$ , dužinu trajanja impulsa  $\tau$  i periodu ponavljanja  $T$ . Svaka od ovih veličina može da se mijenja pod dejstvom informacije koja se prenosi. Ako se pod dejstvom informacije mijenja amplituda, a ostale dvije veličine ostaju nepromijenjene, onda se radi o impulsnoj amplitudskoj modulaciji (IAM). Ako se mijenja trajanje impulsa, tako da ono bude srazmjerno vrijednosti signala informacije, riječ je o impulsnoj modulaciji po trajanju (ITM). U slučaju da se u ritmu promjena vrijednosti signala informacije impuls pomjera u odnosu na položaj kada nema modulacije, dobija se impulsna položajna modulacija (IPM).
  - Postupak pretvaranja analognih signala u digitalni oblik naziva se analogo-digitalna konverzija (skraćeno A/D konverzija). Pri A/D konverziji mijenja se talasni oblik signala: kontinualni signal pretvara se u povorku pravougaonih impulsa, odnosno u digitalni signal. Proces pretvaranja analognih signala u digitalni oblik odvija se u tri glavne faze: odabiranje, kvantizacija i kodiranje.
  - Odabiranje je proces uzimanja određenog broja vrijednosti iz nekog kontinualnog signala na unaprijed određeni način. Ove vrijednosti nazivaju se odbirci ili uzorci. Trenutke u kojima treba uzimati odbirke definiše teorema o odabiranju: Ako kontinualni signal  $u(t)$  ima spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti od 0 do  $f_m$ , onda je taj signal u potpunosti definisan svojim trenutnim vrijednostima, uzetim u trenucima koji se nalaze na međusobnom rastojanju
- U postupku kvantizacije, beskonačan skup vrijednosti amplituda analognog signala čini se konačnim. To se vrši dodjelom odgovarajućih vrijednosti amplitudama iz prethodno definisanog skupa. Te vrijednosti, koje se mogu predstaviti određenim brojem nivoa signala, nazivaju se kvantizacioni nivoi signala. Rastojanje između nivoa kvantizacije jeste korak kvantizacije. Razlika u vrijednostima amplituda kojima se dodjeljuje ista binarna vrijednost naziva se greška kvantizacije. Kvantizacija kontinualnog signala jeste diskretizacija signala po trenutnim vrijednostima amplituda.
  - Dodjela binarnih vrijednosti odbircima, odnosno kodiranje odbiraka, predstavlja treću fazu A/D konverzije. U toj fazi, odabranim tačkama dodjeljuju se odgovarajuće brojne vrijednosti koje se prenose umjesto odbiraka.
  - Impulsna kodna modulacija (IKM) spada u grupu impulsnih digitalnih modulacija, i ona predstavlja standard u prenosu digitalnog audio-signala u telefoniji, računarima, u snimanju na optičkim diskovima.
  - Povorka IKM impulsa ima dva osnovna svojstva, koja određuju vjernost povorka originalnom analognom signalu: brzina odabiranja i broj kvantizacionih nivoa. Brzina odabiranja definisana je teoremom o odabiranju, i zavisi od granične učestanosti signala koji se prenosi. Odbirci signala uzimaju se učestanošću  $2f_m$ . Broj kvantizacionih nivoa zavisi od prirode signala koji se prenosi. U telefoniji se odbircima dodjeljuje 256 kvantizacionih nivoa. Broj bitova potrebnih da predstave 256 kvantizacionih nivoa jeste  $8 (2^8 = 256)$ , pa se svaki odbirak u digitalnoj telefoniji kodira sa osam bitova.
  - Veličine koji utiču na kvalitet prenosa IKM signala jesu šum kvantizacije i slučajan šum. Za procjenu greške kvantizacije koristi se snaga šuma kvantizacije koja predstavlja srednju kvadratnu

$$T \leq \frac{1}{2f_m}$$

Veličina  $T$  naziva se period odabiranja. Odabiranje kontinualnog signala jeste diskretizacija signala po vremenu.

vrijednost greške kvantizacije. Slučajni šum sabira se sa binarnim signalom; odbirci njihove sume, na osnovu kojih prijemnik donosi odluku, mogu da se razlikuju od odbiraka korisnog binarnog signala, tako da prijemnik donosi pogrešne

odluke. Pošto je ovo odstupanje slučajnog karaktera, ono se manifestuje kao slučajan šum.

- IKM ima primjenu u postupcima vremenskog multipleksiranja.

## Manje poznate riječi

kompresija – sabijanje; ekspanzija – širenje.

## Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *Andrew Tanenbaum: Računarske mreže, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Mikro knjige, Beograd, 2005*. Složeni principi na kojima su zasnovane

telekomunikacione tehnologije objašnjavaju se na izuzetno razumljiv i zanimljiv način. Zbog toga ova obimna knjiga predstavlja dobar izbor za uvod u izučavanje današnjih i budućih telekomunikacionih mreža.

## Zadatak za samostalan rad

Postoje mnogi sajtovi sa video-prikazima faza u postupku digitalizacije analognog signala. Potraži na Jutjubu odgovarajuće video-zapise, kao i animacije

u kojima se prikazuje kako se za različite oblike analognog signala dobijaju njihovi digitalizovani ekvivalenti.

## Pitanja za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Navedi vrste i objasni glavne karakteristike impulsnih modulacija.
2. Skiciraj postupak dobijanja IPM signala. Prokomentariši njegove prednosti u odnosu na ITM signal.
3. Navedi i objasni faze u postupku A/D konverzije.
4. Nacrtaj primopredajnu blok-šemu sistema za IKM signal i ukratko opiši ulogu svakog sklopa u obje blok-šeme, ako je koristan signal slučajan, ograničen sa frekvencijom  $f_m$  i ako je kvantizacija korisnog signala: a) ravnomjerna, b) neravnomjerna.
5. Na primjeru telefonskog signala opiši postupak generisanja i demodulacije IKM signala.
6. Odredi vezu između koraka kvantizacije i broja bitova koji određuju nivo kvantizacije.
7. Uporedi postupke prijema IKM i analogno moduliranih signala. Kod kojih postupaka talasni oblik primljenog signala može biti značajnije deformisan u odnosu na poslani signal, a da ne dođe do greške u njegovom prijemu? Objasni odgovor.
8. Ako se udvostruči korak kvantizacije kod IKM postupka, objasni šta će se dogoditi sa srednjom snagom šuma kvantizacije. Prokomentariši dobijeni rezultat i izvedi odgovarajući zaključak.

## Zadaci

1. Muzički signal se postupkom IKM pretvara u digitalni signal. Za ovaj signal izračunaj: a) broj odbiraka u sekundi, b) period uzimanja odbiraka, c) bitsku brzinu.
2. Pokaži da se odnos signal/šum kvantizacije, koji se računa kao logaritam:

$$a_{S/N} = 10 \log \frac{P_S}{P_N} = 20 \log q \text{ [dB]},$$

može dobiti iz obrasca  $a_{S/N} = 6n$  dB, gdje je  $q$  broj kvantizacionih nivoa, a  $n$  broj bitova za kodiranje odbiraka. Primjenom ovog obrasca odredi odnos signal/šum kvantizacije kod snimanja muzičkog signala na optički disk ako se odbirci kodiraju sa 16 bitova.

3. Prikaži grafički postupak impulsne kodne modulacije ako je korisni signal sinusna funkcija  $u_m(t)$ .
4. Signal granične učestanosti 10 MHz modulisan je impulsno-kodno.
  - a) Izračunaj brzinu odabiranja.
  - b) Ako su odbirci kodirani u 128 nivoa, izračunaj broj bitova potrebnih za kodiranje svakog odbirka.
  - c) Koristeći rezultate pod a) i b), odredi bitsku brzinu (bit/s) IKM signala.
5. TV signal, granične učestanosti 4 MHz, u IKM postupku kodira se sa osam bitova.
  - a) Odredi protok impulsno kodno modulisanog TV signala.
  - b) Ako operator kablovske televizije podržava istovremen prenos 300 TV kanala, izračunaj protok kablovskog sistema.
6. Signal koji se koristi u medicinskim ispitivanjima ima graničnu učestanost 1 000 Hz. Dvadeset tih signala kodira se IKM postupkom u 16 nivoa, a zatim multipleksira sistemom sa 20 kanala.
  - a) Izračunaj trajanje svakog bita koji podržava multipleks od 20 tih signala.
  - b) Izračunaj binarni protok multipleksa.



# 4. Prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš karakteristike prenosa digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti
- objasniš obradu signala postupkom kodiranja
- opišeš karakteristike različitih vrsta kodova (linijski i zaštitni, duobinarni, diferencijalni i alternativno bipolarni) kod prenosa digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti
- izračunaš brzinu prenosa podataka koristeći Nikvistove kriterijume
- opišeš postupak umanjenja intersimbolske interferencije primjenom transverzalnog filtra
- objasniš ulogu optimalnog filtra za umanjenje uticaja šuma na prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti.



Do sada smo izučavali sisteme kod kojih se signali ne prenose u svom osnovnom opsegu učestanosti, već se modulišu. Međutim, nema uvijek potrebe za modulacijom signala. Lokalne računarske mreže, koje su danas u najširoj upotrebi, primjer su mreža u kojima se digitalni signali prenose u svom osnovnom opsegu.

U tehnologiji povezivanja računara na kratkim rastojanjima, u lokalnim računarskim mrežama – LAN mreže (engl. *local area network*), ethernet je glavni protokol. Može se reći da je ethernet za lokalno umrežavanje računara ono što je internet za globalno umrežavanje. Hardverski uređaj koji je baziran na ethernet-protokolu i koji omogućava povezivanje računara jeste mrežna kartica. Mrežna

kartica računara šalje podatke direktno u kabl, ona ne premješta signal u drugi frekvencijski opseg. Dakle, u ethernet-tehnologiji digitalni signali se prenose u svom osnovnom opsegu.

U ovom poglavlju upoznaćeš se sa osnovnim principima prenosa signala u osnovnom opsegu učestanosti, kodovima koji se koriste u tom prenosu, problemima u prenosu i načinima kako se ti problemi prevazilaze.

U Praktikum laboratorijskih vježbi data je vježba povezana sa sadržajem ovog poglavlja kojom se pomoću laboratorijskih uređaja vrši snimanje dijagrama oka.

## ZANIMLJIVOST

Ethernet je protokol lokalnih računarskih mreža, opisan velikim brojem standarda. Za pronalazača eterneta smatra se američki inženjer Robert Metkalf (1946). On je razvio novi sistem za povezivanje računara koaksijalnim kablom. Taj sistem sadržao je dva nova mehanizma. Prvi se odnosi na osluškivanje kabla prije emitovanja. Računari su „osluškivali“ saobraćaj na kablju pa bi se, u slučaju da saobraćaj postoji, uzdržali od slanja svojih poruka dok kabl ne bude slobodan. Drugi mehanizam detektovao je sudare poruka u slučaju da je do njih došlo na kablju. Metkalf je razvio i novi algoritam slučajnog biranja vremena čekanja između dva emitovanja poruke, što je u kombinaciji sa ovim mehanizmima omogućilo eternetu da funkcioniše sa visokim procentom iskorišćenosti kanala.

Primjenjujući ovaj sistem, krajem 1972. godine Metkalf realizuje prvu lokalnu računarsku mrežu, koja je međusobno povezivala računare proizvođača Kseroks (Xerox), kao i računare sa laserskim štampačima. Koaksijalni kabl bio je dugačak do 2,5 km; na njega se, uz korišćenje pojačavačkih uređaja, moglo povezati do 256 računara. Ova mreža radila je sa brzinom prenosa 2,94 Mb/s.



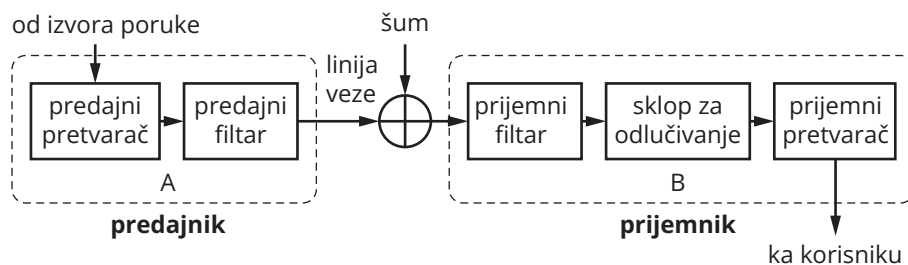
## 4.1. Prenos signala u osnovnom opsegu učestanosti

Digitalni signali koji se dobijaju na izlazu pretvarača poruke u signal nazivaju se **osnovnim signalima**. Osnovni signali nalaze se u svom **osnovnom opsegu učestanosti**. Takvi signali se fizičkim vodovima ili radio-putem mogu prenositi na udaljena odredišta, pa se takav prenos naziva **prenosom u osnovnom opsegu učestanosti**.

U ovakvom prenosu na signalima se ne vrši nikakva dodatna obrada, tj. ne vrši se postupak modulacije, u kojem bi se njihov spektar iz svog osnovnog opsega pomjerio u neki drugi položaj, pogodniji za prenos. Zbog toga su sistemi za prenos signala u osnovnom opsegu učestanosti i najjednostavniji.

Blok-šema sistema za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti prikazana je na slici 4.1.





**Slika 4.1.** Blok-šema sistema za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti

Poruka se u pretvaraču predajnika pretvara u digitalni signal. Filter propusnik niskog opsega učestanosti ograničava spektar signala koji se šalje na liniju veze.

Na prijemnoj strani, filter propusnik niskog opsega učestanosti sprečava da u prijemnik uđu signali viših učestanosti, koji potiču od drugih izvora ili od šuma na liniji veze.

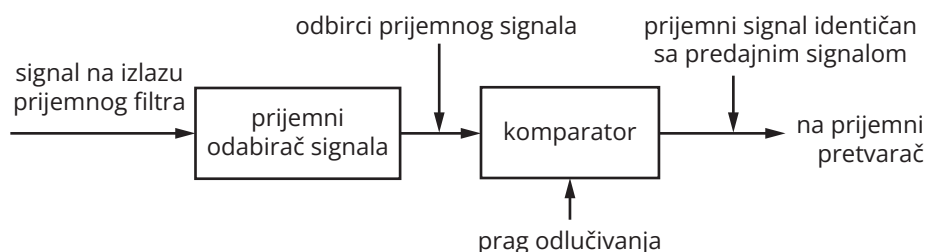
U realnom prenosu, signal na prijemnoj strani neće biti isti sa signalom na predajnoj strani komunikacionog sistema. Zbog prisustva šuma u telekomunikacionom sistemu i na liniji veze, kao i slabljenja duž linije veze, prijemni signal biće pomiješan sa šumom i oslabljen. Osim toga, zbog neidealnosti karakteristika predajnog i prijemnog filtra i ostalih sklopova, korisni signal na prijemu može da se izobličiti.

### Primjer iz prakse

U računarskim mrežama, pri prenosu podataka između mrežnih kartica kojim se računari povezuju, neke tehnologije koriste Mančester kodiranje.

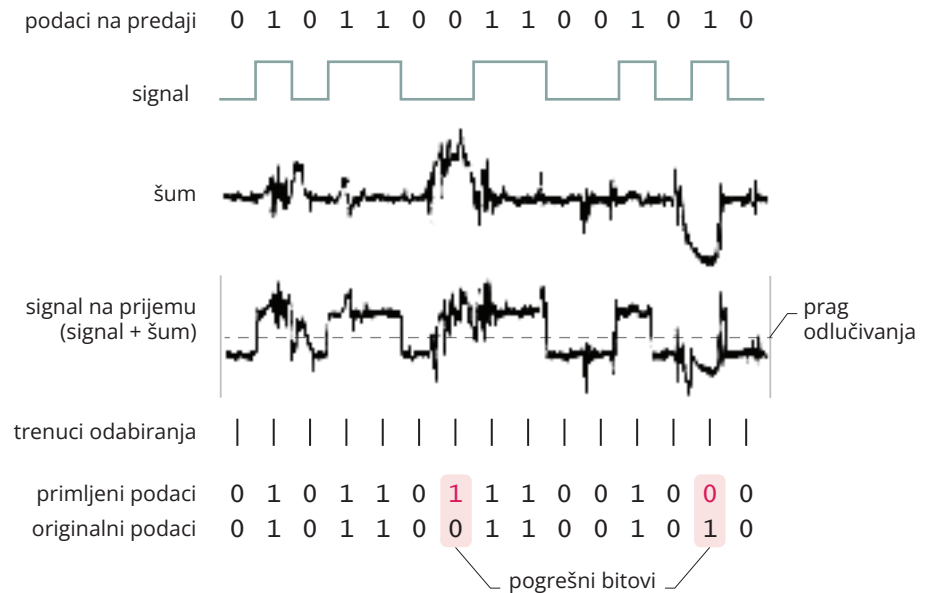
Zbog toga se signal na izlazu filtra na prijemnoj strani dovodi na sklop za odlučivanje. Sklopom za odlučivanje se, u tačno određenim intervalima, koji se poklapaju sa signalizacionim intervalima, uzimaju primljeni signali, koji se zatim upoređuju sa nekom unaprijed utvrđenom – referentnom vrijednošću napona, koja se naziva **prag odlučivanja**. Sklop za odlučivanje jednostavno odlučuje da li je primljeni signal veći od referentne vrijednosti napona. Ako je izmjerena amplituda primljenog signala veća od referentne vrijednosti napona, onda se smatra da je primljena vrijednost „1“, u protivnom primljena je „0“.

Sklop za odlučivanje sastoji se od dva dijela: prijemnog sklopa za odabiranje – kojim se vrši uzimanje odbiraka prijemnog signala u precizno određenim vremenskim intervalima, i komparatora (upoređivača) – koji vrši upoređivanje odbiraka sa referentnim naponom. Blok-šema sklopa za odlučivanje data je na slici 4.2.



**Slika 4.2.** Blok-šema sklopa za odlučivanje

Na slici 4.3 prikazan je uticaj šuma na prenos digitalnih signala. Pri prenosu binarnih signala obično se definiše **prag šuma**. Prag šuma predstavlja najveću vrijednost srednje snage šuma koja neće dovesti do greške u sklopu za odlučivanje u prijemu. Naime, ako je šum slabijeg intenziteta, odnosno ako je nivo šuma ispod dozvoljenog nivoa šuma, šum neće izobličiti signal toliko da dođe do greške na prijemu. Ako pak nivo šuma pređe vrijednost dozvoljenog praga, onda kola za odlučivanje u prijemu neće biti u stanju da razlikuju vrijednost bita od vrijednosti šuma, što će za posljedicu imati pojavu greške u prijemu bita.



**Slika 4.3.** Uticaj šuma na prenos digitalnih signala

Na osnovu odluke donesene u sklopu za odlučivanje, generiše se digitalni signal, koji bi trebalo da bude identičan poslatom signalu. Ovaj postupak naziva se **regeneracija signala**. Regeneracija signala razlikuje se od pojačanja signala, što je prednost digitalnog prenosa u odnosu na analogni prenos. Digitalni sistemi mogu uspješno da funkcionišu pri znatno većem nivou šuma, što nije slučaj kod analognih sistema za prenos.

Na kraju, prijemni pretvarač ovaj signal pretvara u poruku namijenjenu korisniku. U slučaju da su linije veze duge, signal može znatno oslabiti, pa se mora pojačati u **pojačavačkim stanicama** koje se postavljaju duž linije veze.

## 4.2. Postupci kodiranja

**Kodiranje** je postupak dodjele kodnih riječi (kôdova) simbolima poruke. Kodiranjem se jedna poruka (koja koristi niz simbola iz jednog pisma) pretvara u drugačiji oblik poruke – niz simbola iz nekog drugog pisma. Smisao kodiranja je pretvaranje informacije u oblik sa pogodnijim svojstvima u odnosu na svojstva originalne poruke, kao što su oblici poruke povoljniji za prenos, za zaštitu ili za memorisanje. Na primjer, kompresija je vrsta kodiranja kod koje je kodirana poruka kraća od izvorne poruke, pa se može lakše prenositi i memorisati; kriptografija je kodiranje namijenjeno obezbjeđenju povjerljivosti poruke; zaštitno kodiranje olakšava otkrivanje ili ispravljanje grešaka nastalih u prenosu, i slično. Kodiranje se obavlja u predajniku telekomunikacionog sistema, dok se obrnuti proces – **dekodiranje** vrši u prijemniku. U praktičnim primjenama u području informaciono-komunikacionih tehnologija, simboli od kojih se formiraju kodne riječi jesu binarni simboli; dakle, svaka kodna riječ je niz binarnih cifara (jedinica i nula), odnosno bitova, pa je i kodirana poruka niz binarnih cifara.

### NAPOMENA

U telekomunikacijama se, u većini slučajeva, koriste **uniformni** kodovi. To su kodovi kod kojih su kodne riječi iste dužine.

Diskretne poruke predstavljaju se digitalnim signalima. Digitalni signali su električne veličine predstavljene nekim parametrom koji opisuje električno stanje na izlazu sklopa koji poruku pretvara u signal. Parametri su obično brojne vrijednosti električne struje ili napona. Ove vrijednosti predstavljaju **značajna stanja signala**. Trenuci u kojima počinju značajna stanja nazivaju se **značajni trenuci**, a vrijeme između dva susjedna značajna trenutka naziva se **signalizacioni interval**.

Najjednostavniji je način da se značajna stanja signala numerišu ciframa binarnog brojnog sistema. Za ovakav sistem potrebne su samo dvije različite vrijednosti intenziteta konstantnog napona odnosno struje. Ovakav oblik digitalnog signala naziva se **binarni signal**, i on predstavlja elementarni oblik digitalnog signala. Svaki binarni signal opisan je sa dva parametra: amplitudom napona ili struje i trajanjem.

Ako se za numerisanje članova skupa primijeni neki drugi sistem, koji ima  $M$  različitih brojeva, onda parametar signala, struja ili napon, može imati  $M$  različitih vrijednosti. Ovaj signal predstavlja se u više nivoa, i naziva se **M-arni digitalni signal**.

## 4.3. Vrste kodova

Pri prenosu digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti poželjno je da se signal oblikuje tako da bude što pogodniji za prenos. Oblik se usklađuje sa karakteristikama medijuma kojim se prenosi, kao i sa uređajima koji u tom prenosu učestvuju. Ovo usklađivanje predstavlja kodiranje signala. Da bi primalac dobio podatke koji su mu poslani, mora se primijeniti postupak suprotan kodiranju, tj. signal se mora dekodirati.

Kodiranje koje se obavlja da bi se prenos mogao obaviti na pogodan način, naziva se **linijsko kodiranje**. Pored linijskog, u telekomunikacijama se često koristi **zaštitno kodiranje** – kodiranje radi povećanja pouzdanosti prenosa. Zadatak **zaštitnih kodova** jeste da na minimum svedu vjerovatnoću greške nastalu pri prenosu podataka, odnosno da isprave uočenu grešku. Zaštitnim kodiranjem obezbjeđuje se detekcija i korekcija grešaka u toku prenosa digitalnih signala.

### NAPOMENA

Šezdesetih godina prošlog vijeka linijski kodovi razvijani su za potrebe digitalnog prenosa telefonskim kanalima i za snimanje digitalnih signala na magnetne medijume. U današnje vrijeme istraživanja su koncentrisana na razvoj linijskih kodova za prenos signala optičkim vlaknima.

### 4.3.1. Linijski kodovi

Linijski kôd služi da se signal koji se prenosi (niz binarnih ili M-arnih simbola, koje ćemo kasnije objasniti) prilagodi liniji veze (radio-link, ožičena veza, optički prenos). Prije svega potrebno je pravilno prenijeti poruku sastavljenu od niza (sekvence) bitova, odnosno smanjiti vjerovatnoću greške u prenosu. Ovo se u praksi često realizuje povećanjem otpornosti poruke na šumove. Dalje, način kodiranja treba da pravilno uskladi predaju i prijem sekvenci bitova, tj. da olakša sinhronizaciju u prenosu. Gubljenje koraka pri sinhronizaciji dovodi do njenog nepravilnog tumačenja. I na kraju, odabirom linijskog koda može se povećati brzina prenosa signala.

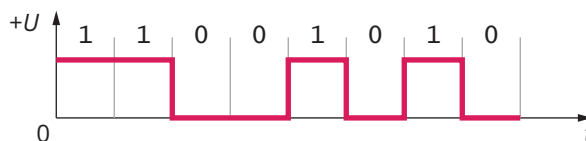
Linijskim kodovima zadržava se binarna priroda originalnog signala. Binarni digitalni signali koriste dvije diskretne vrijednosti naponskih nivoa. Oni se predstavljaju u binarnom obliku kao 1 ili 0.

Linijski kodovi mogu se podijeliti u tri osnovne grupe: unipolarni, polarni i bipolarni. Kako bismo ilustrovali razlike između navedenih grupa kodova, posmatraćemo način kodiranja različitim vrstama linijskih kodova iste poruke (niza bitova) dužine jednog bajta (11001010).

#### 4.3.1.1. Unipolarni linijski kodovi

Unipolarni linijski kôd je najjednostavniji zato što koristi samo jedan polarietet. Odgovaraju mu dva naponska nivoa,  $+U$  i 0. Kada postoji, signal na ulazu ima vrijednost  $+U$ , dok 0 označava da na ulazu nije prisutan signal (slika 4.4). Srednja vrijednost ovog impulsa jednaka je polovini naponskog nivoa  $+U$ , što predstavlja jednosmjernu komponentu signala. Nedostatak ovakvog načina kodiranja jeste nemogućnost utvrđivanja granice između bitova ako se u kraćem vremenskom periodu javi niz impulsa istog naponskog nivoa.

Na slici 4.4 prikazan je unipolarni kôd koji kodira poruku 11001010.



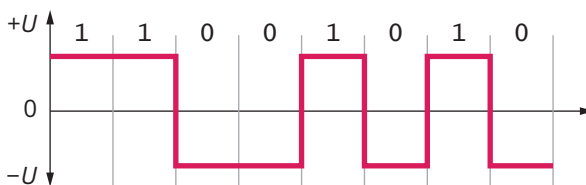
**Slika 4.4.** Talasni oblik unipolarnog binarnog signala koji kodira poruku 11001010

#### 4.3.1.2. Polarni linijski kodovi

Za razliku od unipolarnih linijskih kodova koji koriste samo jedan polaritet, polarni linijski kodovi koriste dva polariteta, pozitivan i negativan ( $+U$  i  $-U$ ). Srednja vrijednost ovog impulsa jednaka je nuli, što znači da signal nema jednosmjernu komponentu.

Polarni linijski kodovi imaju nekoliko šema, od kojih se najčešće koriste polarni kôd bez povratka na nulu, NRZ (engl. *nonreturn to zero*), polarni kod sa povratkom na nulu, RZ (engl. *return to zero*), Mančester kod i diferencijalni Mančester kod.

**Polarni binarni signal bez povratka na nulu (NRZ)** može imati vrijednosti  $+U$  ili  $-U$ , gdje  $+U$  odgovara logičkoj jedinici, a  $-U$  logičkoj nuli. Znatno je otporniji na uticaj šuma u odnosu na unipolarni binarni signal, jer se logička nula prenosi nekom vrijednošću napona. Na slici 4.5 prikazan je talasni oblik polarnog binarnog NRZ signala koji kodira poruku 11001010.

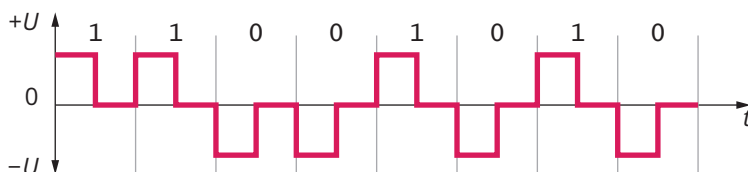


**Slika 4.5.** Talasni oblik polarnog binarnog NRZ signala koji kodira poruku 11001010

Kako se za prenos signala uvijek koristi neki naponski nivo, polarni linijski kodovi otporniji su na šumove u odnosu na unipolarne linijske kodove. Nedostatak im je, kao i kod unipolarnih linijskih kodova, taj što je teško utvrditi granice između bitova ako se u kraćem vremenskom periodu javi niz impulsa istog naponskog nivoa. Zbog toga je otežana sinhronizacija između predaje i prijema niza bitova.

Kako bi se osigurala sinhronizacija između predaje i prijema niza bitova, unutar svakog bita treba da postoji promjena nivoa signala. Takvo rješenje predstavlja **polarni binarni signal sa povratkom na nulu - RZ**.

U RZ šemi, bit „1“ predstavljen je promjenom visokog nivoa u 0, dok je bit „0“ predstavljen promjenom iz niskog nivoa u 0. Drugim riječima, za vrijednosti logičke nule impuls ima vrijednost  $-U$ , a za vrijednost logičke jedinice vrijednost  $+U$ , pri čemu trajanje jednog impulsa iznosi pola takta. Talasni oblik signala prikazan je na slici 4.6.



**Slika 4.6.** Talasni oblik polarnog binarnog RZ signala koji kodira poruku 11001010

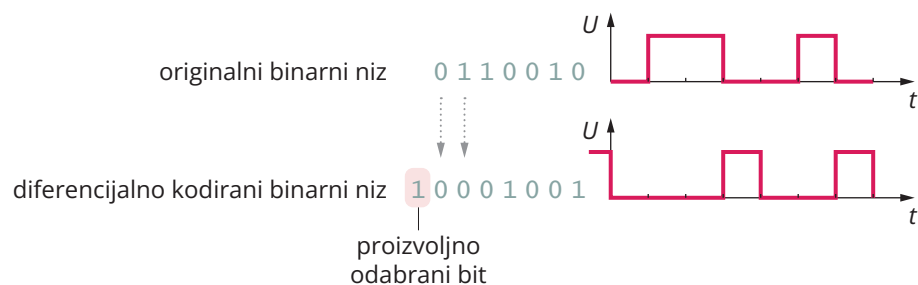
Nedostatak ove šeme kodiranja je taj što je brzina prenosa informacije dvostruko veća od brzine prenosa simbola, te je potrebna veća širina prenosnog opsega.

#### 4.3.1.3. Diferencijalno kodiranje

Pri prenosu binarnih signala može se javiti jedan specifičan problem. Ako predajnik pošalje niz bitova 00010000, prijemnik to može protumačiti kao niz 10000000 ili kao niz 01000000, jer ne može da razlikuje neaktivnost predajnika, koji je predstavljen signalom čiji je napon 0 V, od bita „0“, koji je takođe predstavljen signalom napona 0 V. Potreban je mehanizam koji će osigurati da primaoci mogu tačno da utvrde početak i kraj svakog bita. **Diferencijalno kodiranje** je jedan takav postupak.

Diferencijalno kodiran binarni signal je vrsta binarnog signala na koji je primijenjeno diferencijalno kodiranje. Ono se vrši na sljedeći način: prvi bit u kodiranom signalu uzima se proizvoljno („0“ ili „1“). Zatim, svakom „0“ u originalnom signalu (prije kodiranja) u diferencijalno kodiranom signalu odgovara promijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval, a svakom „1“ u originalnom signalu odgovara nepromijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval u diferencijalno kodiranom signalu.

Slika 4.7 ilustruje princip diferencijalnog kodiranja.

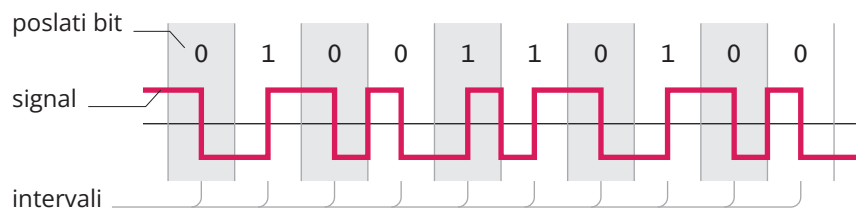


**Slika 4.7.** Primjer diferencijalnog kodiranja

#### 4.3.1.4. Mančester kôd

Kod Mančester kodiranja period svakog bita (bitski interval) dijeli se na dva jednaka intervala. Bit 1 šalje se tako što se tokom prvog intervala napon drži na niskom nivou, a tokom drugog na visokom. To znači da se svako „1“ u originalnom signalu predstavlja prelaskom iz negativne u pozitivnu vrijednost (pozitivna tranzicija) naponskog nivoa na sredini intervala. Bit „0“ šalje se obrnuto: prvo visok napon, zatim nizak, što znači da se predstavlja negativnom tranzicijom naponskog nivoa na sredini intervala.

Na slici 4.8 prikazan je talasni oblik Mančester signala koji kodira poruku 0100110100.



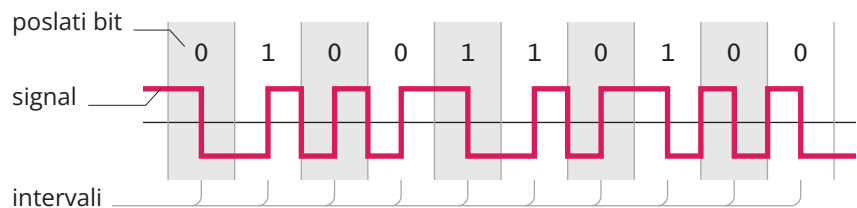
**Slika 4.8.** Talasni oblik Mančester signala koji kodira poruku 0100110100

Nedostatak Mančester kodova jeste potreba za većom širinom opsega učestanosti prenosnog kanala.

#### 4.3.1.5. Diferencijalni Mančester kod

Kod diferencijalnog Mančester kôda signal se uvijek mijenja na polovini svakog bitskog intervala. Bit „1“ izaziva zadržavanje signala na istom nivou na kome je bio na kraju prethodnog intervala, a bit „0“ kodira se promjenom vrijednosti nivoa signala. „0“ može da se kodira i prelaskom sa višeg na niži naponski nivo, i obrnuto, što zavisi od prethodne vrijednosti signala. Zbog tih osobina ovaj kôd obezbjeđuje pouzdanije detektovanje promjena signala u odnosu na Mančester, posebno kada je u prenosnom mediju povećan šum.

Na slici 4.9 prikazan je talasni oblik diferencijalnog Mančester signala koji kodira poruku 0100110100.



**Slika 4.9.** Talasni oblik diferencijalnog Mančester signala koji kodira poruku 0100110100

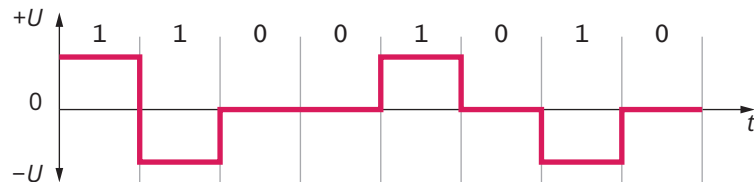
### 4.3.1.6. Bipolarni linijski kodovi

U telekomunikacijama, bipolarno kodiranje je vrsta kodiranja kod koga se za prenos logičke jedinice koriste dva nivoa napona suprotnog polariteta tako da se prenose tri vrijednosti:  $+U$ ,  $-U$  i nula. Takav signal naziva se i **duobinarni signal**.

U praksi se često koristi alternativno bipolarni kôd pod nazivom AMI kôd (engl. *alternate mark inversion*). U AMI kôdu, naponski nivo 0 predstavlja bit „0“, dok bit „1“ naizmjenično (alternativno) dobija naponske vrijednosti  $+U$  ili  $-U$ . Slika 4.10 prikazuje primjer AMI kôda.

#### NAPOMENA

Iako su slični, AMI kôd se razlikuje od RZ kôda po tome što u RZ šemi naponski nivo 0 ne predstavlja ništa, već služi samo kao pomoć za sinhronizaciju signala. Ne predstavlja ni „0“, ni „1“. U AMI kodu naponski nivo 0 predstavlja bit „0“.

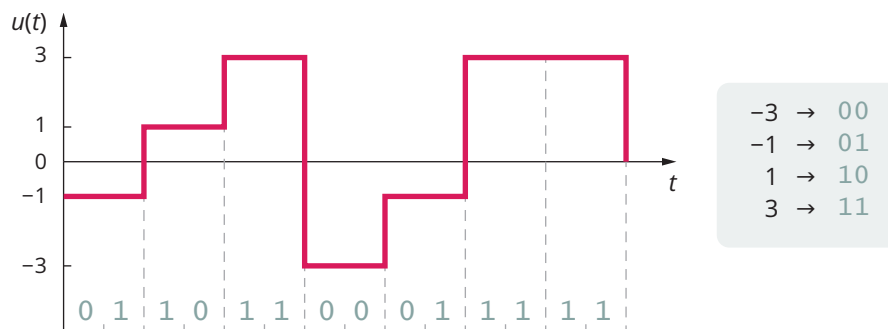


Slika 4.10. Talasni oblik AMI signala koji kodira poruku 11001010

Nedostatak AMI kôda izražen je u slučaju kada se prenose dugački nizovi bita „0“, jer se može izgubiti sinhronizacija između predaje i prijema poruke (niza bitova).

### 4.3.1.7. M-arni digitalni signal

Za razliku od binarnih signala koji u svakom značajnom intervalu mogu da imaju jednu od dvije moguće vrijednosti značajnog parametra, značajan parametar  $M$ -arnog signala može da ima jednu od  $M$  mogućih vrijednosti koje odgovaraju određenim naponskim stanjima. Na primjer, ako bi se usvojio sistem u kome je  $M = 4$ , digitalni signal imao bi četiri različite vrijednosti značajnog parametra. Takav signal prikazan je na slici 4.11. Njega karakterišu četiri različite vrijednosti napona obilježene sa  $-3$ ,  $-1$ ,  $1$  i  $3$ . Ove vrijednosti imaju svoje binarne ekvivalente. Pošto je riječ o četiri različita stanja koja treba prikazati u binarnom brojnem sistemu, svako stanje predstavlja se kombinacijom od dva binarna elementa, po šemi:



Slika 4.11. M-arni signal sa četiri značajne vrijednosti



## 4.3.2. Zaštitni kodovi

Digitalni podaci prenose se u nizovima bitova koji se nazivaju okviri (engl. *frames*). Okvir podataka, sastavljen od binarnih cifara koji predstavljaju informaciju, u telekomunikacionim sistemima označava osnovnu jedinicu digitalne informacije, koja se kao cjelina prenosi od predajnika do prijemnika.

Okviri primljeni sa greškom moraju se prepoznati kao pogrešni. U te svrhe koriste se zaštitni kodovi, pomoću kojih se utvrđuje ispravnost okvira. U slučaju da se utvrdi neispravnost, pokreće se odgovarajuća procedura za oporavak od greške.

Zaštitni kodovi mogu se podijeliti u dvije grupe: kodovi za otkrivanje i kodovi za ispravljanje grešaka.

U telekomunikacijama postoje dvije osnovne strategije za kontrolu grešaka. Prva je zasnovana na slanju dodatnih, odnosno **redundantnih informacija**, koje se šalju uz podatke. Redundantne informacije omogućuju prijemniku da odluči o vrijednosti svakog primljenog bita i da izvrši njegovu ispravku. Dakle, redundantne informacije služe da se utvrdi postojanje greške i da se odredi pozicija pogrešnog bita. Neispravno preneseni podaci automatski se ispravljaju u samom prijemniku. Ova strategija koristi **kodove za ispravljanje grešaka** (engl. *forward error correction* – FEC). Primjer zaštitnog koda koji ovo omogućuje jeste Hamingov kod.

Druga strategija zasnovana je na slanju redundantnih podataka koji omogućuju prijemniku da prepozna greške u primljenom bloku podataka, ali ne i da ih i otklanja. Okviri sa pogrešnim bitovima moraju se ponovo slati. Ova strategija, koja koristi **kodove za otkrivanje grešaka** (engl. *error detecting codes*), omogućuje detekciju greške koja podrazumijeva i ponovno slanje neispravno primljenog okvira. Primjer zaštitnog koda koji omogućuje otkrivanje grešaka jesu kodovi ciklične redundantne provjere (engl. *cyclic redundancy check* – CRC).

U obje strategije, redundantni bitovi predstavljaju bitove za kontrolu ispravnosti. Oni se obično šalju zajedno sa bitovima podataka.

Kodovi za korekciju grešaka, za razliku od kodova za njihovo otkrivanje, zahtijevaju prenos mnogo veće količine redundantnih podataka. Međutim, pri korišćenju kodova za detekciju grešaka može se – usljed ponovnog slanja neispravnih okvira – javiti problem sa zagušenjem kanala kojim se okviri prenose. Zbog toga izbor strategije za kontrolu greške nije jednostavna odluka, i ona zavisi od više činilaca. Jedan od njih jeste pouzdanost komunikacije.

Za određivanje pouzdanosti komunikacije, važan parametar jeste vjerovatnoća pojavljivanja neispravnog bita u definisanom vremenskom intervalu

(engl. *bit error rate*, BER). BER se odnosi na broj pogrešnih bitova u jedinici vremena. To je odnos broja pogrešno prenesenih bitova i ukupnog broja prenesenih bitova.

Uzmimo primjer da se prenosi sekvenca od deset bitova: 0 1 0 1 0 0 1 1 0, pri čemu je na mjestu prijema primljen niz: 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1. Vidimo da su pogrešno primljena četiri bita (pogrešno primljeni bitovi su podvučeni), pa je

$$BER = \frac{4}{10} = 0,4.$$

Pri bežičnom prenosu podataka vjerovatnoća pojavljivanja neispravnog bita je reda veličine  $10^{-3}$  (svaki hiljaditi bit pogrešno se prenese), pri prenosu bakarnim provodnicima ova vjerovatnoća je oko hiljadu puta manja ( $10^{-6}$ ), dok je pri prenosu optičkim vlaknima vjerovatnoća pojavljivanja neispravnog bita daleko najmanja, i iznosi oko  $10^{-9}$  (očekuje se da će svaki milijarditi bit biti pogrešno prenesen). Zaključujemo da je pri prenosu podataka optičkim vlaknima jednostavnije koristiti kôd za otkrivanje grešaka, pošto je ponovni prenos okvira rijetka pojava. U bežičnim vezama bolje je svakom okviru dodati redundantne podatke, dovoljne za rekonstruisanje poslatih, nego se oslanjati na ponovno slanje okvira, koji isto tako može sadržati grešku. Dakle, kod bežičnog prenosa bolje je rješenje korišćenje kodova za ispravljanje grešaka.

Drugi parametar jeste vrsta podataka koji se prenosi. Neki podaci koji se prenose u realnom vremenu osjetljivi su na kašnjenje, dok su manje osjetljivi na greške u prenosu. Podaci osjetljivi na kašnjenje jesu podaci govora i videa. Kod prenosa podataka osjetljivih na kašnjenje, razumnije je ispraviti grešku u samom prijemniku, nego ponavljati prenos neispravnih podataka. Na drugoj strani, računarski podaci osjetljiviji su na greške u prenosu nego na kašnjenje. Za prenos ovih podataka pogodnije je koristiti strategije detekcije greške.

I na kraju da napomenemo da se u najvećem broju slučajeva strategije sa otkrivanjem greške najčešće koriste pri prenosu podataka, dok se metoda sa korekcijom greške najčešće koristi pri smještanju podataka na memorijske medijume u računarskim sistemima.

## DODATAK +

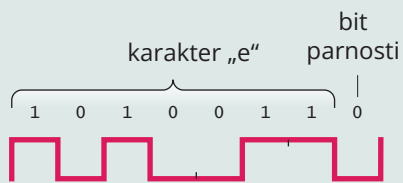
Najrasprostranjenija kodna tabela jeste Američki standardni kôd za razmjenu informacija – **ASCII**. (engl. *American Standard Code for Information Interchange*). Svaki karakter u ovom kodu predstavljen je 7-bitnim zapisom, što ostavlja mogućnost kreiranja do  $2^7 = 128$  različitih karaktera.

Pozicija bita				7	6	5						
4	3	2	1									
0	0	0	0		NUL	DLE	SP	0	@	P	`	p
0	0	0	1		SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0		STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0	0	1	1		ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0	1	0	0		EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0	1	0	1		ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0		ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0	1	1	1		BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1	0	0	0		BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1	0	0	1		HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0		LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1	0	1	1		VT	ESC	+	;	K	[	k	}
1	1	0	0		FF	FS	,	<	L	\	l	
1	1	0	1		CR	GS	-	=	M	]	m	}
1	1	1	0		SO	RS	.	>	N	^	n	~
1	1	1	1		SI	US	/	?	O	_	o	DEL

Slika 4.12. Tablica ASCII koda

Alfabet se sastoji od 96 štampanih znakova, uključujući tu velika i mala slova, cifre od 0 do 9, te ostale karaktere koji se ne štampaju, ali koji su povezani sa kontrolnim funkcijama (unošenje novog reda u tekstu, razmaka između riječi i sl.). Kompletan spisak ASCII karaktera prikazan je na slici 4.12.

Pri prenosu ASCII karaktera, njima se – radi kontrole ispravnosti prenosa – dodaje osmi bit, koji je poznat kao bit parnosti (slika 4.13).



Slika 4.13. ASCII karakter „e“

Skup karaktera ASCII koda nije potpuno standardizovan, pa se on može razlikovati kod personalnih računara koji koriste različite operativne sisteme. Tako se, na primjer, korišćenjem računara koji koriste operativni sistem Mekintoš i onih koji koriste Windows, ponekad mogu primijetiti greške u prikazu dokumenata koji u sebi sadrže karaktere nekih stranih jezika ili specijalnih znakova.

Mada ASCII sadrži simbole i nekih stranih jezika, broj takvih simbola već sada nije dovoljan. Neki jezici, kao što su kineski ili arapski, sadrže mnogo veći broj simbola. Kodni sistem **Unicode** rješava taj problem tako što proširuje broj raspoloživih bita na 16. Pošto se sa 16 bita može predstaviti  $2^{16} = 65.536$  karaktera, taj broj je dovoljan za prikaz pisama svih svjetskih jezika.

## 4.4. Nikvistova i Šenonova teorema

Postavlja se pitanje: da li postoji fizičko ograničenje koje ograničava brzinu prenosa podataka kroz kanal? Na ovo pitanje odgovorili su Nikvist i Šenon, po kojima su ime dobile i teoreme koje definišu zakone ovih fizičkih ograničenja.

U slučaju prenosa signala čiji je spektar ograničen sa maksimalnom graničnom učestanošću  $f_m$ , Nikvist je dokazao da se i binarni signal može potpuno rekonstruisati ako se uzimaju njegovi odbirci frekvencijom  $2f_m$ . Ovo tvrđenje predstavlja teoremu odabiranja, koju smo upoznali u prethodnom poglavlju.

Suština ove teoreme jeste da signal sam po sebi ima ograničen opseg, a ne da se signal prenosi kroz prenosni sistem ograničenog propusnog opsega. Ako signal muzike, koji ima spektralne komponente do 15 kHz, prenosimo kroz sistem sa propusnim opsegom od 100 kHz, za njegovu vjernu reprodukciju potrebna je učestanost odabiranja 30 kHz, a ne 200 kHz.

U slučaju da postoji  $M$  diskretnih nivoa signala, maksimalna brzina prenosa na kanalu na kojem se zanemaruje prisustvo šuma iznosi:

$$v_{max} \text{ [b/s]} = 2f_m \log_2 M. \quad (4.1)$$

Ovaj izraz predstavlja Nikvistovu teoremu.

### PRIMJER 4.1 ▶

Izračunati maksimalnu brzinu prenosa binarnog signala ( $M = 2$ ) kroz telefonski kanal opsega 4 kHz.

**Rješenje:** Kroz ovakav kanal, signal se može prenositi brzinom od maksimalno:

$$\begin{aligned} v_{max} \text{ [b/s]} &= 2f_m \log_2 M \\ &= 2 \cdot 4 \text{ kHz} \cdot \log_2 2 \\ &= 8 \text{ kb/s.} \end{aligned}$$

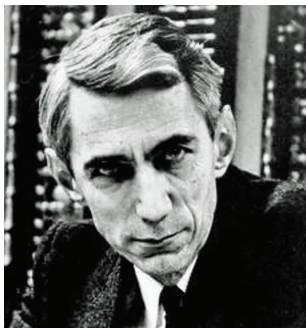
### PRIMJER 4.2 ▶

Izračunati broj odbiraka u sekundi kod digitalnog snimanja zvuka sa dva nivoa signala na CD medijum, ako se zvuk koji čuje ljudsko uho nalazi u granicama 20 Hz – 20 kHz.

### Rješenje:

$$\begin{aligned}v_{max} [\text{b/s}] &= 2f_m \log_2 M \\ &= 2 \cdot 20 \text{ kHz} \cdot \log_2 2 \\ &= 40 \text{ kb/s}\end{aligned}$$

Primjenom Nikvistove teoreme zaključujemo da je dovoljno da se uzima 40 000 odbiraka u sekundi. Audio CD standard ovu vrijednost postavlja na 44,1 kHz. ■



**Klod Šenon** (1916–2001), američki naučnik i inženjer. Najznačajniji doprinos ovog naučnika je postavljanje temelja teorije informacija.

U realnim telekomunikacionim kanalima prisutan je šum. Zbog toga se mora uzimati u obzir i njegov uticaj. Uticaj šuma procjenjuje se računanjem odnosa signal/šum. Ako se srednja snaga signala označi sa  $S$ , a srednja snaga šuma sa  $N$ , taj odnos može se izraziti kao  $S/N$ . U telekomunikacijama se računa njihov logaritamski odnos, koji se izražava u decibelima:

$$S/N [\text{dB}] = 10 \log S/N [\text{dB}] \quad (4.2)$$

Jednačina koja daje maksimalnu brzinu prenosa kroz kanal, propusnog opsega  $B$  (Hz), uz odnos signala i šuma  $S/N$ , jeste:

$$v_{max} [\text{b/s}] = B \log_2(1 + S/N) \quad (4.3)$$

Ova jednačina naziva se Šenonova teorema.

### PRIMJER 4.3 ►

Odrediti maksimalnu brzinu prenosa za analogni telefonski kanal propusnog opsega 3 000 Hz i odnosa signal/šum  $S/N = 35$  dB.

**Rješenje:** Kako je

$$S/N [\text{dB}] = 10 \log_{10}(S/N),$$

to je

$$3,5 = \log(S/N),$$

ili  $S = 10^{3,5}N$ , odnosno  $S/N = 3162$ .

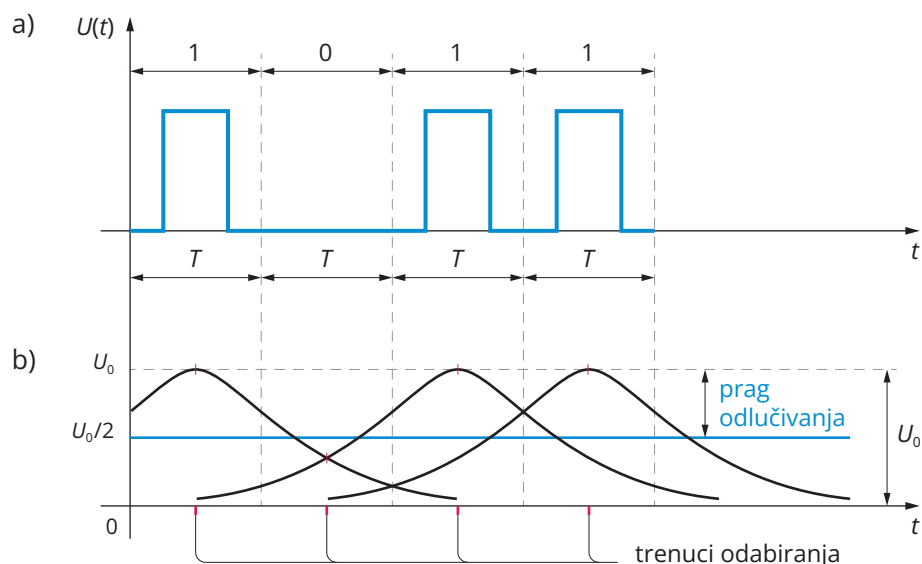
Prema Šenonovoj teoremi, bitska brzina jednaka je

$$\begin{aligned}v_{max} [\text{b/s}] &= 3000 \cdot \log_2(1 + S/N) \\ &= 3000 \cdot \log_2(1 + 3162) \\ &= 34,88 \text{ kb/s}.\end{aligned}$$
 ■

## 4.5. Intersimbolska interferencija

U sistemima za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu, digitalni signal generisan u pretvaraču poruke u signal, kao što smo vidjeli u prethodnim odjeljcima, ima oblik pravougaonih impulsa odgovarajućih intenziteta, polariteta i trajanja. Međutim, signali generisani u predajniku ne stižu u takvom obliku do prijemnika, jer se usljed smetnji, šumova i drugih uticaja veze na liniji deformišu. Deformacije se ispoljavaju gubljenjem pravougaonih oblika impulsa, promjenom njihove dužine i mogućim međusobnim preklapanjima. Usljed preklapanja impulsa, kolo za odlučivanje u prijemniku ne može donijeti pravilan zaključak o tome da li je primljeni signal logička jedinica ili nula, pa se javljaju greške.

Pojava preklapanja impulsa koja ima uticaj na odlučivanje u prijemniku, naziva se intersimbolska interferencija.



**Slika 4.14.** Intersimbolska interferencija: a) impulsi na izlazu iz predajnog pretvarača, b) oblik impulsa na ulazu sklopa za odlučivanje

Pokazaćemo kako pojava intersimbolske interferencije utiče na sklop za odlučivanje u prijemniku. Pretpostavimo da digitalni signal na izlazu iz predajnika ima oblik kao na slici 4.14a. Zbog uticaja na liniji veze, signal neće stići do prijemnika u obliku u kojem je poslat, već će biti deformisan. Pretpostavimo da njegov oblik na ulazu sklopa za odlučivanje izgleda kao na slici 4.14b.

Sklop za odlučivanje u prijemniku uzima odbirke ovakvog primljenog signala u tačkama odabiranja. Tačke odabiranja ponavljaju se sa periodom ( $T$ ), koja odgovara trajanju jednog signalizacionog intervala. Sa slike 4.14b vidi se

da se intenzitet svakog uzetog odbirka, zbog preklapanja sa odbircima koji potiču od impulsa poslatih u ostalim signalizacionim intervalima, sabira s vrijednostima tih odbiraka.

Neka je prag odlučivanja u sklopu za odlučivanje postavljen na vrijednost polovine intenziteta  $U_0$  koji odgovara vrijednosti bita „1“. U tom slučaju svaki odbirak čiji je intenzitet veći od  $U_0/2$  tumačiće se kao „1“, a svaki koji je manji od  $U_0/2$  kao „0“. Sa slike 4.14 vidljivo je da se u tački odabiranja u drugom intervalu, usljed sabiranja djelova susjednih impulsa, dobija impuls čiji je intenzitet veći od  $U_0/2$ . Sklop za odlučivanje protumačiće da je dobio „1“ iako je predajnik u tom signalizacionom intervalu poslao „0“. Dakle, doći će do greške.

Pojava interferencije među simbolima naziva se i **preslušavanje**. Ona predstavlja ozbiljan problem u prenosu digitalnih signala. Zbog toga se velika pažnja poklanja tehnikama za smanjivanje ili otklanjanje uticaja intersimbolske interferencije.

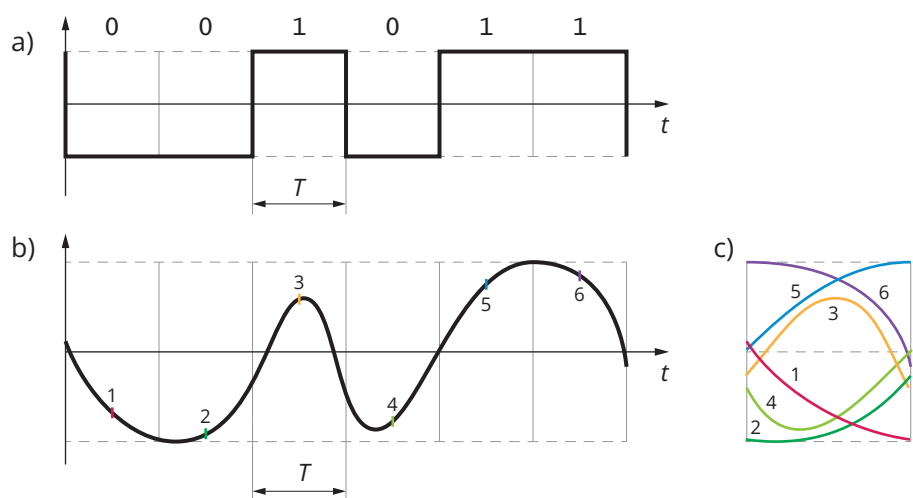
### 4.5.1. Dijagram oka

#### NAPOMENA

Rad sa osciloskopom biće detaljnije objašnjen u praktikumu za laboratorijske vježbe.

Uticaj linija veze na prenos digitalnih signala može se eksperimentalno provjeriti posmatranjem djelova prijemnog digitalnog signala iz svih signalizacionih intervala. To se vrši tako što se primljeni signal snima osciloskopom (uređajem koji na svom ekranu prikazuje vremenski promjenjivu veličinu, npr. napon) čija je vremenska baza (horizontalna osa na osciloskopu jeste osa vremena) podešena na trajanje jednog signalizacionog intervala  $T$ .

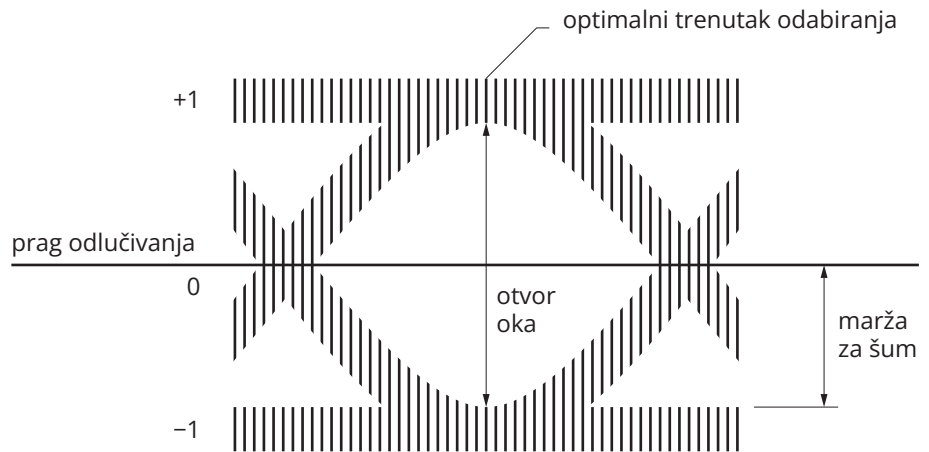
Dijagram koji se dobije na ekranu osciloskopa, zbog sličnosti sa izgledom oka, naziva se **dijagram oka**.



Slika 4.15. a) Poslat signal, b) primljen signal i c) dijagram oka

Na slici 4.15 prikazani su a) talasni oblici poslatog i b) primljenog signala. Djelovi signala iz pojedinih signalizacionih intervala koji su preklapljeni jedan preko drugog, koji daju dijagram oka, prikazani su na slici 4.15c.

Ako se posmatra niz impulsa, javlja se velik broj isprepletanih linija koje obrazuju zadebljane tragove. Oni su prikazani kao osjenčene površine na slici 4.16.



**Slika 4.16.** Dijagram oka dobijen posmatranjem dugačke povorke impulsa

Na slici 4.16 naznačene su neke od veličina na dijagramu oka na osnovu kojih se može procijeniti veličina intersimbolske interferencije.

Što je otvor oka veći, to je interferencija manja. To možemo zaključiti i posmatranjem slike 4.16. Otvor oka predstavlja razmak između krivih 3, 5 i 6, koje odgovaraju vrijednostima simbola „1“, i krivih 1, 2 i 4, koje odgovaraju vrijednostima simbola „0“. Što je razmak veći, intersimbolska interferencija između ovih signala je manja.

Širina otvora odgovara veličini vremenskog intervala u kome je moguće izabrati trenutak odabiranja, odnosno odgovara dužini signalizacionog intervala. Što je otvor širi, interval je duži, pa je sistem manje osjetljiv na grešku u sinhronizaciji predajnika i prijemnika. Najbolji trenutak odabiranja je u trenutku u kojem je otvor oka najveći. Na ovaj način smanjuje se štetan uticaj intersimbolske interferencije.

Rastojanje od linije koja označava prag odlučivanja do najbliže ivice traga, predstavlja maržu (rezervu) za šum u datom trenutku odabiranja. Dokle god je šum manji od ove vrijednosti, on ne utiče na ispravnost donesene odluke, bez obzira na to što se sabira sa amplitudom odgovarajućeg odbirka.



Posmatranjem dijagrama oka može se procijeniti:

- a) efekat izobličenja signala,
- b) odnos signal/šum,
- c) osjetljivost na grešku u sinhronizaciji predajnika i prijemnika,
- d) sve navedeno?

**Odgovor:** d)

## 4.5.2. Idealan sistem i način kako da se izbjegne intersimbolska interferencija

Kako na minimum svesti štetan uticaj intersimbolske interferencije na prenos digitalnih signala? U prethodnom odjeljku zaključili smo da se povećanjem dužine signalizacionih intervala smanjuje i intersimbolska interferencija. Što je interval širi, manji će biti uticaji impulsa iz susjednih intervala, pa će biti manja i interferencija. Međutim, povećanjem dužine signalizacionih intervala povećava se i propusni opseg sistema, a time se povećava i uticaj šuma koji ulazi u prijemnik. Zbog toga se za izbjegavanje intersimbolske interferencije primjenjuju druge tehnike.

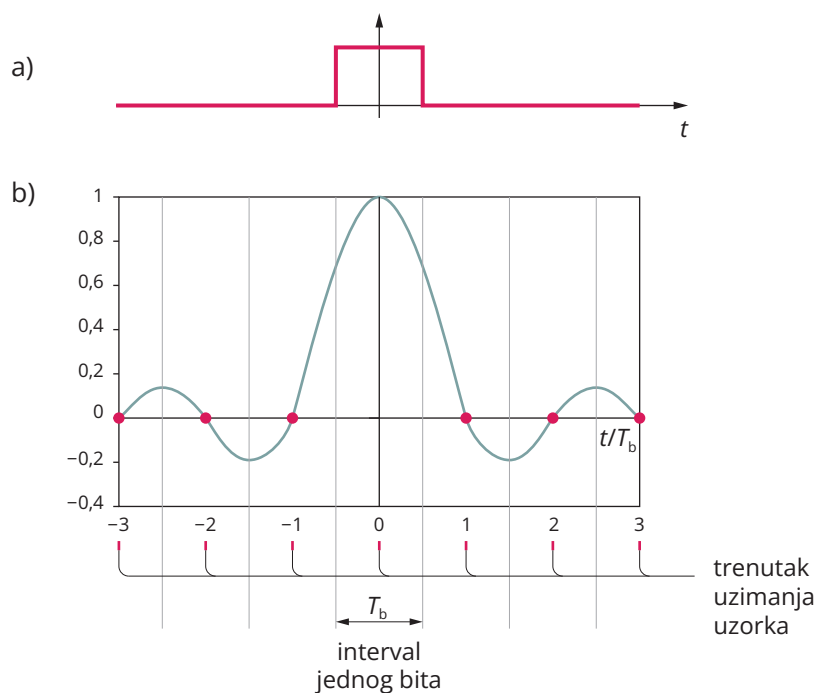
Hari Nikvist je 1928. godine formulisao tri kriterijuma koja treba zadovoljiti da u prenosu digitalnih signala kroz sistem ograničenog propusnog opsega ne dođe do intersimbolske interferencije. Analiza kojom je došao do tih rezultata je složena, pa ćemo ovdje uprošćeno prikazati samo rezultate.

Nikvist je pošao od pretpostavke da se digitalni signali prenose idealnim sistemom prenosa. Idealni sistem prenosa je aproksimirao filtrom granične učestanosti  $f_g$ . Analizom ovog sistema izveo je važan zaključak da je jedino značajna intersimbolska interferencija koja se pojavljuje u trenucima odlučivanja, dok intersimbolska interferencija koja nastaje u trenucima kada se ne vrši odlučivanje nije značajna. Na osnovu toga, definisao je prvi kriterijum.

Prvi Nikvistov kriterijum odnosi se na prenos digitalnih signala kod kojih se odluka na prijemu donosi na osnovu vrijednosti amplituda odbiraka uzetih u sredini signalizacionih intervala, i on glasi:

U prenosu signala kod kojih se odluka na prijemu donosi na osnovu vrijednosti amplituda odbiraka uzetih u sredini signalizacionih intervala, neće doći do intersimbolske interferencije ako odziv sistema  $y(t)$  zadovoljava uslov da je  $y(0) = y_0$  i  $y(kT) = 0$ , gdje su:  $y_0$  konstanta različita od 0,  $k$  bilo koji pozitivan ili negativan cijeli broj, a  $T$  trajanje signalizacionog intervala.

Na slici 4.17 je, radi lakšeg razumijevanja prvog Nikvistovog kriterijuma, prikazan odziv idealnog prenosnog sistema na prenos impulsa. Trenutak odabiranja, tj. uzimanja uzorka bita, vrši se na sredini signalizacionog intervala.



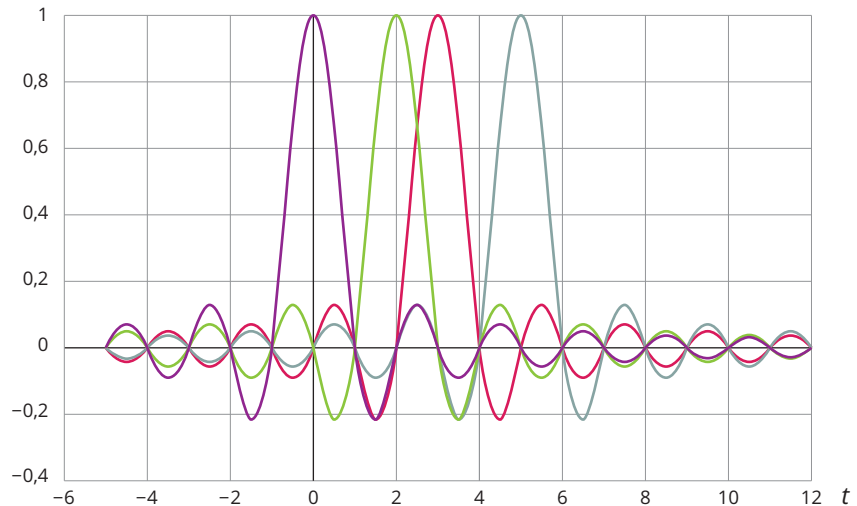
**Slika 4.17.** Odziv idealnog prenosnog sistema na prenos impulsa: a) impuls, b) trenuci uzimanja odbirka signala

Sa slike se vidi da je odziv sistema u trenucima  $t = -3, t = -2, t = -1, t = 1, t = 2, t = 3$  jednak nuli, odnosno da važi:  $y(kT) = 0, k = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ , te da je odziv sistema u trenutku  $t = 0$  jednak jedinici, odnosno da važi  $y(0) = 1$ , što odgovara prvom Nikvistovom kriterijumu.

Postoji velik broj funkcija koje zadovoljavaju prvi Nikvistov kriterijum. Jedna od njih je funkcija

$$y(t) = \frac{\sin \pi \frac{t}{T}}{\pi \frac{t}{T}} \quad (4.4)$$

Kao ilustraciju ovoga kriterijuma posmatrajmo idealan sistem u kojem se u signalizacionim intervalima dužine  $T$  šalje niz bitova 101101. Ako je funkcija odziva ovog sistema data jednačinom (4.4), onda će na mjesto prijema stići složeni signal, prikazan na slici 4.18.



**Slika 4.18.** Složeni signal sa svojim komponentama, dobijen na izlazu idealnog sistema za prenos

Da bi se dobijeni signal pravilno rekonstruisao, na prijemu se prijemnim odabiračem uzima odabirak u sredini  $k$ -tog signalizacionog intervala u kom je bio poslat impuls amplitude  $U_k$ . Na primjeru sa slike 4.18 uzima se prvi impuls u trenutku  $t = 0$ , koji odgovara sredini signalizacionog intervala. U ovom trenutku „repovi“ koji potiču od ostalih impulsa imaju vrijednost nula, što znači da neće doći do preklapanja impulsa, tj. neće postojati intersimbolska interferencija. I za sljedeće impulse sklop za odlučivanje donosi odluku na sredini signalizacionih intervala, u trenucima  $t = 1$ ,  $t = 2$ ,  $t = 3$ ,  $t = 4$  i  $t = 5$ . Sa slike 4.18 vidi se da su u tim tačkama vrijednosti „repova“ ostalih poslatih signala jednaki nuli, pa će se na izlazu iz prijemnika dobiti niz bitova 101101, koji odgovara nizu bitova na izlazu iz predajnika.

Brzina kojom treba slati impulse da bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije određena je, i ona iznosi:

$$\frac{1}{T} = 2f_g. \quad (4.5)$$

Brzina  $\frac{1}{T} = 2f_g$  naziva se **Nikvistova brzina**, i to je najveća moguća brzina signaliziranja za prenos digitalnih signala idealnim sistemom a da ne dođe do pojave intersimbolske interferencije.

Signalizacioni interval

$$T = \frac{1}{2f_g} \quad (4.6)$$

naziva se **Nikvistov interval**.

KONTROLNO  
PITANJE **K4.2** ▶

Zaokruži slovo ispred tačnog tvrđenja. Ako interval vremena odabiranja postane kraći od Nikvistovog intervala, onda:

- a) originalni signal može se reprodukovati
- b) originalni signal ne može se reprodukovati
- c) povećava se propusni opseg
- d) smanjuje se propusni opseg.

**Odgovor:** a) Signal će biti vjerno reprodukovan ako je frekvencija odabiranja veća ili jednaka dvostrukoj najvećoj vrijednosti frekvencije modulišućeg signala. Interval vremena odabiranja obrnuto je proporcionalan frekvenciji odabiranja.

PRIMJER **4.4** ▶

.....  
U Evropi primarni multipleksni signal, zasnovan na IKM, koji se označava sa E1, čine 32 kanala brzine 64 kb/s. Dužina riječi u kanalu je osam bitova. Ako se prenosi govor, čija je najviša učestanost u spektru telefonskog signala  $f_m = 4000$  Hz, odrediti:

- a) ukupan protok, odnosno bitsku brzinu primarnog multipleksa,
- b) periodu odabiranja u svakom kanalu,
- c) trajanje bita odgovarajućeg vremenski multipleksiranog kanala,
- d) Nikvistovu brzinu.

**Rješenje:**

- a) Ukupan protok primarnog multipleksa iznosi

$$v_{max} \text{ [b/s]} = 32 \cdot 64 \text{ kb/s} = 2048 \text{ kb/s.}$$

- b) Perioda odabiranja u svakom kanalu iznos

$$T = 1/2 f_m = 125 \mu\text{s.}$$

- c) Kako je dužina okvira  $125 \mu\text{s}$ , i kako je okvir podijeljen na 32 vremenska odsječka, onda svaki od njih traje  $3,9 \mu\text{s}$ . Pošto svaki od njih sadrži po osam bitova, onda je trajanje bita  $T_b = 0,487 \mu\text{s}$ .

d) Nikvistova brzina je

$$\frac{1}{T_b} = \frac{1}{0,487 \mu\text{s}} = 2,05 \text{ MHz.}$$



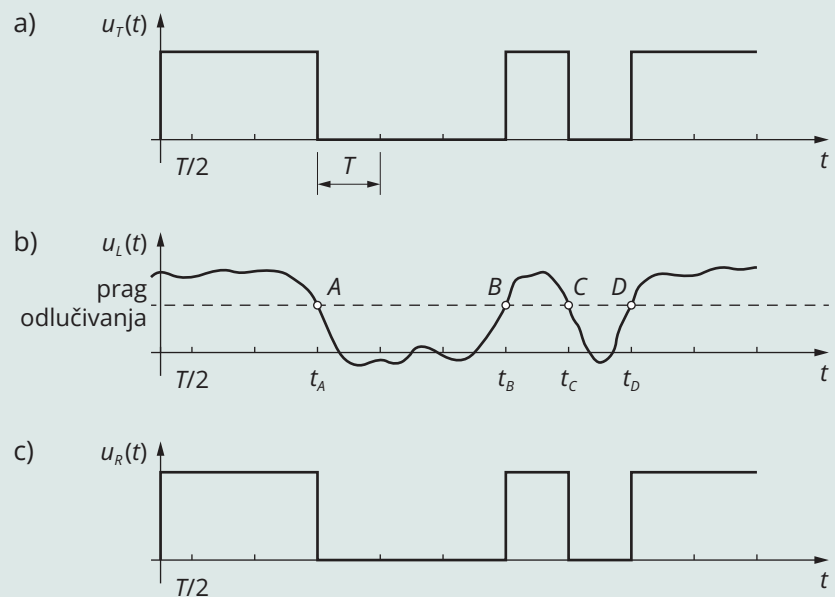
## DODATAK +

### Nikvistovi kriterijumi

Kriterijum kojim se utvrđuje brzina kojom treba slati impulse da bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije, predstavlja prvi Nikvistov kriterijum. Kada je zadovoljen prvi Nikvistov kriterijum, onda je sigurno da u trenucima koji se nalaze u sredini signalizacionih intervala primljenog signala ne postoji intersimbolska interferencija.

Nikvist je formulisao još dva kriterijuma.

Drugi Nikvistov kriterijum definiše kako je moguće obezbijediti prenos u kome ne dolazi do izobličenja trajanja značajnih stanja signala. Uproščeno govoreći, prema drugom kriterijumu, uslov za savršen prenos digitalnih signala jeste da intervali između trenutaka kada signali prolaze kroz srednju vrijednost na mjestu prijema, moraju biti isti kao i odgovarajući interval na strani predaje. Takav slučaj ilustrovan je na slici 4.19.



**Slika 4.19.** Ilustracija uslova za savršen prenos digitalnog signala: a) originalni signal na izlazu iz predajnika, b) signal na ulazu u sklop odlučivanja u prijemniku, c) signal na izlazu iz sklopa odlučivanja

Poslati signal, slika 4.19a, koji ima dva značajna stanja, izobliči se tokom prenosa. Neka ulaz u sklop za odlučivanje izgleda kao na slici 4.19b. Pretpostavimo da je prag odlučivanja u prijemniku postavljen na odabranu vrijednost označenu isprekidanom linijom. Ako u trenucima  $t_A$ ,  $t_B$ ,  $t_C$  i  $t_D$  ne postoji intersimbolska interferencija, prijemnik će donositi ispravne odluke o trajanju značajnih stanja signala, i signal na njegovom izlazu izgledaće kao na slici c.

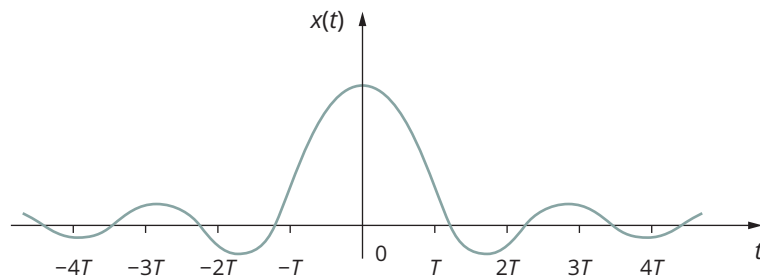
Treći Nikvistov kriterijum govori o tome kako se izbjegava uticaj intersimbolske interferencije kada se za značajan parametar signala izabere površina signala u jednom signalizacionom intervalu. Ta situacija rijetka je u praksi, tako da ovaj kriterijum uglavnom ima samo teorijski značaj.

### 4.5.3. Transverzalni filter

Idealni prenosni sistem koji zadovoljava Nikvistove kriterijume kako u njemu ne bi došlo do intersimbolske interferencije, ne može se ostvariti u praksi. Prije svega, nije moguće izgraditi idealne filtre za oblikovanje impulsa. Dalje, karakteristike kanala mijenjaju se u vremenu. Takođe, na prenos i obradu signala utiču elektronski sklopovi. Zbog ovoga se mora izvršiti korekcija funkcije prenosa sistema. Elektronski sklopovi kojima se koriguje funkcija prenosa sistema, nazivaju se **korektori**. Najpoznatiji korektor jeste **transverzalni filter**.

Na sljedećem primjeru vidjećemo koje su karakteristike transversalnog filtra.

Pretpostavimo da je odziv prenosnog sistema na digitalni signal, koji je poslat u jednom signalizacionom intervalu, trajanja  $T$ , prikazan na slici 4.20.



**Slika 4.20.** Odziv prenosnog sistema na digitalni signal koji je poslat u signalizacionom intervalu trajanja  $T$

Sa slike se jasno vidi da prvi Nikvistov kriterijum nije zadovoljen, jer je u tačkama  $t = mT$ , gdje je  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$  vrijednost signala različita od nule. Nameće se ideja da je sistemu potrebno dodati neki sklop koji može obezbijediti da se u nekom sistemu prenosa zadovolji prvi Nikvistov kriterijum.

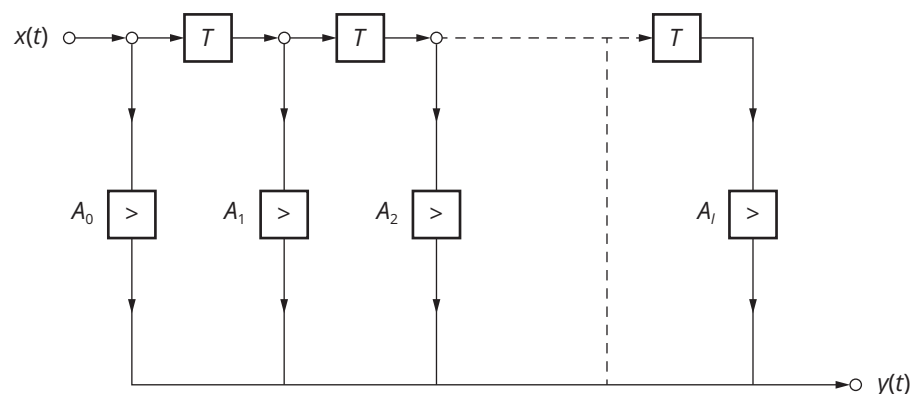


**Rudolf Kalman** (1930–2016), američki inženjer i matematičar mađarskog porijekla. Poznat je po razvoju algoritama koji se koriste u obradi signala.

Taj sklop mora imati u sebi blok za kašnjenje, koji će „razvući“ signal duž vremenske ose kako bi u tačkama  $t = mT$  vrijednost signala bila jednaka nuli. Međutim, signalu se „razvlačenjem“ smanjuju i vrijednosti amplitude, odnosno signal slabi. Zbog toga je potrebno sklopu za kašnjenje dodati i odgovarajući pojačavač, koji bi kompenzovao slabljenje signala. I evo ideje kakav bi trebalo da bude filter za korekciju signala, odnosno transversalni filter: treba da sadrži sklop za kašnjenje i pojačavač.

Osnovnu ideju za konstrukciju transversalnog filtra dao je još 1940. godine Rudolf Kalman. Zbog toga se ovaj filter naziva i Kalmanov filter.

Ovaj filter najčešće se koristi u sistemima za prenos podataka. Njegova uprošćena blok-šema prikazana je na slici 4.21.



**Slika 4.21.** Blok-šema transversalnog filtra

Transverzalni filter sastoji se se iz kaskadne (redne) veze četvoropola koji predstavljaju kola za kašnjenje. Četvoropoli su postavljeni na međusobno jednaka rastojanja, i podešeni tako da je kašnjenje između dva susjedna četvoropola jednako trajanju jednog signalizacionog intervala  $T$ .

Signal uzet sa svakog izvoda kola za kašnjenje prolazi kroz njemu pridruženi pojačavač. Pojačanja pojačavača  $A_0, A_1, \dots, A_l$  mogu da se podešavaju. Izlazni signali iz svih pojačavača sabiraju se i tako daju rezultatni izlazni signal:

$$y(t) = A_0x(t) + A_1x(t - T) + \dots + A_lx(t - lT). \quad (4.7)$$

Prvi Nikvistov kriterijum biće zadovoljen ako odziv sistema  $y(t)$  zadovoljava uslov da je  $y(0) = y_0$  i  $y(mT) = 0$ . Ovaj uslov, upotrebom transversalnog filtra, može da se zadovolji u onoliko tačaka koliko grana ima filter.

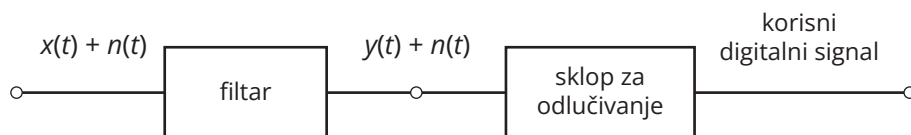
Određivanjem koeficijenata  $A_k$ , što se vrši proračunima čija složenost prevazilazi nivo znanja srednjoškolaca, određuju se parametri transversalnog filtra. Njihovim podešavanjem obezbjeđuje se da u tačkama odabiranja odziv sistema  $y(t)$  bude jednak nuli. Na taj način ispunjava se prvi Nikvistov kriterijum, odnosno izbjegava se pojava intersimbolske interferencije.

## 4.5.4. Optimizacija sistema za prenos u osnovnom opsegu učestanosti

Na prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti u najvećoj mjeri utiču dvije pojave, intersimbolska interferencija i slučajan šum. Pri realizaciji sistema za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu treba voditi računa da njihov štetan uticaj bude što je moguće manji. Zato se vrši **optimizacija sistema**. Cilj svake optimizacije jeste da se pronađe rješenje koje će biti najbolje u datim uslovima i prema unaprijed zadatim kriterijumima.

Pri optimizaciji sistema za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu učestanosti, kao kriterijum za ocjenu kvaliteta sistema uzima se vjerovatnoća greške u prenosu. Ona zavisi od šuma na ulazu u sklop za odlučivanje. Proračun vjerovatnoće greške zasnovan je na složenim matematičkim postupcima, pa ćemo ovdje prikazati samo ideje koje se odnose na mogućnost njenog smanjivanja.

Posmatrajmo sistem za prenos digitalnih signala čiji je prijemni dio prikazan blok-šemom na slici 4.22.



Slika 4.22. Blok-šema prijemnika digitalnih signala

U prijemnik, sa signalom  $x(t)$  stiže i šum, čiji je vremenski oblik dat funkcijom  $n(t)$ . Spektar korisnog signala sabira se (superponira) sa spektrom šuma. Da bi se omogućilo korektno detektovanje korisnog signala na ulazu sklopa za odlučivanje, potrebno je na ulazu u prijemnik postaviti filter koji neće uticati na oblik signala, i koji će u najvećem opsegu učestanosti smanjiti šum. Izborom ovog filtra može se uticati na to da se vjerovatnoća greške učini minimalnom.

Filtar kojim se koriguje funkcija prenosa sistema kako bi se minimizirala vjerovatnoća greške, naziva se **optimalni filtari**.

Postoji više vrsta optimalnih filtara. Oni se konstruišu i biraju na osnovu karakteristika korisnog signala i (neželjenog) šuma, tj. koriste se podaci o prirodi korisnog signala i prirodi šuma, kao i podaci o njihovom spektralnom sastavu. Najčešće se koriste filtri koji ne mijenjaju oblik signala, odnosno filtri koji mu se podešavaju.

Filtar koji je podešen obliku signala naziva se **podešenim filtrom**. U velikom broju slučajeva ovo podešavanje svodi se na podešavanje propusnog opsega filtra opsegu korisnog signala.



# Rezime

- Digitalni signali koji se dobijaju na izlazu pretvarača poruke u signal nalaze se u svom osnovnom opsegu učestanosti, i oni se fizičkim vodovima ili radio-putem mogu prenositi na udaljena odredišta, u osnovnom opsegu učestanosti. U ovakvom prenosu na signalima se ne vrši nikakva dodatna obrada, odnosno ne vrši se postupak modulacije.
- Kodiranjem se poruka (niz simbola) pretvara u niz kodnih riječi. Postoje zaštitni i linijski kodovi. Zaštitnim kodiranjem obezbjeđuje se detekcija i korekcija grešaka u toku prenosa digitalnih signala. Linijski kod služi da se signal koji se prenosi prilagodi liniji veze koja se koristi pri prenosu.
- Linijski kodovi mogu se podijeliti u tri osnovne grupe: unipolarni, polarni i bipolarni. Unipolarni linijski kod je najjednostavniji zato što koristi samo jedan polaritet. Odgovaraju mu dva naponska nivoa,  $+U$  i  $0$ . Polarni linijski kodovi koriste dva polariteta, pozitivan i negativan ( $+U$  i  $-U$ ). Bipolarno kodiranje je vrsta kodiranja gdje se za prenos logičke jedinice koriste dva nivoa napona suprotnog polariteta, tako da se prenose tri vrijednosti:  $+U$ ,  $-U$  i nula. U praksi se često koristi alternativno bipolarni kod, pod nazivom AMI kod. U AMI kodu naponski nivo  $0$  predstavlja bit „0“, dok bit „1“, naizmjenično poprima naponske vrijednosti ( $+U$  ili  $-U$ ).
- Kod Manchester koda period svakog bita dijeli se na dva jednaka intervala. Bit „1“ šalje se tako što se tokom prvog intervala napon drži na visokom nivou, a tokom drugog na niskom. Bit „0“ šalje se obrnuto: prvo nizak napon, zatim visok.
- Za razliku od binarnih signala, koji u svakom značajnom intervalu mogu da imaju jednu od dvije moguće vrijednosti značajnog parametra, značajan parametar  $M$ -arnog signala može da ima jednu od  $M$  mogućih vrijednosti koje odgovaraju određenim naponskim stanjima.
- Nikvistova teorema definiše maksimalnu brzinu prenosa na kanalu, na kojem se zanemaruje prisustvo šuma. U slučaju da postoji  $M$  diskretnih nivoa signala, ona je:  $v_{max} [b/s] = 2f_m \log_2 M$ . Jednačina koja daje maksimalnu brzinu prenosa kroz kanal propusnog opsega  $B$  (Hz), u prisustvu šuma, jeste
$$v_{max} [b/s] = B \log_2(1 + S/N).$$
Ova jednačina naziva se Šenonova teorema.
- Pojava preklapanja impulsa koja ima uticaj na odlučivanje u prijemniku naziva se intersimbolska interferencija.
- Kako linija veze utiče na prenos digitalnih signala, može se eksperimentalno provjeriti posmatranjem djelova prijemnog digitalnog signala iz svih signalizacionih intervala. To se vrši tako što se primljeni signal snima osciloskopom čija je vremenska baza podešena na trajanje jednog signalizacionog intervala  $T$ . Dijagram koji se dobije na ekranu osciloskopa, naziva se dijagram oka.
- Nikvist je formulisao kriterijume koje treba zadovoljiti pa da u prenosu digitalnih signala kroz sistem ograničenog propusnog opsega ne dođe do intersimbolske interferencije. Brzina kojom treba slati impulse da bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije strogo je određena, i ona iznosi
$$\frac{1}{T} = 2f_m.$$
Brzina  $\frac{1}{T} = 2f_m$  naziva se Nikvistova brzina.
- Idealan prenosni sistem koji zadovoljava Nikvistove kriterijume, kako u njemu ne bi došlo do intersimbolske interferencije, neostvariv je u praksi. Zbog toga se vrši korekcija funkcije prenosa sistema. Ta korekcija ima za cilj da se amplitudska i fazna karakteristika sistema u praktičnim uslovima mogu dovesti na oblik

približan onome koji zahtijevaju Nikvistovi kriterijumi. Sklopovi kojima se koriguje funkcija prenosa sistema nazivaju se korektori. Najpoznatiji korektor predstavlja transverzalni filter. Filter

kojim se koriguje funkcija prenosa sistema kako bi se minimizirala vjerovatnoća greške, naziva se optimalni filter.

## Manje poznate riječi

redundantan – suvišan (u tehnici: višak funkcionalno istih elemenata u jednom mehanizmu radi pojačane sigurnosti njegovog funkcionisanja); marža – razmak;

korelacija – uzajamni odnos, uzajamnost; kompenzovati – nadoknaditi.

## Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *I. S. Stojanović: Osnovi telekomunikacija, Građevinska knjiga, Beograd 1977*, obimna knjiga koja je uvela

u svijet telekomunikacija skoro sve naše inženjere. U dijelu koji obrađuje fundamentalne principe telekomunikacija, iako objavljena daleke 1977. godine, knjiga ni danas nije izgubila na svojoj aktuelnosti.

## Zadatak za samostalan rad

Postoje mnogi sajtovi sa prikazima različitih vrsta linijskih kodova. Potraži na internetu primjere i razloge njihovog korišćenja.

## Pitanja za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Skiciraj blok-šemu sistema za prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti. Opiši funkciju svakog bloka iz šeme.
2. Klasifikuj linijske kodove.
3. Objasni zbog čega je važno diferencijalno kodiranje.
4. Prokomentariši praktičan značaj Nikvistove i Šenonove teoreme.
5. Objasni zbog čega je intersimbolska interferencija štetna. Kako se njen uticaj smanjuje?
6. Koliko iznosi brzina kojom treba slati impulse da bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije? Koliko iznosi dužina signalizacionog intervala? Da li se povećanjem ove dužine povećava brzina slanja impulsa? Šta u praksi ograničava ovu dužinu?
7. Ocijeni značaj dijagrama oka.
8. Objasni ulogu transverzalnog filtra.

## Zadaci

1. Odaberi po jedan tip unipolarnog, polarnog i bipolarnog signala pa skiciraj talasni oblik signala koji kodira poruku 10111010.
2. Nacrtaj izgled digitalnog signala za niz bitova 00110101 koristeći Mančester kodiranje.
3. TV kanali imaju frekvencijski opseg od 5 MHz. Koliko se b/s može poslati korišćenjem digitalnog signala od četiri nivoa?
4. Kolika je brzina prenosa signala kanalom opsega 1 MHz ako je odnos signal/šum 6 dB?
5. Izračunaj širinu propusnog opsega kanala za prenos ako je maksimalna brzina prenosa u kanalu 4 Mb/s i ako je odnos  $S/N = 15$ .
6. Izračunaj odnos  $S/N$  u kanalu čija je širina  $B = 5$  MHz ako je maksimalna brzina prenosa signala u kanalu  $v_{max} = 10$  Mb/s.
7. Frekvencijski opseg signala je od 3 do 4 MHz, a odnos signal/šum iznosi 24 dB.
  - a) Izračunaj maksimalnu brzinu protoka.
  - b) Koliko je signalizacionih nivoa potrebno da bi se ostvarila ova brzina?
8. Izračunaj maksimalnu brzinu prenosa digitalnih signala kroz telefonski kanal opsega 3 kHz ako se prenos vrši u:
  - a)  $M = 2$  nivoa
  - b)  $M = 4$  nivoa
  - c)  $M = 8$  nivoa.
9. Skiciraj unipolarni talasni oblik signala koji kodira digitalnu poruku 10011100 ako se prenos poruke vrši u:
  - a)  $M = 2$  nivoa
  - b)  $M = 4$  nivoa
  - c)  $M = 8$  nivoa.



# 5. Prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš karakteristike i načine dobijanja različitih vrsta digitalnih modulacija: amplitudska (ASK), frekvencijska (FSK), fazna (PSK) i kombinovana
- objasniš postupke demodulacije digitalnih signala
- nacrtáš blok-šemu zadatog sistema za prenos digitalnog signala modulisanim nosiocem
- objasniš uticaj šuma na prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem.



Danas većina komunikacionih sistema omogućava obradu i prenos digitalnih signala. Digitalni signali prenose se prenosnim sistemom u osnovnom opsegu (kao što je analizirano u prethodnom poglavlju) i sa modulisanim nosiocem (što je predmet ovog poglavlja). Razlozi za prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem su višestruki, i oni su detaljno objašnjeni u prvom poglavlju. Ovdje ćemo naglasiti dva važna razloga za modulaciju digitalnih signala.

Prvo, kvalitet prenosa digitalnih signala mjeri se brzinom prenosa podataka i vjerovatnoćom pojave greške u prenosu, koja zavisi od širine kanala za prenos i odnosa snage signala i šuma na ulazu u prijemnik. Idealni telekomunikacioni sistem za prenos digitalnih signala trebalo bi da bude jednostavan, maksimalne brzine prenosa, minimalne širine kanala za prenos, minimalne predajne snage. Modulacijom signala poboljšavaju se karakteristike sistema za prenos. I drugo, na početku razvoja telekomunikacionih sistema najčešće su se za prenos govora i podataka koristile već postojeće telefonske linije. Međutim, telefonske linije, kao i

ostali elementi telefonskih kola, prvenstveno su namijenjene za prenos analognih govornih signala u opsegu od oko 4 kHz, a ne za prenos digitalnih signala, kakvi su signali koje generiše računar. Vidjeli smo da signali pravougaonog oblika, kao što su digitalni signali, imaju velik broj komponenti – harmonika, te da zauzimaju širok opseg učestanosti, što – zbog povećanog slabljenja, odnosno mogućnosti izobličenja – nije poželjno pri prenosu. Kako brzina prostiranja signala zavisi od učestanosti, digitalni signali osjetljivi su na slabljenje i izobličenje usljed nejednakog kašnjenja pri prostiranju njegovih komponenti. Zbog toga je slanje signala u osnovnom opsegu učestanosti nepogodno, osim malom brzinom i na kraćim rastojanjima. Da bi se prevazišli problemi prouzrokovani slanjem signala telefonskim vodovima u osnovnom opsegu, digitalni signali se modulišu.

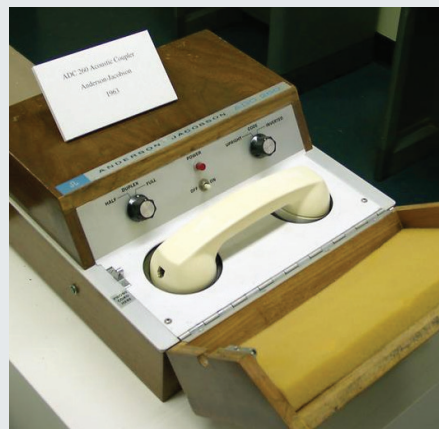
Praktikum laboratorijskih vježbi sadrži vježbu vezanu za sadržaj ovog poglavlja kojom se, upotrebom softvera za simulaciju, vrši snimanje talasnog oblika i spektra modulisanih signala.

## ZANIMLJIVOST

Aleksandar Bel pronašao je 1876. godine telefon. Kao posljedica razvoja telefonije javila se i potreba za razmjenom podataka. Razmjenu podataka omogućila je pojava modema, uređaja koji služi da bi se digitalni signali koje šalje računar pretvarali u analogne putem telefonskih linija. Zbog konverzije signala koju je vršio, uređaj je dobio naziv „modem“, što predstavlja skraćenicu od pojmova MODulator – DEModulator. Pojava prvog modema donijela je revoluciju u razmjeni podataka.

Prvi komercijalni modem bio je „Bell 103“, koji je 1962. godine predstavila američka kompanija AT&T. „Bell 103“ omogućavao je prenos podataka punim dupleksom preko telefonskih linija, brzinama do 300 b/s. Ta brzina bila je sasvim zadovoljavajuća, i odgovarala

je performansama tadašnjih računara. Brzina od 300 b/s omogućavala je prenos oko 30 ASCII karaktera u sekundi, što je predstavljalo mnogo veću brzinu od one kojom je čovjek mogao da kuca na pisačoj mašini ili da čita.



## 5.1. Digitalne modulacije

U prethodnim poglavljima vidjeli smo da medijumi kroz koje se signal prenosi, prouzrokuju slabljenje i izobličavanje signala. Takođe smo vidjeli da je signal sastavljen od pojedinačnih komponenti učestanosti, koje se nazivaju harmonici. Kako je slabljenje signala veće na višim učestanostima, pri prenosu signala svaki harmonik različito slabi u odnosu na druge. Takođe se, zavisno od učestanosti, različiti harmonici na različite načine i izobličavaju. Zbog toga će se, pri prenosu signala koji imaju veliki broj harmonika, odnosno širok spektar učestanosti, signal na prijemnoj strani razlikovati od signala na predajnoj. Ova razlika biće značajnija ukoliko signal koji se prenosi ima više harmonika. Dakle, signali sa širokim spektrom učestanosti nijesu podesni za prenos, ne samo zbog propusnog opsega koji zahtijevaju, već i zbog mogućih izobličenja u procesu prenosa.

Digitalni signali imaju široke spektre učestanosti. Prenos digitalnih signala, pogotovu radio-putem, nije pogodan, jer im se zbog njihovog širokog spektra povećava vjerovatnoća greške u prenosu. Zbog toga je pri prenosu podataka poželjno digitalne signale dodatno obraditi kako bi se prevazišli navedeni nedostaci. Ovo se u praksi realizuje postupkom **modulacije digitalnih signala**.

Digitalna modulacija je proces u kojem digitalni modulišući signal moduliše prostoperiodični signal – nosilac.

Kao rezultat modulacije dobija se analogni modulisani signal, odnosno nosilac sa promjenljivim ali diskretnim vrijednostima značajnih parametara amplitude, učestanosti ili faze.

Signal nosilac moduliše niz digitalnih podataka. Modulacija nosioca prvenstveno se primjenjuje kada se želi da se digitalni signali prenesu radio-vezom. Ali isto tako ona se primjenjuje i u vezama po fizičkim vodovima, kada je osnovni cilj da se translacijom spektara signala ostvari višekanalni prenos kako bi se istim fizičkim vodom istovremeno moglo prenijeti više kanala. Modulacija se takođe koristi kada se signal transponuje iz oblasti niskih učestanosti na kojima transmisionne karakteristike kanala nijesu uvijek najbolje, na neke više učestanosti, pogodnije za prenos.

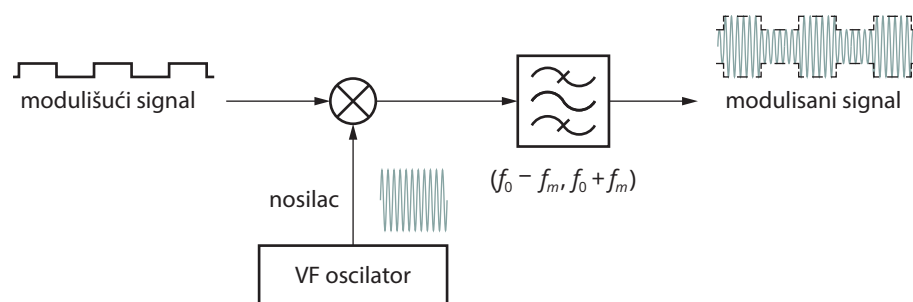
Nosilac je uvijek strogo određen sinusni signal, definisan sa svoja tri parametra: amplitudom, frekvencijom i fazom. Mijenjanjem jednog od ovih parametara u skladu sa promjenama digitalnog signala, i zadržavanjem ostala dva parametra konstantnim, dobija se amplitudski, frekvencijski ili fazno modulisani signal.

Analogne i digitalne modulacije se razlikuju. Na primjer, kod analogne amplitudske modulacije amplituda nosioca mijenja se u skladu sa promjenama signala koji nosi informaciju. Samim tim, broj mogućih vrijednosti amplitude nosioca praktično je neograničen. Kod digitalne amplitudske modulacije, skup mogućih amplituda je ograničen. U najjednostavnijem slučaju, kod prenosa binarnih signala, koji imaju dvije vrijednosti, imamo i skup od dvije vrijednosti nosioca: veću i manju. Veća amplituda odgovara logičkoj jedinici, a manja amplituda logičkoj nuli. Na sličan način, kod digitalne frekvencijske modulacije koriste se dvije osnovne frekvencije.

Uobičajena terminologija u modulaciji digitalnih signala razlikuje se od one primijenjene za analogne signale. Umjesto amplitudske modulacije koja važi za analogne signale, kod digitalnih signala imamo **amplitudsku digitalnu modulaciju** ili amplitudsko pomjeranje – ASK (engl. *amplitude shift keying*); umjesto frekvencijske modulacije, kod digitalnih signala imamo **frekvencijsku digitalnu modulaciju**, ili frekvencijsko pomjeranje – FSK (engl. *frequency shift keying*), i umjesto fazne modulacije, kod digitalnih signala imamo **faznu digitalnu modulaciju** – ili fazno pomjeranje PSK (engl. *phase shift keying*). U prethodnim pojmovima engleska riječ *keying* koristi se kao sinonim za modulaciju. U prenosu digitalnih signala često se koriste i **kombinovani sistemi modulacija**, kao što je **kvadratura amplitudska modulacija** – kombinovana amplitudska i fazna modulacija.

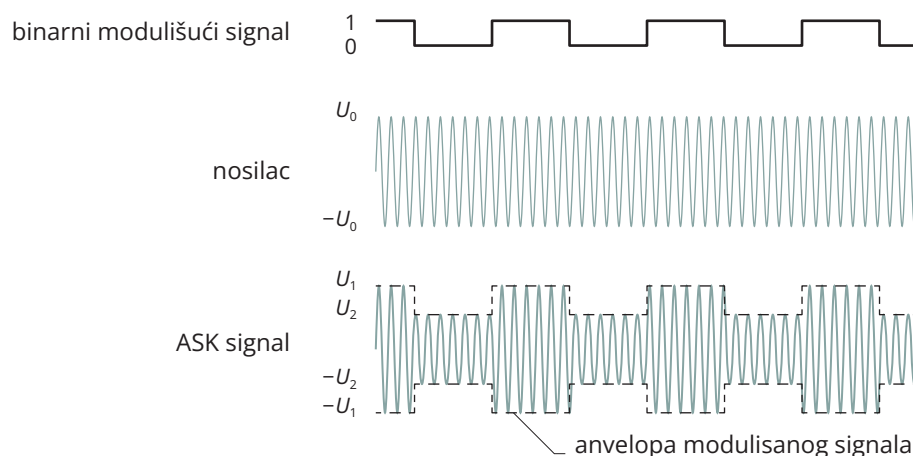
## 5.2. Prenos digitalnog signala amplitudski modulisanim nosiocem

Kada se amplituda digitalnog modulišućeg signala mijenja u ritmu nosioca, dobija se amplitudski modulisani signal. Ovaj proces vrši se u modulatoru, na način prikazan na slici 5.1. Sa slike se vidi da se proces modulacije obavlja množenjem nosioca sa modulišućim signalom. Dakle, radi se o produktnom modulatoru, koji smo opisali kada je bila riječ o analognim amplitudskim modulacijama. Za razliku od analognih modulacija, kod kojih je modulišućí signal analogan, kod digitalnih modulacija modulišućí signal je digitalan. Na izlazu modulatora priključuje se filter propusnik opsega učestanosti, koji ograničava spektar modulisanog signala. Širina spektra ASK modulisanog signala je, kao i kod analognih amplitudskim modulacija, dva puta veća od širine opsega signala u osnovnom opsegu  $f_m$ .



Slika 5.1. Blok-šema ASK modulatora

Niz bitova se u postupku ASK modulacije pretvara u analogni signal sa određenom amplitudom (slika 5.2). Dakle, ASK vrši konverziju digitalnog signala u analogni.



Slika 5.2. Vremenski oblici signala u ASK modulaciji



ASK vremenski modulisani signal sa slike 5.2 ima dvije amplitude,  $U_1$  i  $U_2$ . Veća amplituda  $U_1$  odgovara bitu 1, a manja amplituda  $U_2$  odgovara bitu 0. Zbog toga se, u opštem slučaju, ASK modulisani signal može napisati pomoću izraza

$$u_{ASK}(t) = \begin{cases} U_1 \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi) & \text{za binarno 1} \\ U_2 \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi) & \text{za binarno 0} \end{cases} \quad (5.1)$$

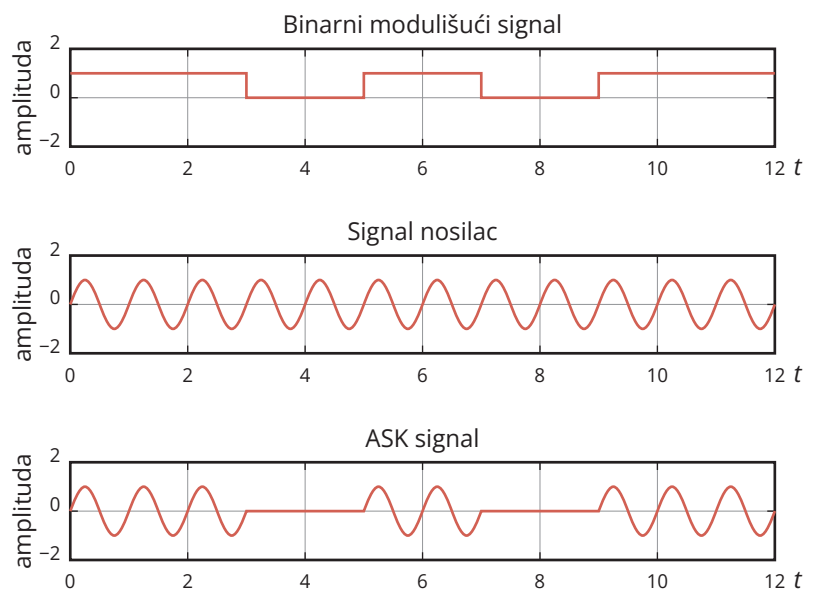
gdje je  $\varphi$  početna faza signala nosioca.

U najjednostavnijem slučaju, definisani ASK modulisani signal ima dvije amplitude, odnosno dva nivoa (0 ili 1), pa se tada radi o binarnom modulisanom signalu. Amplituda ASK modulisanog signala može imati i  $M$  amplitudskih nivoa. U oba slučaja ASK modulisani signal je analogni signal, kojem se amplituda mijenja u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala. Brzina promjene ASK modulisanog signala jednaka je brzini promjene signala nosioca, učestanosti  $f_0$ .

## PRIMJER 5.1 ▶

Prikazati vremenske oblike signala pri ASK modulaciji ako je modulišući signal 111001100111, i ako ASK modulisani signal ima jednu amplitudu za binarnu jedinicu.

**Rješenje:** Na slici 5.3 prikazan je zadati modulišući signal, gdje binarna jedinica odgovara naponu od 1 V, a binarna nula naponu od 0 V ako je signal nosilac amplitude 1 V.

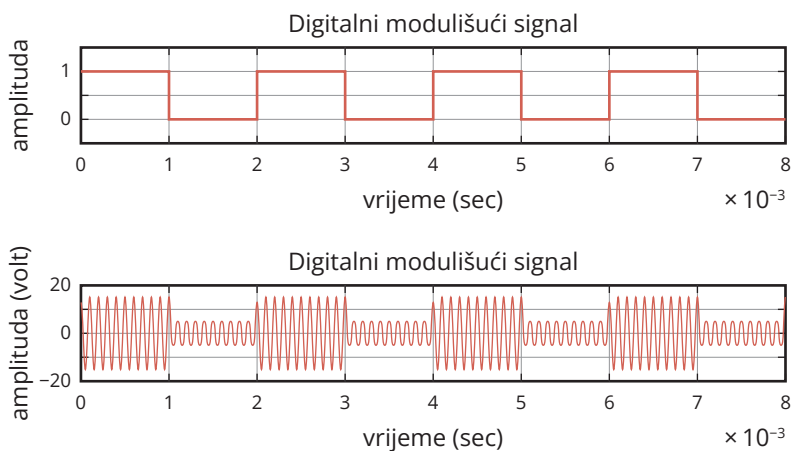


Slika 5.3. Vremenski oblici signala pri ASK modulaciji

## PRIMJER 5.2 ▶

Prikazati vremenski oblik ASK modulisanog signala ako je modulišući signal 10101010, i ako ASK modulisani signal ima dvije amplitude.

**Rješenje:** Na slici 5.4 prikazan je zadati binarni modulišući signal 10101010 i digitalni ASK modulisani signal. Binarna jedinica modulišućeg signala odgovara jednom – većem naponu (od 15 V) a binarna nula odgovara drugom – manjem naponu (koji nije jednak 0 V, i ima vrijednost 5 V). ASK modulisani signal je analogni signal čija se amplituda mijenja u ritmu promjene amplitude modulišućeg signala, sa brzinom promjene signala nosioca.



**Slika 5.4.** Vremenski oblici signala pri ASK modulaciji sa dva naponska nivoa

Ovdje je prilika da se razjasne dva važna pojma koja se susreću pri prenosu digitalnih signala. To su **bitska brzina** i **brzina signalizacije**. Bitska brzina (engl. *bit rate*) opisuje kapacitet prenosnog sistema. Ona predstavlja broj prenesenih bitova u jednoj sekundi (b/s). Ovu veličinu i ranije smo koristili.

U procesu kodiranja bitovi se grupišu na strani predajnika u kodne riječi ili simbole. Brzina signalizacije (engl. *baud rate*) jeste broj prenesenih simbola u jednoj sekundi. Izražava se u *baudima*.

Bitska brzina zavisi od brzine signalizacije i broja bitova u kodnoj riječi. Ona je jednaka proizvodu brzine signalizacije i broja bitova  $n$  koji čine kodnu riječ ili simbol:

$$\text{Bitska brzina} = n \cdot \text{brzina signalizacije.}$$

Bitska brzina je  $n$  puta veća od brzine signalizacije.

KONTROLNO  
PITANJE **K5.1** ▶

Otuda:

Bitska brzina u ASK modulaciji jednaka je brzini signalizacije.

Ako je bitska brzina ASK signala 400 b/s, brzina signalizacije je:

- a) 1 600 bauda
- b) 800 bauda
- c) 400 bauda
- d) 200 bauda?

**Odgovor:** c), 400 bauda.

Iz ovoga se može zaključiti da se bitska brzina može povećati povećanjem broja bitova po simbolu, ili povećavanjem brzine signalizacije. Ovo je tačno, ali samo do određene granice. Prisjetimo se i Nikvistove teoreme. Prema toj teoremi, u slučaju prenosa signala kroz sistem čiji je propusni opseg  $f_m$ , binarni signal može se rekonstruisati ako se uzimaju njegovi odbirci, frekvencijom  $2f_m$ . U ovom slučaju  $2f_m$  predstavlja brzinu signalizacije, pa je:

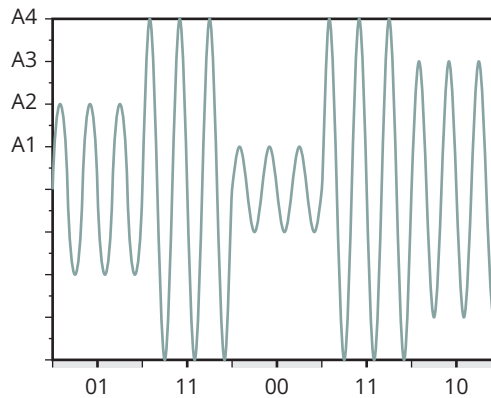
$$\text{Bitska brzina} = n \cdot \text{brzina signalizacije} = n \cdot 2f_m.$$

Digitalni signal može se predstavljati ne samo sa dva, već sa više diskretnih, odnosno amplitudskih nivoa. Sa  $n$  raspoloživih bitova može se predstaviti  $M = 2^n$  nivoa signala, pa iz ovoga slijedi da je  $n = \log_2 M$ . U slučaju da postoji  $M$  diskretnih nivoa signala, maksimalna brzina prenosa u kanalu na kojem se zanemaruje prisustvo šuma iznosi, kao što već znamo:

$$v_{max} [\text{b/s}] = 2 \cdot f_m \log_2 M. \quad (5.2)$$

Sada ćemo na primjeru prikazati kako se grupi bitova može pridružiti analogni signal određene amplitude, te kako se ovim pridruživanjem prikazuje odnos između bitske brzine i brzine signalizacije.

Na slici 5.5 prikazan je signal koji se sastoji od četiri amplitude:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  i  $A_4$ . Pridružimo, redom, ovim amplitudama vrijednosti iz skupa svih mogućih kombinacija od dva bita ( $2^2 = 4$ ): 00, 01, 10 i 11. Dakle, na slici 5.5 prikazan je analogni signal koji odgovara nizu bitova, redom: 01 11 00 11 10. Pretpostavimo da je posmatrani period vremena 1 ms. Za ovo vrijeme preneseno je 10 bitova, ali i pet amplitudskih vrijednosti signala, odnosno pet simbola. U ovom slučaju imamo da je bitska brzina 10 b/ms (u jednoj milisekundi preneseno je 10 bitova), dok je brzina signalizacije 5 simbola/ms. Dakle, bitska brzina je dva puta veća od brzine signalizacije, što je u skladu sa Nikvistovom teoremom.



Slika 5.5. Signal sa četiri amplitude

PRIMJER 5.3 ▶

Izračunati bitsku brzinu prenosa teksta koji se sastoji od 140 simbola kodiranih u ASCII kodu sa sedam bitova, ako je trajanje jednog simbola 1 ms.

**Rješenje:** Tekst se sastoji od 140 simbola (slova, brojeva, specijalnih znaka i sl.). Svaki simbol traje 1 ms, i sastoji se od sedam bitova. Bitska brzina predstavlja broj prenetih bita za 1 s:

$$\begin{aligned} \text{Bitska brzina} &= 7 \text{ bitova/simbolu} \cdot 140 \text{ simbola/1 ms} \\ &= 7 \text{ bitova} \cdot 140 \cdot 10^3/\text{s} \\ &= 980 \text{ kb/s.} \end{aligned}$$

PRIMJER 5.4 ▶

Ako je propusni opseg sistema  $f_m = 5 \text{ MHz}$ , izračunati brzinu signalizacije i bitsku brzinu ukoliko se prenos vrši na četiri nivoa signala.

**Rješenje:** Pošto je dat propusni opseg sistema, po Nikvistovoj teoremi brzina signalizacije jednaka je Nikvistovoj brzini:

$$\text{Brzina signalizacije} = 2f_m = 2 \cdot 5 \text{ MHz} = 10 \text{ MHz} = 10 \text{ MBaud.}$$

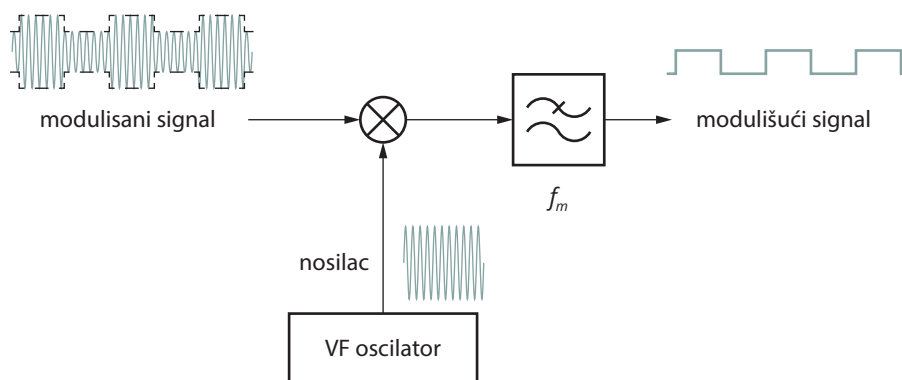
Bitska brzina za prenos na četiri nivoa računa se prema izrazu:

$$\begin{aligned} v_{max} [\text{b/s}] &= 2 \cdot f_m \log_2 M \\ &= 2 \cdot 5 \text{ MHz} \cdot \log_2 4 \\ &= 10 \text{ MHz} \cdot \log_2 2^2 \\ &= 2 \cdot 10 \text{ MHz} \cdot \log_2 2 \\ &= 20 \text{ MHz} = 20 \text{ Mb/s.} \end{aligned}$$

Bitska brzina je dva puta veća od brzine signalizacije, jer se prenos vrši na četiri nivoa, gdje se u svakom nivou prenose istovremeno dva bita, što je u skladu sa Nikvistovom teoremom. ■

## 5.2.1. Demodulacija ASK signala

ASK signali mogu se demodulisati sinhrono i asinhrono. Na slici 5.6 prikazana je blok-šema sinhronog demodulatora sa talasnim oblicima signala na izlazu iz pojedinih sklopova. Sinhroni demodulator ASK signala funkcioniše na isti način kao sinhroni demodulator analognog AM signala, koji smo opisali u odjeljku o analognim amplitudskim modulacijama.



Slika 5.6. Blok-šema sinhronog demodulatora

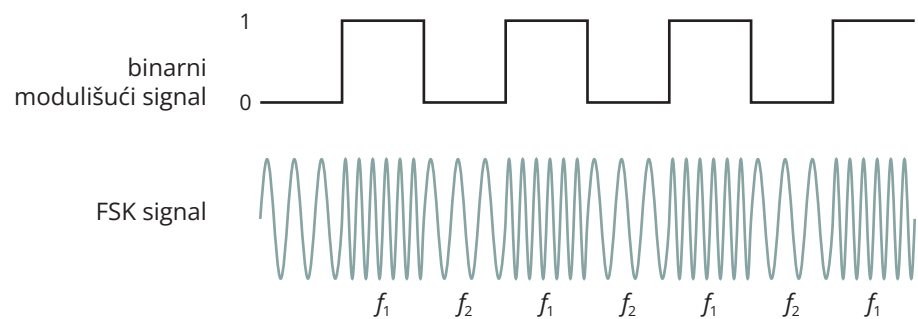
Kada je modulišući signal unipolarni binarni signal, moguće je obaviti asinhronu demodulaciju korišćenjem detektora anvelope, čiji je rad prethodno detaljno opisan.

Iz izloženog se može zaključiti da su kola za modulaciju/demodulaciju ASK signala jednostavna za realizaciju, što je dobra osobina ASK signala. Loša osobina jeste da su ASK signali osjetljivi na uticaj šuma. Ova osjetljivost proizilazi iz činjenice da je informacija smještena u amplitudi signala koji se prenosi. Naime, izobličenja signala nastala pod uticajem šuma, odnosno pod uticajem nelinearnosti električnih sklopova kojim se realizuje ASK postupak, izobličavaju amplitudu ASK signala. Izobličenje amplitude može prouzrokovati i gubitak informacije.

Zbog toga ASK modulacija nema neku značajniju primjenu, pa se, kao što ćemo kasnije vidjeti, kombinuje sa drugim postupcima digitalnih modulacija.

## 5.3. Prenos digitalnog signala frekvencijski modulisanim nosiocem

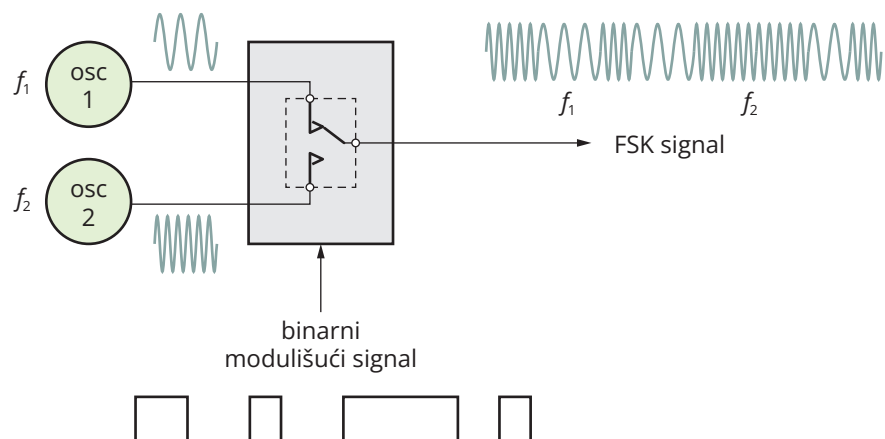
Prenos digitalnog signala frekvencijski modulisanim nosiocem vrši se tako što se pridruži vrijednost bita 0 jednoj, a vrijednost bita 1 drugoj učestanosti analognog signala. Na slici 5.7 ilustrovan je opisani postupak: binarni signal koji se prenosi, mijenja se na sljedeći način: signalu 1 dodjeljuje se učestanost  $f_1$ , a signalu 0 dodjeljuje se učestanost  $f_2$ .



**Slika 5.7.** Vremenski oblici signala u FSK modulaciji

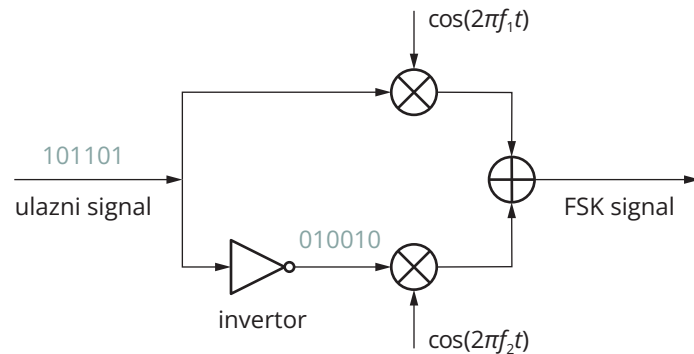
Ovaj postupak predstavlja frekvencijsku digitalnu modulaciju – FSK: učestanost modulisanog signala mijenja se u ritmu promjene amplitude binarnog modulišućeg signala.

FSK signali dobijaju se u FSK modulatorima. Najjednostavniji postupak dobijanja FSK signala prikazan je na slici 5.8.



**Slika 5.8.** Princip rada FSK modulatora sa talasnim oblicima nosilaca, modulišućeg signala i modulisanog signala

FSK modulator sastoji se od dva oscilatora, koji generišu signale više ( $f_2$ ) i niže ( $f_1$ ) učestanosti, i upravljivog prekidača. Generisani signali dovode se na prekidač. Prekidač ima dva položaja. Prekidačem upravlja binarni modulišući signal. Pojava logičke jedinice u binarno modulišućem signalu uključuje prvi oscilator, a pojava logičke nule u binarno modulišućem signalu uključuje drugi oscilator. Prekidač ostaje u prvom položaju onoliko dugo koliko traje logička jedinica, i u drugom položaju onoliko koliko traje logička 0, i tako do kraja trajanja modulišućeg signala. Na izlazu modulatora dobija se FSK signal.



Slika 5.9. FSK modulator

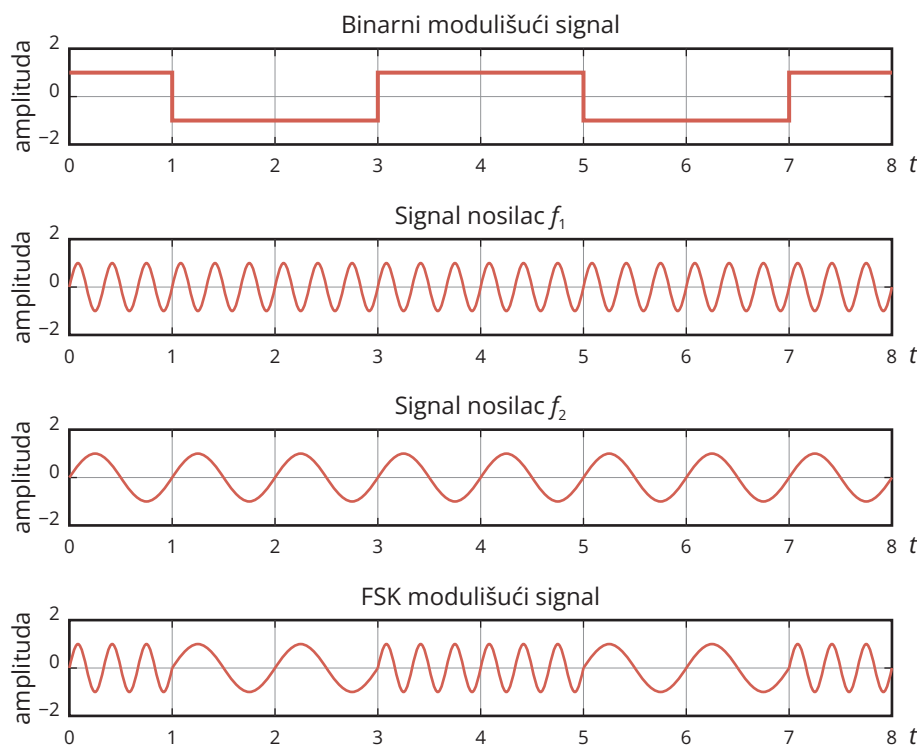
Na slici 5.9 prikazana je blok-šema FSK modulatora zasnovana na upravo izloženom principu rada. FSK modulator sastoji se od invertora, množača i sabirača. Invertor je digitalni uređaj koji generiše binarni signal, inverzan ulaznom binarnom nizu (modulišućem signalu). Umjesto binarne nule invertor generiše binarnu jedinicu, i obrnuto: umjesto binarne jedinice invertor generiše binarnu nulu. Ulazni i invertovani signal vode se na množače, u kojima se množe sa signalima iz lokalnih oscilatora. Lokalni oscilatori generišu signale učestanosti  $f_1$  i  $f_2$ . Ulazni signal (niz binarnih nula i jedinica) vodi se na množač u kojem se množi sa signalom učestanosti  $f_1$  lokalnog oscilatora, i na invertor. Izlaz sa invertora vodi se na množač, u kojem se signal sa invertora množi sa signalom učestanosti  $f_2$  lokalnog oscilatora. U slučaju da je ulazni signal binarna jedinica, na izlazu invertora dobija se binarna nula, i tada nema množenja. Kada je ulazni signal binarna nula, ona se u invertoru pretvara u binarnu jedinicu, pa se zatim vrši množenje, i tom nivou signala dodjeljuje se učestanost  $f_2$ .

Signali sa izlaza množača se sabiraju, dajući na izlazu modulatora FSK signal.

## PRIMJER 5.5 ▶

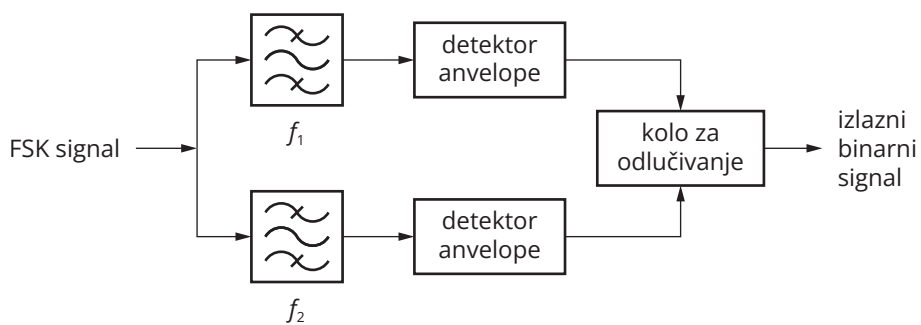
Prikazati vremenske oblike signala pri FSK modulaciji ako je modulišući signal 10011001.

**Rješenje:** Na slici 5.10 prikazani su vremenski oblici signala za FSK modulaciju sa dva signala nosioca.



**Slika 5.10.** Vremenski oblici signala pri FSK modulaciji

Postoje različite metode demodulacije FSK signala. Najčešće se FSK demodulacija obavlja u asinhronim i sinhronim FSK demodulatorima. Na slici 5.11 prikazana je blok-šema asinhronog FSK demodulatora.

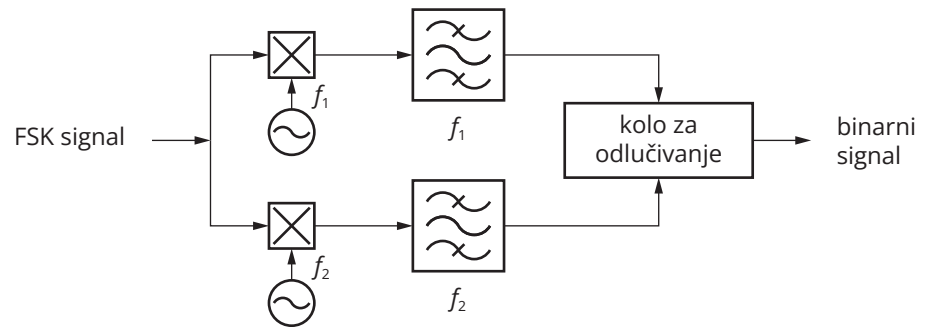


**Slika 5.11.** Blok-šema asinhronog FSK demodulatora

Blok-dijagram asinhronog FSK demodulatora sastoji se od dva filtra propusnika učestanosti, dva detektora anvelope i kola za odlučivanje. FSK signal prolazi kroz dva filtra propusnika opsega učestanosti, koji su podešeni na učestanosti  $f_1$  i  $f_2$  koje odgovaraju učestnostima FSK signala kojim su modulirani logička nula i jedinica. Na izlazu iz ta dva filtra dobijaju se signali koji imaju oblik ASK signala, pa se oni dalje vode na detektore anvelope. Signali se iz detektora anvelope vode do kola za odlučivanje. Kolo za odlučivanje bira koji je izlaz vjerovatniji i uzima ga iz jednog od detektora. Na izlazu demodulatora dobija se binarni niz koji odgovara poslatoj poruci.



Pojednostavljena blok-šema FSK sinhronog demodulatora prikazana je na slici 5.12



**Slika 5.12.** Blok-šema sinhronog FSK demodulatora

Blok-šema sinhronog FSK demodulatora sastoji se od dva množača sa lokalnim oscilatorima učestanosti, dva filtra propusnika opsega učestanosti i kola za odlučivanje.

Ulazni FSK signal vodi se na dva množača, u kojima se množi sa signalima generisanim u odgovarajućim lokalnim oscilatorima čije su učestanosti  $f_1$  i  $f_2$ . Ove učestanosti odgovaraju učestanostima FSK signala kojim su modulirani logička nula i jedinica. Signali iz množača vode se na filtre propusnike opsega učestanosti, koji su takođe podešeni na učestanosti  $f_1$  i  $f_2$ . U ovim filtrima uklanjaju se viši harmonici nastali kao produkt množenja signala u množačima. Kolo za odlučivanje bira koji je izlaz vjerovatniji, i uzima ga iz jednog od filtera. Na izlazu demodulatora dobija se binarni niz koji odgovara poslatoj poruci.

Do sada smo analizirali FSK sisteme u kojima se koriste dvije učestanosti, pa je kod ovih sistema bitska brzina približno jednaka brzini signalizacije. Ako želimo povećati bitsku brzinu, primijenimo model sličan onome koji smo imali kod ASK: umjesto dvije, koristimo više učestanosti. Uzmimo da, na primjer, koristimo četiri učestanosti:  $f_1, f_2, f_3$  i  $f_4$ . Sa dva bita mogu se napraviti četiri kombinacije, tako da svaka kombinacija odgovara jednoj učestanosti, odnosno jednom simbolu. Ako svakom paru bitova pridružimo jednu od četiri učestanosti, onda svaka promjena učestanosti signala predstavlja dva bita podataka. Dakle, na ovaj način bitsku brzinu dvostruko smo povećali u odnosu na brzinu signalizacije.

Širina spektra FSK modulisanog signala je (kao kod analognih FM signala) teorijski beskonačna, pa se u skladu sa kriterijumom o značajnim komponentama signala (isto kao kod analogne FM) može izraziti preko Karsonovog obrasca.

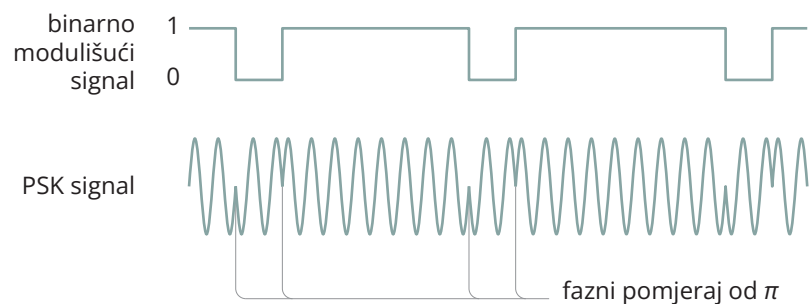
FSK se rijetko primjenjuje u praksi. Međutim, neki modulacioni postupci izvedeni iz FSK imaju primjenu u bežičnim telefonskim sistemima (DECT – engl. *digital enhanced cordless telecommunications*), senzorskim mrežama i bežičnom povezivanju uređaja na malim daljinama (*blutut tehnologija*).

## 5.4. Prenos digitalnog signala fazno modulisanim nosiocem

Prenos digitalnog signala se može vršiti i promjenom faze modulisanog signala u ritmu promjena amplitude modulišućeg signala. Ovakav tip modulacije naziva se fazna digitalna modulacija – PSK. U sistemima prenosa sa faznom modulacijom značajan parametar sinusnog nosioca jeste njegova faza. U idealnim uslovima ovakav signal ima konstantnu amplitudu i učestanost, trajanje signalizacionih intervala je konstantno, a faza nosioca u tim intervalima uzima diskretne vrijednosti iz jednog konačnog skupa kojim se opisuje prenošena poruka.

### 5.4.1. BPSK signal

Na slici 5.13 prikazan je primjer PSK signala gdje se koriste dvije faze, međusobno pomjerene za polovinu periode oscilacije sinusnog signala nosioca, odnosno pomjerene za  $\pi$ . Logičkoj jedinici digitalnog signala odgovara modulisani PSK signal sa fazom  $\varphi_1$ , dok logičkoj nuli odgovara modulisani PSK signal iste amplitude i frekvencije, ali sa fazom  $\varphi_2$  za  $\pi$  pomjerenom u odnosu na fazu  $\varphi_1$ .



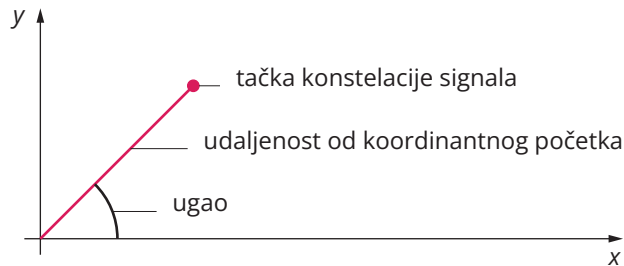
**Slika 5.13.** Primjer PSK signala sa dvije faze

Modulisani PSK signal kod koga postoje samo dvije faze naziva se binarni fazno modulisani signal, i označava se sa BPSK (engl. *binary phase shift keying*).

Vizuelna predstava talasnog oblika signala u postupcima fazne modulacije može biti izuzetno komplikovana. Zbog toga se u praksi ova vizuelizacija (naročito kada su u pitanju tehnike u kojima se kombinuju različiti oblici faznih i amplitudskih modulacija, koje ćemo kasnije upoznati), vrši pomoću dijagrama koji se nazivaju **konstelacioni dijagrami**.

Na slici 5.14 prikazano je kako se predstavlja jedna tačka u konstelacionom dijagramu. Položaj tačke u dijagramu definiše se njenim rastojanjem od koordinatnog početka i uglom koji formira u odnosu na horizontalnu osu.

Amplituda signala odgovara udaljenosti tačke od koordinatnog početka, a fazni pomjeraj odgovara uglu prema horizontalnoj osi.



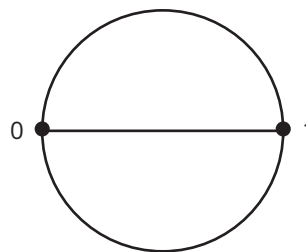
**Slika 5.14.** Predstava stanja signala u konstelacionom dijagramu

Dakle, konstelacija signala predstavlja dijagram koji – pomoću tačaka zadatih u koordinatnom sistemu – definiše sve moguće promjene signala. Koordinate tačaka predstavljaju promjene amplitude i faze koje se prenose, odnosno predstavljaju dozvoljene promjene stanja signala. Broj stanja je različit, i svako stanje može se predstaviti binarnom vrijednošću. Na primjer, ako je broj mogućih stanja 2, onda se oni mogu predstaviti jednim bitom, 0 ili 1. Ako je broj mogućih stanja 4, onda su za njihovo predstavljanje potrebna dva bita kako bi se označila četiri stanja: 00, 01, 10 i 11.

#### NAPOMENA

U literaturi se konstelacioni dijagram ponekad naziva i fazorski dijagram.

Na konstelacionom dijagramu, BPSK modulacija predstavljena je sa dvije tačke na različitim stranama jediničnog kruga između kojih postoji fazna razlika  $\pi$  (slika 5.15). Dakle, konstelacioni dijagram BPSK signala ima dva stanja, označena kao 0 i 1.



**Slika 5.15.** Predstava BPSK signala na konstelacionom dijagramu

Analitički oblik PSK signala je

$$u_{\text{PSK}}(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + k\pi). \quad (5.3)$$

Kako u slučaju BPSK signala  $k$  može imati samo dvije vrijednosti ( $k = 0$  ili  $k = 1$ ), onda važi [koristeći pravila iz trigonometrije  $\cos(\alpha + \pi) = -\cos(\alpha)$  i  $\cos(\alpha + 0) = \cos(\alpha)$ ]:

$$u_{\text{BPSK}}(t) = \pm U_0 \cos 2\pi f_0 t. \quad (5.4)$$

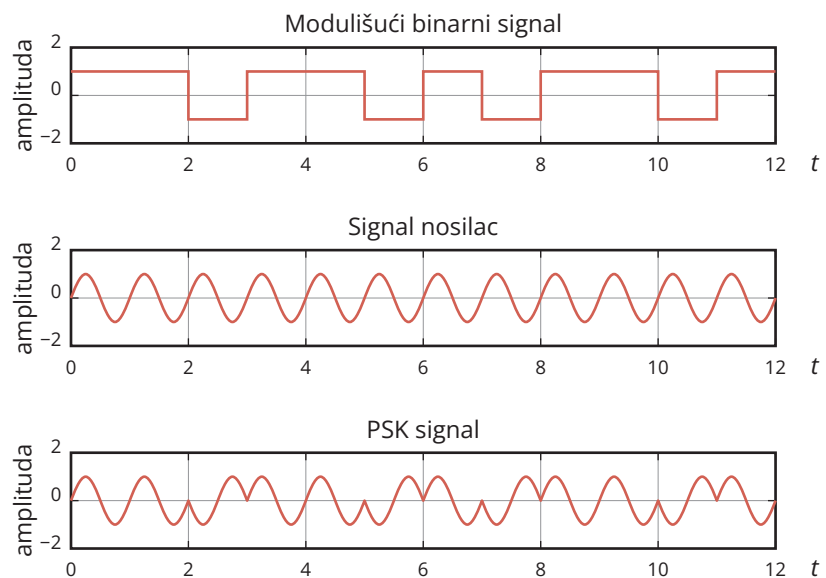
Oblik ovog signala odgovara i obliku ASK signala sa modulišućim signalom čija značajna stanja odgovaraju amplitudama  $\pm U_0$ , pa se BPSK signal može

## PRIMJER 5.6 ▶

analizirati kao ASK signal. S obzirom na tu činjenicu, postupak dobijanja BPSK signala može se analizirati kao ASK modulacioni postupak, pa su i realizacije modulatora i demodulatora BPSK signala identične onima kod ASK signala.

Prikazati vremenske oblike signala pri PSK modulaciji ako je modulišući signal 110110101101.

**Rješenje:** Na slici 5.16 prikazani su vremenski oblici signala pri PSK modulaciji. Modulišući binarni signal moduliše sinusni nosilac. Pri promjeni amplitude binarnog signala mijenja se faza PSK signala za ugao  $\pi$ .



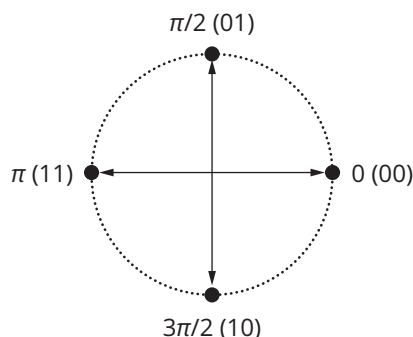
Slika 5.16. Vremenski oblici signala pri PSK modulaciji

### 5.4.2. QPSK signal

Broj različitih faza odgovara broju mogućih stanja digitalnog signala. U prethodnom slučaju, kod BPSK modulacije imali smo dvije faze, odnosno dva stanja digitalnog signala (0, 1), i dvije tačke na konstelacionom dijagramu, gdje se faze mijenjaju za ugao  $\pi$ . U ovom slučaju signal je jednobitni.

Sa četiri fazna pomjeraja prenosi se simbol od dva bita (00, 01, 10, 11) kod koga su faze međusobno pomjerene za  $\pi/2$ , odnosno postoje četiri stanja digitalnog signala i četiri tačke na konstelacionom dijagramu. Četiri fazna pomjeraja mogu biti elementi sljedeća dva skupa: (0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ ) i ( $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$ ,  $7\pi/4$ ) u zavisnosti od toga da li je prvi fazni pomjeraj 0.

Na slici 5.17 predstavljen je konstelacioni dijagram sa četiri fazna pomjeraja,



**Slika 5.17.** Predstava PSK signala sa četiri fazna pomjeraja na konstelacionom dijagramu

Za osam faznih pomjeraja prenosi se simbol od tri bita (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111) kod koga su faze pomjerene za  $\pi/4$ , odnosno postoji osam stanja digitalnog signala i osam tačaka na konstelacionom dijagramu. Osam faznih pomjeraja mogu biti elementi sljedeća dva skupa:

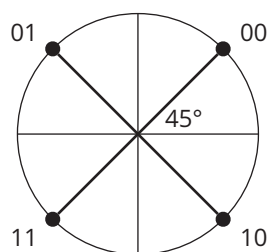
$$\{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4\} \text{ i}$$

$$\{\pi/8, 3\pi/8, 5\pi/8, 7\pi/8, 9\pi/8, 11\pi/8, 13\pi/8, 15\pi/8\}.$$

Znači, modulacija sa više bita povećava bitsku brzinu u odnosu na brzinu signalizacije. U slučaju modulacije sa jednim bitom, bitska brzina jednaka je brzini signalizacije. Modulacija sa dva bita omogućava dva puta veću brzinu od brzine signalizacije. Ako se modulacija vrši sa tri bita, onda je bitska brzina tri puta veća od brzine signalizacije, jer se za isto vrijeme prenesu tri bita.

Rekli smo da se fazno modulirani signali međusobno razlikuju po faznom pomjeraju. Fazni pomjeraj signala mjeri se u odnosu na prethodni signal. Kvaterarni PSK signal (engl. *quadrature phase shift keying* – QPSK) oblik je digitalne fazne modulacije u kojem se dva bita istovremeno modulišu, birajući jedan od četiri moguća fazna pomjeraja nosioca, na primjer  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ili  $270^\circ$ , odnosno  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  i  $3\pi/2$  radijana. Dakle, QPSK signal predstavlja PSK signal sa četiri faze.

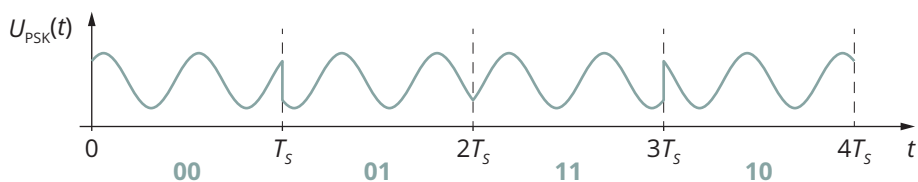
Na slici 5.18 prikazan je QPSK signal na konstelacionom dijagramu, gdje je amplituda konstantna a pomjeraj faze mijenja se u zavisnosti od toga koja se kombinacija bitova prenosi kao fazno modulisan analogni signal.



**Slika 5.18.** Predstava QPSK signala na konstelacionom dijagramu

Skiciranje talasnog oblika QPSK signala je složenije. Ilustrujmo to sljedećim primjerom.

Na slici 5.19 prikazan je talasni oblik QPSK modulisanog signala sa četiri faze:  $\varphi_1 = \pi/4$ ,  $\varphi_2 = 3\pi/4$ ,  $\varphi_3 = 5\pi/4$ ,  $\varphi_4 = 7\pi/4$ , kojima odgovaraju sljedeće kombinacije bitova: 00, 01, 11 i 10.



**Slika 5.19.** Talasni oblik PSK signala sa četiri faze

Na slici 5.19 vertikalnim isprekidanim linijama prikazani su trenuci vremena u kojima signal nosilac mijenja fazu u zavisnosti od toga koja se kombinacija bitova prenosi kao fazno modulisan signal. Na početku se kroz sistem prenosi signal koji odgovara simbolu 00, što odgovara sinusnom signalu koji je pomjeren za  $\pi/4$ . Pomjeranje faze mjeri se uglom promjene, koji je konstantan za svaku kombinaciju bitova, pa dolazak simbola 01 mijenja fazu signala sa  $\pi/4$  na  $3\pi/4$ , što se dešava na kraju prve periode  $T_s$ .  $T_s$  predstavlja periodu pojavljivanja simbola koji se kodiraju sa dva bita. Simbolu 01 u drugoj periodi  $T_s$  odgovara signal nosilac, koji je pomjeren za  $3\pi/4$ , što se dobija sabiranjem prethodnog pomjeraja  $\pi/4$  i ukupnog faznog pomaka od  $\pi/2$ :  $\pi/4 + \pi/2 = 3\pi/4$ . Sljedeća je promjena faze sa  $3\pi/4$  na  $5\pi/4$ ; to se dešava na kraju druge periode, što odgovara simbolu 11. Simbolu 11 u trećoj periodi  $T_s$  odgovara signal nosilac koji je pomjeren za  $5\pi/4$ , što se dobija sabiranjem prethodnog pomjeraja  $3\pi/4$  i ukupnog faznog pomjeraja od  $\pi/2$ :  $3\pi/4 + \pi/2 = 5\pi/4$ . Treća promjena faze dešava se na kraju treće periode, gdje se faza mijenja sa  $5\pi/4$  na  $7\pi/4$ , kada se prenosi simbol 10. Simbolu 10 u četvrtoj periodi  $T_s$  odgovara signal nosilac koji je pomjeren za  $7\pi/4$ , što se dobija sabiranjem prethodnog pomjeraja  $5\pi/4$  i ukupnog faznog pomaka od  $\pi/2$ :  $5\pi/4 + \pi/2 = 7\pi/4$ . Četvrta promjena faze dešava se u trenutku  $4T_s$ , kada se faza mijenja sa  $7\pi/4$  i vraća na početnu fazu od  $\pi/4$ .

Ugao promjene je  $\pi/2$ , jer se radi o modulaciji sa četiri faze ( $360^\circ/4 = 90^\circ = \pi/2$ ). Dakle, u datom vremenu od četiri periode prenosi se osam bitova ili četiri simbola, odnosno udvostručava se bitska brzina prenosa.

Iz ovoga se može izvesti važan zaključak:

QPSK omogućava da signal nosi dvostruko više informacija od binarnog PSK-a koristeći isti propusni opseg.

## KONTROLNO PITANJE K5.2 ▶

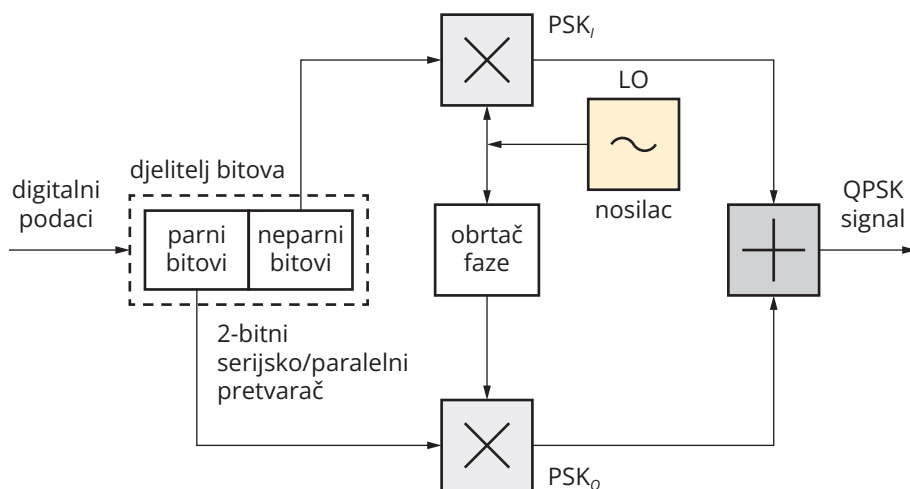
Koliko je faznih pomjeraja moguće formirati sa  $n$  bitova? Koliko se u tom slučaju povećava bitska brzina u odnosu na brzinu signalizacije?

**Odgovor:** Kao i kod ASK i FSK modulacije, sa  $n$  bitova moguće je formirati  $2^n$  faznih pomjeraja, i na taj način  $n$  puta povećati bitsku brzinu u odnosu na brzinu signalizacije.

QPSK tehnike danas se primjenjuju u sistemima za satelitski prenos video-signala, u kablovskim modemima, a često i pri prenosu video-konferencijskih signala. QPSK kodiranje ima primjenu i u mobilnoj telefoniji, kao i u drugim oblicima digitalnih komunikacija radio-putem.

### 5.4.2.1. QPSK modulator

Blok-šema QPSK modulatora prikazana je na slici 5.20.



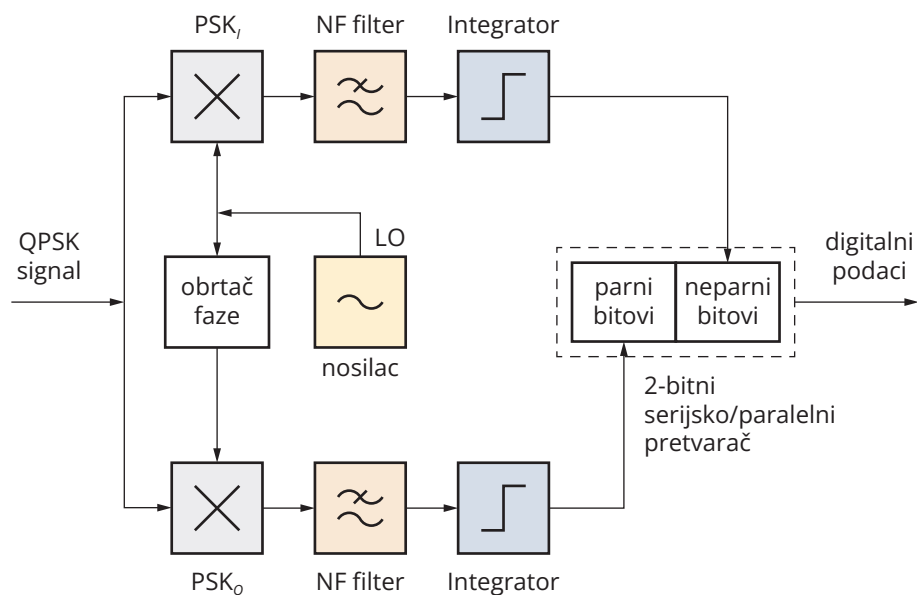
Slika 5.20. QPSK modulator

QPSK modulator koristi djelitelj bitova (engl. *bit-splitter*), dva množača s lokalnim oscilatorom, 2-bitni serijsko/paralelni pretvarač i sabirač. Na ulazu modulatora, parni bitovi signala poruke (drugi, četvrti, šesti bit itd.) i neparni bitovi (prvi, treći, peti bit itd.) odvojeni su razdjelnikom bitova i množe se sa signalom nosioca da bi se dobio neparni BPSK (koji se označava sa PSK<sub>I</sub>),

i parni BPSK (koji se označava sa  $PSK_I$ ) signal. Obrtač faze pomjera obrće fazu  $PSK_Q$  signala za  $90^\circ$ .

#### 5.4.2.2. QPSK demodulator

Blok-šema QPSK demodulatora prikazana je na slici 5.21.



**Slika 5.21.** Blok-šema QPSK demodulatora

QPSK demodulator sadrži dva množača s lokalnim oscilatorom, dva NF filtra, dva integratora i jedan 2-bitni paralelno/serijski pretvarač.

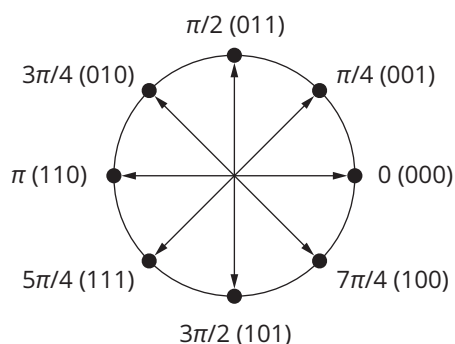
Dva množača na ulazu demodulatora istovremeno demodulišu dva QPSK signala. Parovi bitova  $PSK_I$  i  $PSK_Q$  obnavljaju se iz originalnih podataka u ovim kolima. Nakon obrade, koja se vrši u filtrima i kolima integratora, ti se signali prosljeđuju na paralelno/serijski pretvarač. Na izlazu pretvarača dobijaju se digitalni podaci, nosioci informacije.

Radi povećanja bitske brzine bez povećanja neophodnog propusnog opsega, moguće je dalje povećavati broj bita po simbolu. Tip PSK kod kojeg postoji osam mogućih faznih pomjeraja, koji omogućavaju prenos tri bita po svakom simbolu naziva se 8-PSK.

Korišćenjem tri bita dobija se osam mogućih kombinacija: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 i 111, kojima redom odgovara osam faznih pomjeraja, izraženih u stepenima:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  i  $315^\circ$ .

Na slici 5.22 prikazan je opšti oblik 8-PSK signala na konstelacionom dijagramu.





**Slika 5.22.** Predstava 8-PSK signala na konstelacionom dijagramu

Crtanje talasnog oblika 8-PSK signala je složeno, i ovdje ćemo ga izostaviti.

### PRIMJER 5.7 ▶

Na konstelacionom dijagramu predstaviti 16-PSK signal konstantne amplitude.

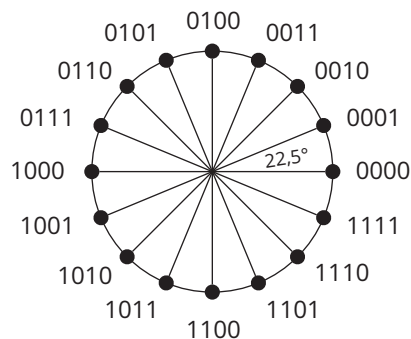
**Rješenje:** Pošto postoji 16 mogućih faznih pomjeraja, korišćenjem četiri bita dobija se 16 mogućih kombinacija: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 i 1111. Pošto je broj stanja digitalnog signala 16, faze se mijenjaju sa korakom

$$360^\circ/16 = 22,5^\circ$$

i to redom:

$$0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ, 112,5^\circ, 135^\circ, 157,5^\circ, 180^\circ, 202,5^\circ, 225^\circ, 247,5^\circ, 270^\circ, 292,5^\circ, 315^\circ \text{ i } 337,5^\circ.$$

Na slici 5.23 prikazan je 16-PSK signal na konstelacionom dijagramu.



**Slika 5.23.** Predstava 16-PSK signala na konstelacionom dijagramu ■

## 5.5. Kvadratura amplitudska modulacija

Vidjeli smo u prethodnom odjeljku kako se pomjeranjem faze postiže povećavanje bitske brzine, pri čemu se ne povećava propusni opseg. Možemo ići i korak dalje kako bi se još više povećao broj bita po simbolu. To se postiže kombinacijom modulacionih tehnika koje mijenjaju dvije karakteristike nosioca u isto vrijeme. Jedna od najčešće korišćenih tehnika jeste ona koja kombinuje amplitudsku modulaciju i pomjeranje faze. Ova tehnika se u literaturi označava kao **kvadratura amplitudska modulacija** (engl. *quadrature amplitude modulation* – QAM), i spada u grupu modulacija koje koriste predstavljanja signala u više nivoa. Odgovarajućom obradom povećava se broj mogućih vrijednosti nivoa signala, čime se povećava brzina njegovog prenosa.

QAM modulacija koristi dvije amplitude i četiri različite faze, odnosno četiri fazna pomjeraja. Kombinacijom dvije amplitude i četiri faze može se definisati osam različitih nivoa signala. Ovakav signal sa osam nivoa, označava se sa 8-QAM. Za predstavljanje osam različitih vrijednosti signala mogu se koristiti tri bita, odnosno sada imamo tri bita po simbolu, ili tri bita po baudu. Od broja nivoa, odnosno od načina kombinovanja različitog broja amplitude i faza, zavisi i vrsta QAM signala. Tako 16-QAM signal ima 16 mogućih stanja; 32-QAM ima 32 moguća stanja i sl. Oznaka za QAM modulaciju podrazumijeva 4-QAM oznaku, koja koristi jednu amplitudu i četiri različite faze, odnosno četiri fazna pomjeraja. Njihovom kombinacijom mogu se definisati četiri različita nivoa signala, korišćenjem dva bita. Konstelacioni dijagrami 4-QAM i QPSK signala su isti.

**Tabela 5.1.** Parametri tipa modulacije 8-QAM

Kombinacija bitova	Vrijednost amplitude signala	Fazni pomjeraji signala
000	$A_1$	0
001	$A_2$	0
010	$A_1$	$\pi/2$
011	$A_2$	$\pi/2$
100	$A_1$	$\pi$
101	$A_2$	$\pi$
110	$A_1$	$3\pi/2$
111	$A_2$	$3\pi/2$

Analizirajmo 8-QAM tip modulacije. Radi jednostavnosti, u analizi ovog tipa modulacije posmatrajmo sinusni signal konstantne učestanosti, čiji je ciklus oscilovanja, odnosno perioda,  $2\pi$ . Dalje, signal ima dvije vrijednosti amplitude:  $A_1$  i  $A_2$ , i četiri fazna pomjeraja: 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  i  $3\pi/2$ . Svako od osam mogućih vrijednosti signala pridružićemo odgovarajuću kombinaciju od tri bita, kako je to prikazano u tabeli 5.1.

Ako nam je osnovni cilj povećanje bitskih brzina po simbolu, postavlja se pitanje o tome koliko se može ići sa povećavanjem broja mogućih stanja signala. Odgovor je: ne previše. Naime, povećavanje broja faznih pomjeraja otežava njihovu detekciju. Osim toga, povećavanje broja mogućih amplitude zahtijeva i povećanje snage signala. Uz to, šum i izobličenja na kanalu dodatno ograničavaju mogućnosti praktičnih sistema da prepoznaju vrlo male razlike u promjenama faze. Ovo su važni faktori ograničenja broja nivoa signala, odnosno ograničenja koja se odnose na bitske brzine po simbolu.

Nosilac je modulisan digitalnim tokom bitova koji imaju jednu od mogućih faza  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  i  $270^\circ$ . Riječ je o modulaciji: a) BPSK, b) QPSK, c) QAM?

**Odgovor:** b). QPSK modulacija predstavlja na konstelacionom dijagramu simbole četvorofaznih uglova nosioca, koji su međusobno ortogonalni.

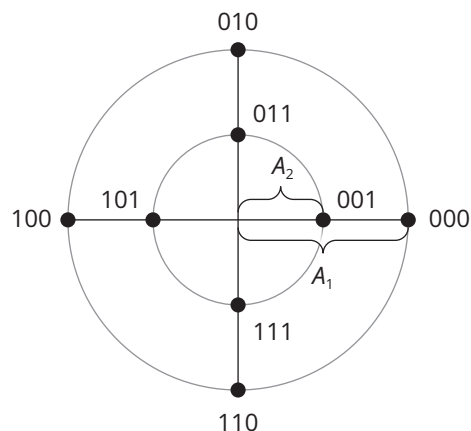
QAM modulacija sa više nivoa danas se primjenjuje u skoro svim telekomunikacionim sistemima gdje se zahtijevaju velike brzine prenosa podataka, npr. u 3G, 4G i 5G mrežama mobilne telefonije, u kojima se koriste modulacije do nivoa 256-QAM. Ovaj tip modulacije koristi se i u sistemima za digitalni difuzni prenos audio-signala, u sistemima za digitalni difuzni TV prenos, kao i u sistemima za Wi-Fi prenos po novom standardu 802.11ax. Standard 802.11ax koristi 1024-QAM modulaciju.

PRIMJER **5.8** ▶

Na konstelacionom dijagramu predstaviti 8-QAM signal koji ima dvije vrijednosti amplitude:  $A_1$  i  $A_2$ .

**Rješenje:** 8-QAM signal ima dvije amplitude:  $A_1$  i  $A_2$ , i četiri fazna pomjeraja po obje amplitude:  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  i  $3\pi/2$ . Fazna razlika – ugao promjene je  $\pi/2$  zato što svakoj amplitude odgovaraju po četiri fazna pomjeraja ( $2\pi/4 = \pi/2$ ). Amplitudi  $A_1$  odgovara prenos sljedeće četiri kombinacije od tri bita (000, 010, 110 i 100). Amplitudi  $A_2$  odgovara prenos sljedeće četiri kombinacije od tri bita (001, 011, 101 i 111).

Na slici 5.24 prikazana je predstava 8-QAM signala na konstelacionom dijagramu.



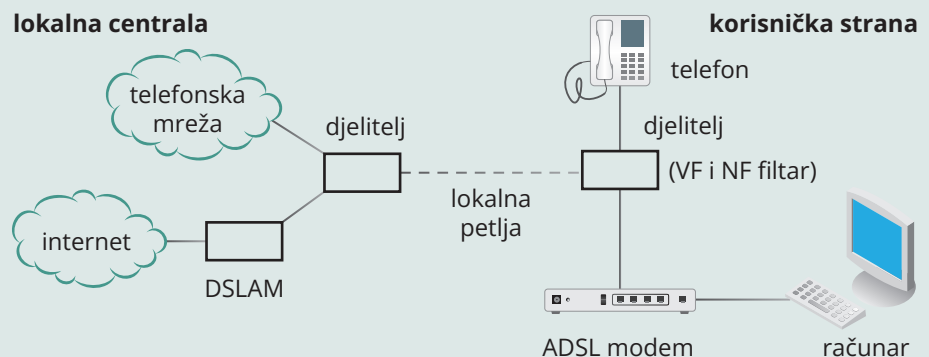
**Slika 5.24.** Predstava 8-QAM signala na konstelacionom dijagramu sa dvije vrijednosti amplitude

## Digitalne pretplatničke linije

Savremeni davaoci internetskih usluga (engl. *Internet service provider, ISP*) povezuju se sa najbližom telefonskom centralom digitalnim linijama. Ako se za povezivanje sa pretplatnikom koristi bakarni vod, onda se prenos podataka vrši korišćenjem **digitalne pretplatničke linije** (engl. *Digital Subscriber Line, DSL*).

Telefonski aparati većine korisnika javne telefonske mreže spojeni su na lokalnu telefonsku centralu bakarnim provodnicima. Kabl od pretplatnika do lokalne centrale naziva se lokalna petlja. Kablovi u lokalnoj petlji mogu da prenose signale do 1 MHz, što je dovoljan frekvencijski opseg za prenos podataka velikim brzinama. Dakle, korisnicima se može obezbijediti pristup internetu velikim brzinama prenosa, bez skupe zamjene postojećih telefonskih kablova, tako što će se oprema u lokalnoj centrali prilagoditi tome da prihvata i obrađuje signale visokih frekvencija. Ovo je i osnovni princip na kojem su zasnovane DSL tehnologije.

Od više verzija DSL tehnologija koje danas postoje, najzastupljenija je asimetrični DSL – ADSL (engl. *Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL*). Kod ADSL-a, riječ asimetričan odnosi se na činjenicu da je bitska brzina kojom korisnik preuzima podatke sa interneta (*download*) veća od brzine kojom korisnik šalje informacije ka internetu (*upload*). Na slici 5.25 prikazana je ADSL konfiguracija.



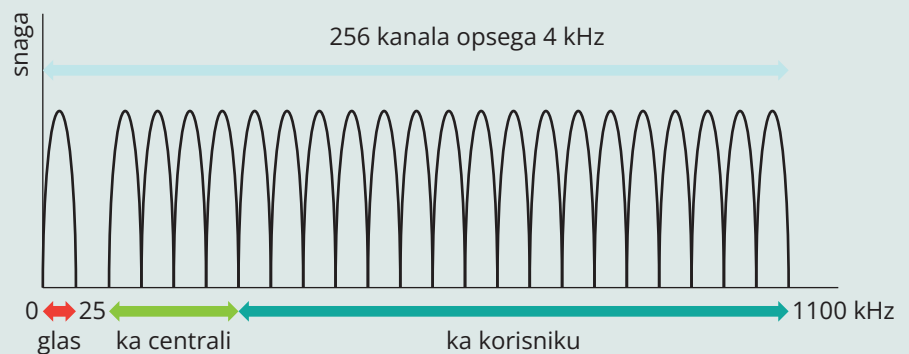
Slika 5.25. ADSL konfiguracija

Na strani korisnika se nalaze djelitelj (engl. *splitter*) i ADSL modem. Djelitelj je sa jedne strane povezan na pretplatničku petlju, sa druge (preko filtra propusnika niskih frekvencija) sa telefonskim aparatom, a preko filtra propusnika visokih frekvencija – sa ADSL modemom. Zadatak djelitelja jeste da kombinuje i razdvaja signale namijenjene telefonskom aparatu i signale namijenjene računaru. Filtar propusnika niskih frekvencija djelitelja (NF filter) odsijeca sve signale iznad 4 kHz kako bi spriječio prolazak visokofrekvencijskih signala iz ADSL modema ka telefonskom

aparatu. Filtar propusnik visokih frekvencija, VF filtar, propušta samo signale visoke frekvencije – ADSL signale (iznad 4 kHz) – do ADSL modema. Dakle, djelitelj povezuje liniju sa telefonskim aparatom (obezbjeđujući mu normalno funkcionisanje), a istovremeno povezuje liniju sa ADSL modemom (obezbjeđujući mu prenos podataka velikim brzinama, potrebnim za pristup internetu). Ovakva konfiguracija daje i dodatnu pogodnost korisniku time što mu omogućuje da, dok se podaci preuzimaju sa interneta, istovremeno može da obavlja razgovor preko telefona.

U lokalnoj centrali, na drugom kraju telefonskog voda, postavlja se razdjelnik, koji izdvaja govorni dio signala (niži od 4 kHz) i šalje ga telefonskoj centrali. Signal koji dobija sa linije, i koji je iznad 26 kHz, razdjelnik prosljeđuje multiplexeru pristupa digitalnoj pretplatničkoj liniji (engl. *Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM*), koji analogni signal sa linije konvertuje u niz bitova, a oni se dalje prosljeđuju davaocu internetskih usluga.

Tehnologija DSLAM modema zasnovana je na tehnici koja se naziva diskretan višetonski sistem (engl. *discrete multitone, DMT*), što je prikazano na slici 5.26. Raspoloživi opseg lokalne linije od 1,1 MHz dijeli se na 256 kanala, opsega od po 4312,5 Hz. Kanal 0 koristi se za prenos telefonskog signala. Kanali 1–5 ne koriste se, kako bi se govorni signal što više odvojio od signala podataka. Od preostalih 250 kanala, dva se koriste za upravljanje (po jedan za svaki smjer prenosa), pa za prenos korisničkih podataka preostaje 248 kanala.

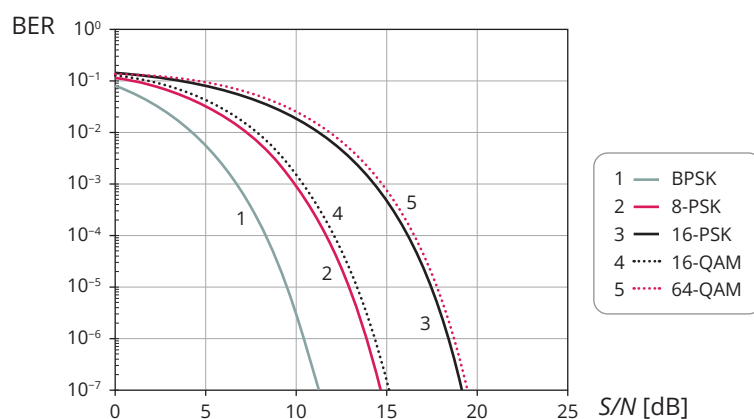


**Slika 5.26.** Diskretan višetonski sistem ADSL konekcija

Davalac internetske usluge određuje koliko će se kanala koristiti za prenos ka centrali, a koliko za prenos ka korisniku. Obično se 32 kanala rezervišu za prenos ka centrali, a ostatak za prenos ka korisniku. Savremeni ADSL modemi nude teorijske brzine prenosa do 100 Mb/s ka korisniku, a do 10 Mb/s ka centrali, ali su brzine u praksi niže. One zavise od više činilaca, prije svega od dužine, debljine i kvaliteta bakarnog voda. Kvalitet signala pogoršava se povećanjem rastojanja između pretplatnika i telefonske centrale. Praksa pokazuje da se ADSL veza ne može ostvariti na udaljenostima većim od 5 km od lokalne centrale.

## 5.6. Uticaj šuma na prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem

Uticaj šuma na prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem mjeri se odnosom signal/šum  $i -$  kao posljedica šuma – **vjerovatnoćom pojave greške po bitu** (engl. *bit error rate*, BER). Vjerovatnoća greške po bitu predstavlja odnos broja pogrešno rekonstruisanih bitova na prijemu i ukupnog broja bitova koje je pošiljalac poslao na strani predaje. Kao kriterijum kojim se mjeri kvalitet prenosa i upoređuju sistemi za prenos signala, najčešće se primjenjuje vjerovatnoća greške u prenosu do koje dolazi usljed uticaja slučajnog šuma. Po ovom kriterijumu, bolji su oni sistemi koji su manje osjetljivi na šum, odnosno oni sistemi u kojima je za jednake odnose signal/šum manja vjerovatnoća greške na ulazu u prijemnik. Do rezultata se dolazi odgovarajućom matematičkom analizom, kao i odgovarajućim simulacionim postupcima. Zbog složenosti ovih postupaka izostavićemo ih, pa ćemo samo prikazati rezultate analiza. Na slici 5.27 prikazana je zavisnost vjerovatnoće greške bita od odnosa signal/šum za različite vrste digitalnih modulacija.



**Slika 5.27.** Zavisnost vjerovatnoće greške bita od odnosa signal/šum za različite vrste digitalnih modulacija

Sa slike se vidi da su tehnike koje koriste *kombinovanu amplitudsku modulaciju i pomjeranje faze* (QAM signali) najosjetljivije na šum, jer imaju veći BER za manje odnose signal/šum. Ako šum postaje veći u odnosu na nivo signala (ako se smanjuje odnos signal/šum), kod ovih signala u prenosu se javlja sve više grešaka. Osjetljivost na šum raste sa povećavanjem kombinacija broja amplituda i faza. Tako je, na primjer, 64-QAM osjetljiviji na šum u odnosu na 16-QAM.

Po osjetljivosti, poslije njih dolaze fazno modulisani signali (PSK signali). Sa povećanjem broja faznih pomjeraja, i kod njih se povećava osjetljivost na šum. Tako je, na primjer, 16-PSK osjetljiviji na šum u odnosu na 8-PSK.

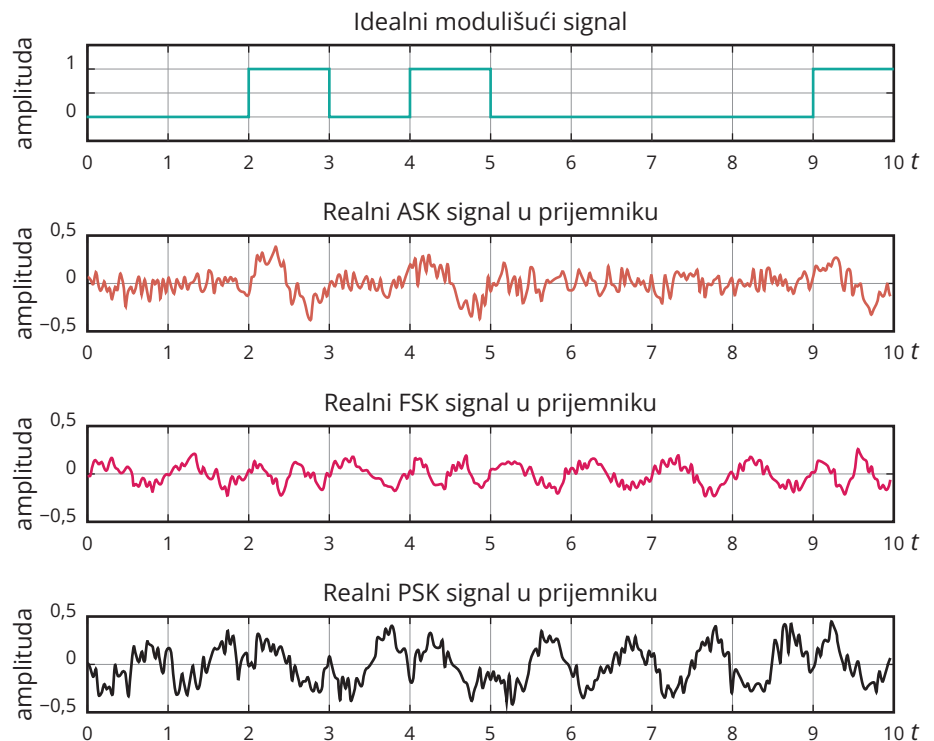
Binarno fazna modulacija najmanje je osjetljiva na šum. Kod ovih vrsta modulacija javlja se manje grešaka u prenosu u slučaju da šum postaje veći u odnosu na nivo signala. Drugim riječima, potrebna im je manja snaga korisnog signala za zadati nivo šuma. Ova činjenica ukazuje na značajnu prednost koje BPSK tehnike u odnosu na sisteme sa QAM i PSK imaju za stanovišta uticaja šuma na prenos.

S obzirom na to da se povećanje broja kombinacija amplituda i faza kod QAM sistema, odnosno broja pomjeraja faza kod PSK sistema, uvodi radi povećanja bitske brzine, zaključujemo da se povećanjem brzine prenosa podataka za isti odnos  $S/N$ , bez obzira na vrstu modulacije, povećava i vjerovatnoća greške u prenosu. Zbog toga:

U sistemima prenosa sa digitalnom modulacijom ne može se povećavati brzina prenosa podataka bez povećanja propusnog opsega i istovremeno zadržavati isti kvalitet prenosa.

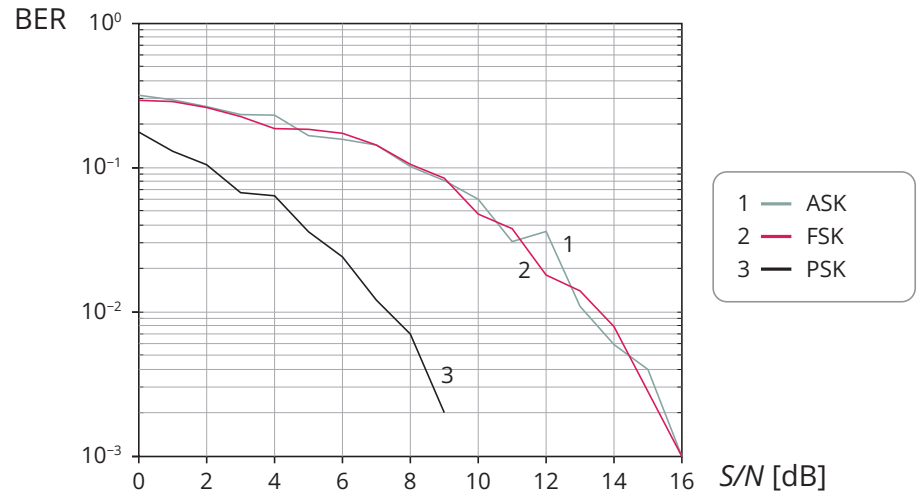
## PRIMJER 5.9 ▶

Na slici 5.28 prikazani su vremenski oblici signala na ulazu u prijemnik pri ASK, FSK i PSK modulaciji kada je modulišući signal 0010100001. Slika je dobijena simulacijom, korišćenjem softvera MATLAB.



**Slika 5.28.** Vremenski oblik digitalno moduliranih signala na ulazu u prijemnik ■

Na slici 5.29 prikazane su zavisnosti BER od odnosa snage signala i šuma za sve tri vrste digitalnih modulacija (ASK, FSK i PSK) za modulišući signal iz prethodnog primjera. Slika je dobijena simulacijom, korišćenjem softvera MATLAB.



**Slika 5.29.** Zavisnost vjerovatnoće greške bita od odnosa signal/šum za različite vrste digitalnih modulacija

Sa slike se vidi da su tehnike koje koriste ASK i FSK modulaciju znatno osjetljivije na šum u odnosu na PSK tehnike, jer imaju veći BER za manje odnose signal/šum.

U prethodnim odjeljcima već smo ukazali na ovu činjenicu. Ona predstavlja veoma važan razlog zbog čega se u savremenim telekomunikacijama znatno više koriste PSK tehnike u odnosu na ASK i FSK tehnike modulacije.



## Rezime

- Postupci modulacije kod kojih je modulišući signal digitalan, nazivaju se digitalne modulacije. Najčešći oblici digitalnih modulacija jesu: amplitudska digitalna modulacija (ASK), frekvencijska digitalna modulacija (FSK) i fazna digitalna modulacija (PSK). U prenosu digitalnih signala često se koriste i kombinovani sistemi modulacije, kao što je kvadraturna amplitudska modulacija – kombinovana amplitudska i fazna modulacija.
- Dva važna pojma koja se sreću pri prenosu digitalnih signala jesu bitska brzina (koja predstavlja broj prenesenih bitova u jednoj sekundi, b/s) i brzina signalizacije (koja predstavlja broj prenesenih simbola u jednoj sekundi). Jedinica za brzinu signalizacije jeste baud. Bitska brzina zavisi od brzine signalizacije i broja bitova u kodnoj riječi, i ona je jednaka proizvodu brzine signalizacije i broju bitova koji čine kodnu riječ ili simbol.
- Kada se amplituda digitalnog modulišućeg signala mijenja u ritmu nosioca, dobija se amplitudski modulisani signal.
- Prenos digitalnog signala frekvencijski modulisanim nosiocem vrši se tako što se pridruži vrijednost bita 0 (logička nula) jednoj, a vrijednost bita 1 (logička jedinica) drugoj učestanosti analognog signala.
- Prenos digitalnog signala može se vršiti i promjenom faze modulisanog signala koja se mijenja u ritmu promjena amplitude modulišućeg signala. Modulisani PSK signal kod koga postoje samo dvije faze, međusobno pomjerene za polovinu perioda oscilacije sinusnog signala nosioca, odnosno pomjerene za  $\pi$ , naziva se binarni fazno modulisani signal i označava se sa BPSK.
- PSK signal sa četiri faze:  $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = \pi/2$ ,  $\varphi_3 = \pi$ ,  $\varphi_4 = 3\pi/2$ , kojima odgovaraju sljedeće kombinacije bitova: 00, 01, 10 i 11, naziva se kvaterarni PSK signal i označava sa QPSK.
- Radi povećanja bitske brzine bez povećanja neophodnog propusnog opsega, moguće je dalje povećavati broj bita po simbolu. Tip PSK kod kog postoji osam mogućih faznih pomjeraja koji omogućavaju prenos tri bita po svakom simbolu, naziva se 8-PSK.
- Vizuelna predstava signala u postupcima fazne modulacije vrši se pomoću dijagrama, koji predstavljaju konstelaciju signala.
- Povećanje broja bita po simbolu postiže se kombinacijom modulacionih tehnika, koje mijenjaju dvije karakteristike nosioca u isto vrijeme. Jedna od najčešćih korišćenih jeste tehnika koja kombinuje amplitudsku modulaciju i pomjeranje faze, i koja se naziva kvadraturna amplitudska modulacija (QAM). QAM modulacija koristi dvije amplitude i četiri različite faze, odnosno četiri fazna pomjeraja. Kombinacijom dvije amplitude i četiri faze može da se definiše osam različitih nivoa signala. Ovakav signal sa osam nivoa, naziva se 8-QAM.
- Amplitudski modulisani signali ASK i QAM osjetljiviji su na šum u odnosu na PSK i FSK signale.

## Manje poznata riječ

konstelacija – raspored, razmještaj, položaj.

## Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produžiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *William Shay: Komunikacione tehnologije i mreže, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Kompijuterske*

*biblioteke, 2004*. Standardne teme, kao što su medijumi za prenos, tehnike za prenos i obradu digitalnih signala, modemi, detaljno su obrađene u ovoj knjizi.

## Zadatak za samostalan rad

Postoje mnogi sajtovi sa video-prikazima tehnika digitalne modulacije i njihovim simulacijama. Potraži na Jutjubu video-zapise o razlozima zbog kojih se koriste ove modulacione tehnike, primjere

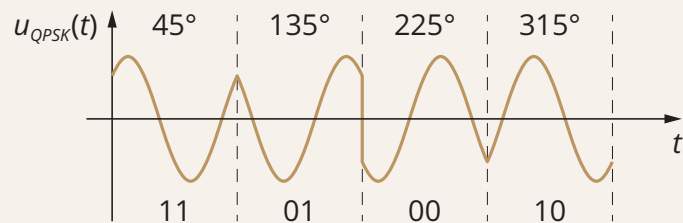
njihovog korišćenja u modernoj tehnologiji, kao i animacije u kojima se prikazuje kako se za različite oblike korisnog signala mijenja talasni oblik digitalno moduliranih signala.

## Pitanja za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Navedi vrste digitalnih modulacija i njihove najvažnije karakteristike.
2. Objasni razliku između bitske brzine i brzine signalizacije.
3. Kada je bitska brzina jednaka brzini u baudima?
4. Opravdaj razloge uvođenja kombinovanih tehnika modulacije digitalnih signala.
5. Koliko bitova po baudu obezbjeđuje QAM tehnika, koja koristi  $m$  faznih pomjeraja i  $n$  amplituda?

## Zadaci

1. Skiciraj izgled vremenskih oblika ASK i FSK signala, kao i PSK signal sa dvije faze, koji odgovaraju povorci bitova 100101000101.
2. Skiciraj vremenski oblik QAM signala koji prenosi niz bitova 101 100 001 000 010 011 110 111.
3. Uporedi bitske brzine i brzine signalizacije modema koji koriste 32 QAM i 64 QAM.
4. Za talasni oblik QPSK signala, prikazanog na slici 5.30, napiši analitički oblik i skiciraj odgovarajući konstelacioni dijagram.



Slika 5.30. QPSK modulirani signal uz zadatak 4

5. Konstelacioni dijagram modema ima tačke u koordinatama  $(1, 1)$ ,  $(1, -1)$ ,  $(-1, 1)$  i  $(-1, -1)$ . Koji tip modulacije koristi modem? Obrazloži odgovor.
6. Nacrtaj konstelaciju signala za uređaj koji koristi QAM tehniku od četiri fazna pomaka i četiri amplitude.
7. Prikaži vremenske oblike signala pri QPSK modulaciji ako je modulišući signal 00110110.



## 6. Praktikum laboratorijskih vježbi

U prvom dijelu ovog poglavlja ukratko će biti opisani laboratorijski uređaji i oprema koju ćeš koristiti tokom izrade laboratorijskih vježbi iz Elektronskih komunikacija II u laboratoriji za telekomunikacije. Na internetu se mogu pronaći sve informacije u vezi sa ovim uređajima i opremom, kao i uputstva za rad koja propisuje proizvođač.

Uputstva su obimna (mogu biti i nekoliko stotina stranica), pa se ne očekuje da ih detaljno čitaš, ali predstavljaju izvor iz koga će ponekad biti potrebno uzeti neki podatak. Bitno je da se pri radu sa ovom opremom poštuju preporuke proizvođača, kako bi uređaji radili ispravno, odnosno kako se ne bi oštetili.



**Slika 6.1.** Laboratorija za telekomunikacije

Od laboratorijskih uređaja najviše će se koristiti: izvor jednosmjernog napona, Emona trener (**ETT** *Emona Telecoms-Trainer*, eksperimentalna pločica za simulaciju) generator funkcija, osciloskop i analizator spektra.

U drugom dijelu poglavlja date su laboratorijske vježbe koje ćeš uraditi uz pomoć nastavnika/ nastavnice.

## 6.1. Laboratorijski uređaji

### 6.1.1. Izvor jednosmjernog napona

Većina električnih kola čiji rad će biti analiziran kroz laboratorijske vježbe koje slijede, za svoj rad zahtijevaju stabilan jednosmjerni napon. Uređaji koji to obezbjeđuju jesu izvori jednosmjernog napona. Zadatak izvora jednosmjernog napona jeste da naizmjenični napon iz električne mreže pretvori u jednosmjerni napon. Izvori jednosmjernog napona, koji se koriste u laboratorijama, moraju da ispuniti sljedeće uslove:

- da imaju mogućnost podešavanja amplitude jednosmjernog napona na željenu vrijednost;
- jednosmjerni napon mora biti dovoljno stabilan, tako da na njega ne utiču promjene vrijednosti mrežnog napona;
- da obezbijede odličnu električnu izolaciju između ulaza (na koji se dovodi mrežni napon) i izlaza uređaja (na kojem se dobija jednosmjerni napon);
- da obezbijede zaštitu od preopterećenja, odnosno od pojave visokih vrijednosti struje na izlazu uređaja.

Postoje analogni i digitalni izvori jednosmjernog napona. Danas se najčešće koriste digitalni izvori. Ovi uređaji na sebi imaju rotirajuću dugmad (potenciometre) pomoću kojih se vrši izbor željene vrijednosti izlaznog napona. Izabrana vrijednost može se očitati pomoću kazaljke sa odgovarajuće skale (analogni izvor – slika 6.2) ili direktno sa ekrana (digitalni izvor – slika 6.3). Uređaj takođe sadrži izlazne priključke, odakle se pomoću sonde (provodnika) željeni jednosmjerni napon vodi do električnog kola ili uređaja koji se napaja.



Slika 6.2. Analogni izvor jednosmjernog napona



Slika 6.3. Digitalni izvor jednosmjernog napona

## 6.1.2. EMONA TELECOMS-TRAINER 101 (ETT 101)

EMONA TELECOMS-TRAINER (slika 6.4) uređaj je koji omogućava izvođenje eksperimenata iz oblasti telekomunikacija korišćenjem sastavnih funkcionalnih blokova. Koristeći ETT-101, telekomunikacioni eksperiment se kreira na nivou blok-dijagrama; na primjer, mogu se kreirati postupci modulacije, kodiranja i slično. Nadovezujući telekomunikacione blok-dijagrame, mogu se formirati razni tipovi modulatora, enkodera i drugih važnih podsistema korišćenjem samo jednog uređaja.



Slika 6.4. Emona Telecoms-Trainer 101 uređaj

Prije početka izvođenja eksperimenta potrebno je provjeriti da li je uređaj priključen na napajanje.

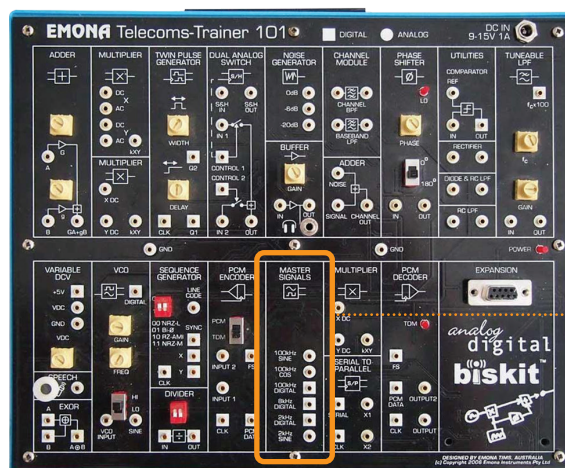


napajanje hardvera DC

Slika 6.5. Napajanje uređaja ETT-101

Elementarni funkcionalni blokovi uređaja, koje ćeš najčešće koristiti prilikom izvođenja vježbi su:

- **MASTER SIGNALS blok** (slika 6.6) generiše nekoliko tipova analognih i digitalnih signala.



MASTER SIGNALS blok

Slika 6.6. Pozicija MASTER SIGNALS bloka uređaja ETT-101

Neki talasni oblici koje ovaj blok generiše jesu: sinusni signal učestanosti 2 kHz i 100 kHz, kosinusni signal učestanosti 100 kHz, povorke pravougaonih impulsa učestanosti 2 kHz, 8 kHz i 100 kHz.



- **ADDER blok** (slika 6.7) služi kao sabirač signala.

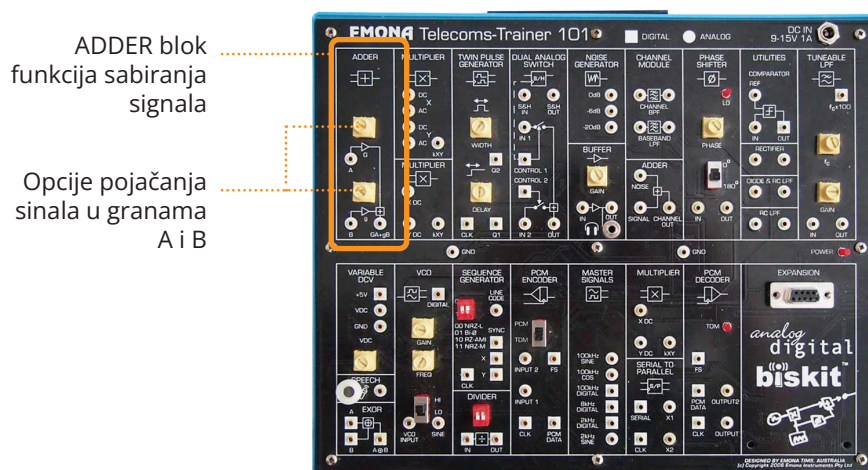
Ako treba sabrati dva signala koja mogu biti generisana iz ETT hardvera, ili iz bilo kojeg spoljašnjeg generatora signala, koristi se blok za sabiranje signala. Signali koji se sabiraju dovode se na priključke A i B, a na priključku  $G_aA + G_bB$  dobija se njihov zbir.

Za svaki od ovih priključka postoji mogućnost ručnog pojačanja signala. Okretanjem odgovarajućeg potencijometra (u smjeru kazaljke na satu) pojačava se signal od 0 do maksimalne vrijednosti pojačanja.

Izlazni signal može se predstaviti izrazom:

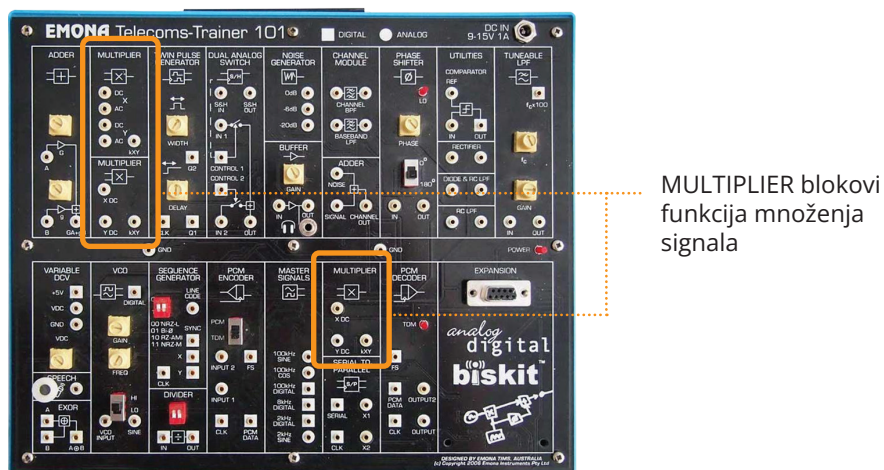
$$U_{iz} = G_aA + G_bB,$$

gdje su  $G_a$  i  $G_b$  pojačanja signala dovedenih na priključke A i B.



Slika 6.7. Pozicija ADDER bloka uređaja ETT-101

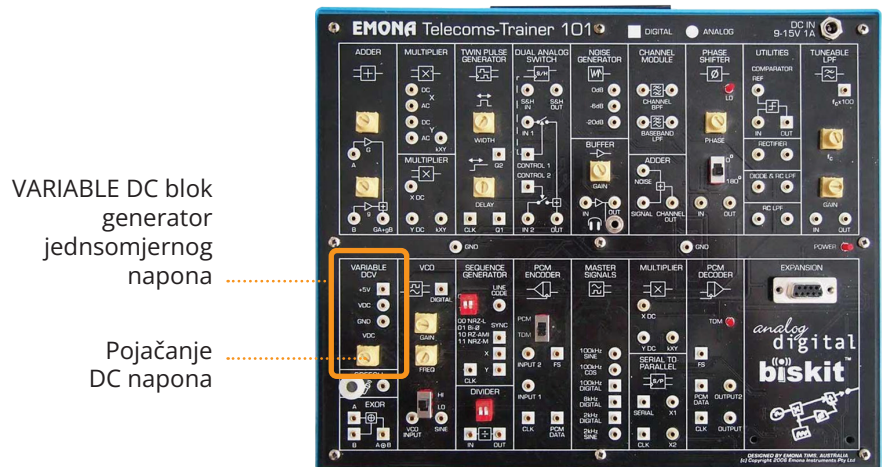
- **MULTIPLIER blok** (slika 6.8) služi kao množak signala.



Slika 6.8. Pozicija MULTIPLIER bloka uređaja ETT-101

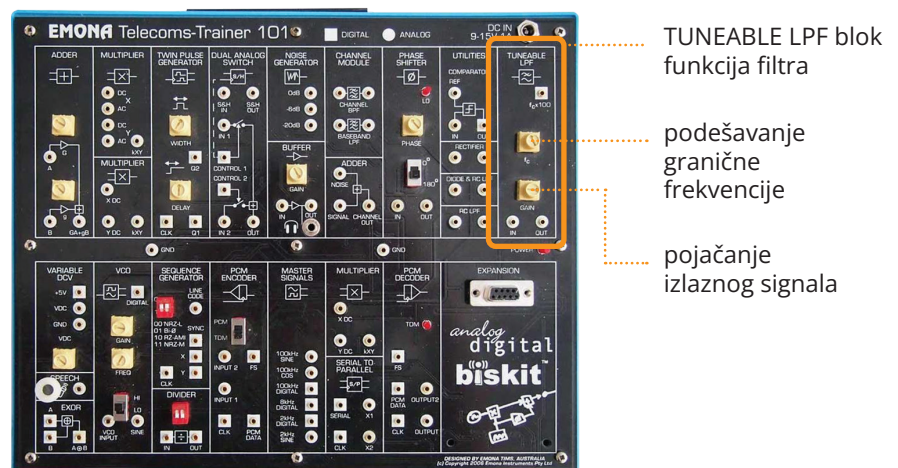
Ako treba pomnožiti dva signala koja mogu biti generisana iz ETT hardvera, ili iz bilo kojeg spoljašnjeg generatora signala, koristi se blok za množenje signala. Signali koji se množe, dovode se na odgovarajuće ulazne priključke X i Y, a na priključku XY dobija se njihov proizvod.

- **VARIABLE DC blok** (slika 6.9) služi kao izvor jednosmjernog (DC) napona. Vrijednosti DC napona mogu se ručno podešavati pomoću potenciometra.



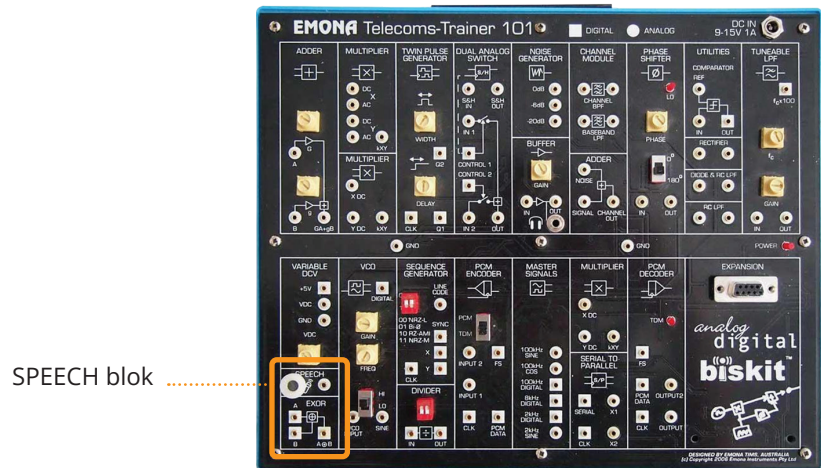
Slika 6.9. Pozicija VARIABLE DC bloka uređaja ETT-101

- **TUNEABLE LPF blok** (slika 6.10) ima funkciju filtra propusnika niskih učestanosti. Granična učestanost filtra ručno se podešava odgovarajućim potenciometrom. Vrijednost izlaznog signala takođe se može ručno podešavati potenciometrom.



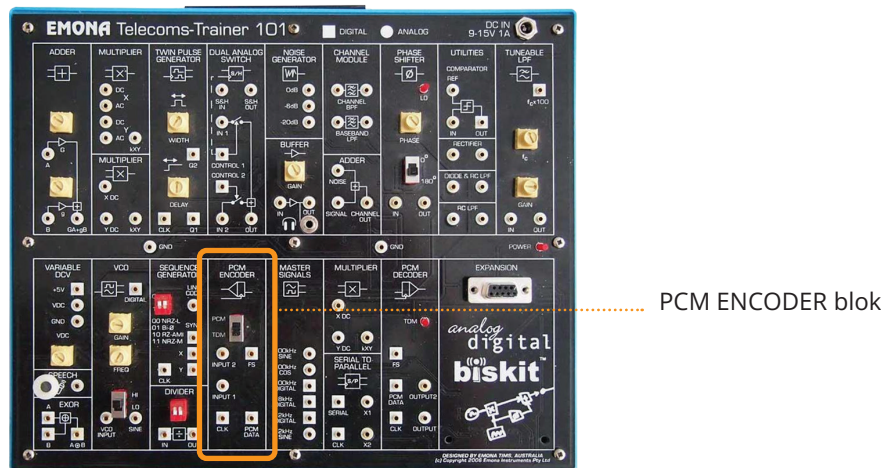
Slika 6.10. Pozicija TUNEABLE LPF bloka uređaja ETT-101

- **SPEECH blok** (slika 6.11) upotrebljava se kada se umjesto signala iz nekog generatora koristi govorni signal. Ovaj blok konvertuje govor u odgovarajući signal, odnosno ima ulogu mikrofona.



Slika 6.11. Pozicija SPEECH bloka uređaja ETT-101

- **PCM ENCODER blok** (slika 6.12) koristi se za konverziju - pretvaranje analognog signala u digitalni signal.



Slika 6.12. Pozicija PCM ENCODER bloka uređaja ETT-101

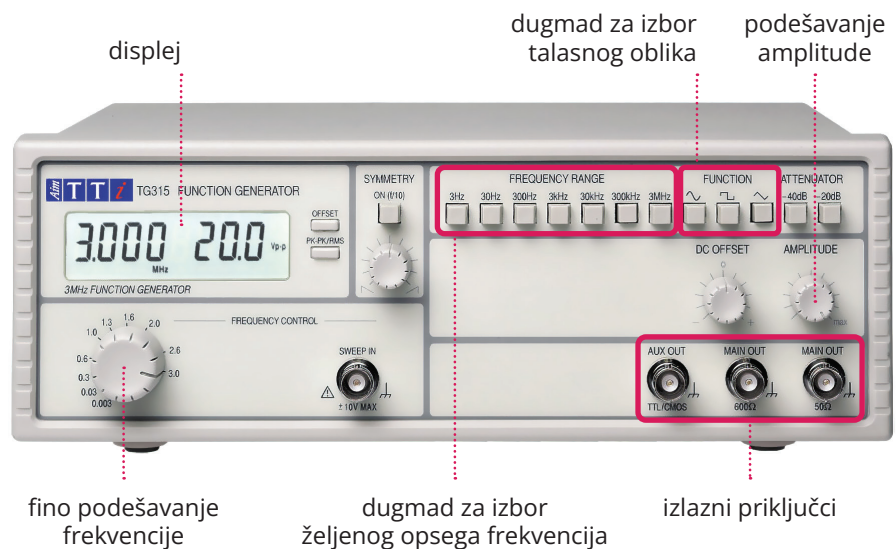
### 6.1.3. Generator funkcija

Generator funkcija (slika 6.13) uređaj je koji na svom izlazu stvara električne napone različitih vrijednosti, talasnih oblika i učestanosti. Talasni oblici generisanih napona najčešće mogu biti u obliku sinusoide, povorke pravougaonih impulsa ili trouglastog napona, mada je kod nekih generatora

moguće generisati i neke složenije naponske oblike. Učestanosti se kreću u rasponu od 0 Hz do nekoliko stotina MHz, a izbor željenog opsega se, kao i kod izbora naponskog oblika, vrši pritiskom na odgovarajuće dugme. Fino podešavanje učestanosti, kao i maksimalne vrijednosti (amplitude) generisanog signala, vrši se pomoću odgovarajućih rotirajućih dugmadi, a sve promjene očitavaju se na ekranu. Na rubovima ekrana ispisane su jedinice mjere za učestanost i napon (Hz, kHz, MHz, V i mV) a pored svake od njih postoji svjetlosni indikator kojim se signalizira u kojoj se od tih jedinica prikazuje rezultat. Pored jedinica za napon postoji i oznaka p-p, što označava da se na ekranu ispisuje razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti signala koji se generiše. Na primjer, ako želimo da generišemo signal čija je maksimalna amplituda  $U_m = 5\text{ V}$ , onda je potrebno da na ekranu bude ispisano  $10\text{ V}_{pp}$  (vrh - vrh, engl. *peak to peak*), jer je to napon od vrha do vrha, odnosno razlika između maksimalne ( $U_m$ ) i minimalne ( $-U_m$ ) amplitude sinusne funkcije. Zbog toga je napon  $V_{pp}$  dva puta veći od maksimalnog napona  $U_m$ :

$$U_{pp} = U_m - (-U_m) = 2U_m.$$

Izlazni kontakti realizovani su u vidu BNC konektora, tako da je potrebno koristiti sonde sa završecima istog tipa. Ovo su neke od osnovnih mogućnosti generatora funkcija, mada u zavisnosti od karakteristika i namjene mogu imati i mnogo više mogućnosti.



Slika 6.13. Generator funkcija

### BNC konektor

BNC konektor je element za spajanje koaksijalnih kablova (slika 6.14).



Slika 6.14. BNC konektor

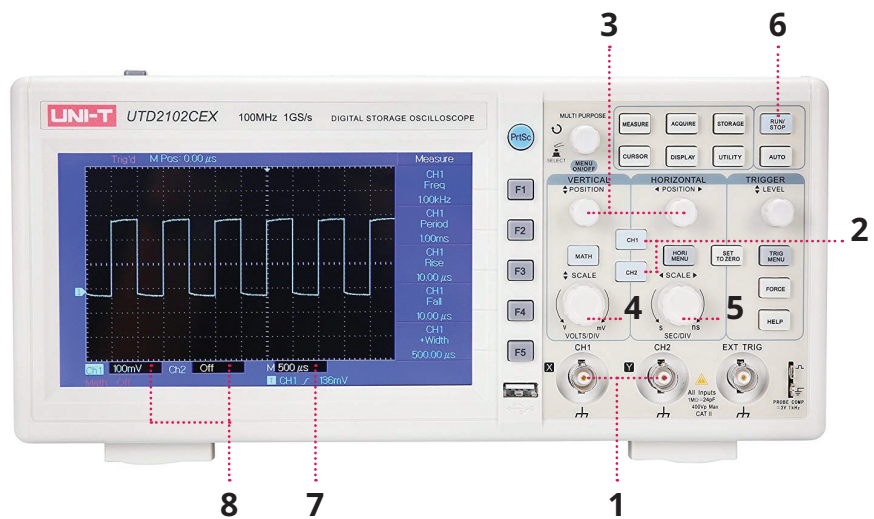
## 6.1.4. Osciloskop

Osnovna namjena osciloskopa (slika 6.15) jeste prikazivanje talasnih (vremenskih) oblika naponskih signala dovedenih na njegov ulaz. Takođe je moguće, uz primjenu odgovarajućih pretvarača neelektričnih veličina u električne, posmatrati i mjeriti i neelektrične signale.

Osciloskopom se mogu izmjeriti vrijednost napona, perioda i frekvencija periodičnog signala. Takođe, moguće je vršiti i upoređivanje različitih signala njihovim istovremenim prikazom na ekranu osciloskopa.

Postoje razne vrste osciloskopa, sa različitim brojem mjernih kanala i namjenama. Najčešće se koriste osciloskopi sa dva mjerna kanala, pomoću kojih se mjere i upoređuju dva ulazna signala. Broj dugmadi pomoću kojih se kontroliše rad osciloskopa varira u zavisnosti od vrste osciloskopa i samog proizvođača. U nastavku će biti opisana namjena najčešće korišćenih dugmadi.

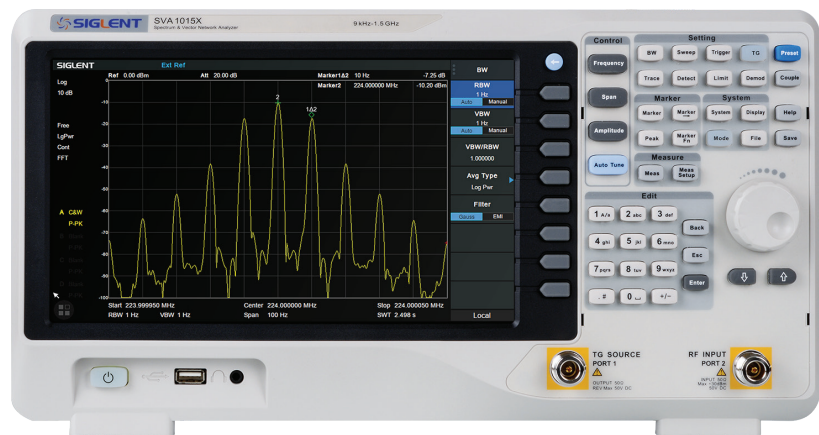
*ON/OFF* ili *POWER* dugme služi za uključenje/isključenje osciloskopa. Na ulazne priključke sa *BNC* konektorima (kanali X i Y- slika 6.15, oznaka 1) dovode se naponi koji se žele prikazati i mjeriti. Naponi koji se prikazuju i mjere mogu biti naponi koje generiše generator funkcija na svom izlazu ili neka elektronska pločica. Izbor nekog od ulaznih signala, čime se omogućava ili onemogućava njegov prikaz na ekranu, vrši se pomoću dugmadi (slika 6.15, oznaka 2). Odabrani signal se, radi lakšeg očitavanja željenih veličina, može pomjerati po horizontalnoj (X) i vertikalnoj (Y) osi pomoću odgovarajućih rotirajućih dugmadi (slika 6.15, oznaka 3). Takođe, moguće je podešavati vremenske baze (veličine horizontalnog podioka – slika 6.15, oznaka 4) i naponske rezolucije (veličine vertikalnog podioka – slika 6.15, oznaka 5). Na taj se način veličina jednog podioka po horizontalnoj ili vertikalnoj osi prilagođava signalu koji se mjeri,



Slika 6.15. Osciloskop

čime se omogućava optimalno očitavanje. Promjena vremenske baze i naponske rezolucije mijenja signal po periodi i po veličini amplitude. Obično se prije mjerenja signal raširi da bi se prikazao na cijelom ekranu i da bi se lakše očitale mjerene veličine. Naponski signal je drugačiji za naše oko ali je njegova amplituda, perioda i frekvencija konstantna jer se mijenja veličina vertikalnog i horizontalnog podioka na ekranu osciloskopa. Ako se signal koji se prikazuje kreće, za njegovo zaustavljanje koristi se dugme *RUN/STOP* (slika 6.15, oznaka 6). Prilikom prikazivanja na ekranu, signali su označeni različitim bojama, pa je prikaz na ekranu veoma pregledan. Na dnu ekrana je moguće očitati koliko iznosi veličina horizontalnog podioka (slika 6.15, oznaka 7), kao i vertikalnog podioka posebno za kanale 1 i 2 pomoću kojih se mjere i upoređuju dva ulazna signala (slika 6.15, oznaka 8).

## 6.1.5. Analizator spektra



Slika 6.16. Analizator spektra

Analiza signala je proces obrade i prikaza signala u domenu učestanosti, razlaganjem signala na frekvencijske komponente, uz prikaz odgovarajućih vrijednosti amplitude. Prikaz spektra u frekvencijskom domenu daje, između ostalog, mogućnost mjerenja nekih komponenti signala kao što su: frekvencija, snaga, širina frekvencijskog opsega itd. Da bi se signali mogli prikazivati u frekvencijskom domenu, koriste se analizatori spektra.

Analizatori spektra (slika 6.16) koriste se u telekomunikacijama za prikaz spektra ulaznog signala, odnosno za prikazivanje ulaznog signala u domenu učestanosti. Na prikazu se daje raspored različitih komponenti spektra kao širina opsega učestanosti. Najbitnije karakteristike analizatora spektra su: frekvencijski opseg, frekvencijska tačnost, amplitudska tačnost, rezolucija, osjetljivost, izobličenja, dinamičko područje i fazni šum.

Uključivanje odnosno isključivanje uređaja obavlja se pritiskom dugmeta označenog na slici 6.17.



## NAPOMENA

U praksi se, kada se ne zahtijevaju visoke performanse, koriste ručni analizatori spektra (slika 6.18). Oni imaju primjenu u terenskom radu s bežičnim sistemima i radio-signalima kojima je potrebno nadziranje spektra, bez potrebe za naročito preciznim podacima.



Slika 6.18. Ručni analizator spektra

Slika 6.17. Glavne komande na analizatoru spektra

Na svakom analizatoru spektra postoji jedan ulazni priključak (port), obično označen kao RF input (*radiofrequency*). Taj priključak služi da se na njega dovede signal kojem se analizira spektar. U laboratorijskim uslovima taj signal najčešće se dobija iz generatora signala.

Jednu od ključnih postavki na analizatoru spektra predstavlja podešavanje frekvencijskog opsega u kojem se analizira spektar. Na svakom analizatoru spektra postoji dugme označeno kao FREQUENCY. Pritiskom na to dugme, dobija se *meni* sa mogućnošću određivanja donje i gornje granične frekvencije u okviru kojih se analizira signal.

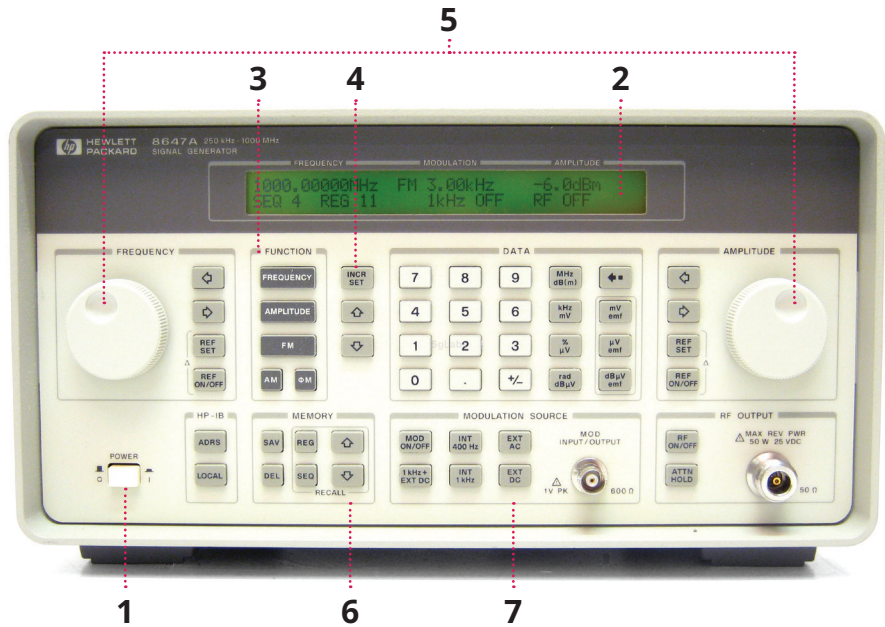
Sljedeća važna funkcija jeste određivanje prikaza amplituda spektralnih komponenti koja se podešava pritiskom dugmeta AMPLITUDE. I u ovom slučaju se otvara *meni* u kojem se može odabrati da li će prikaz biti u linearnim ili logaritamskim vrijednostima.

Na svakom analizatoru spektra postoje i dugmad sa brojevima, kao i klizač. Uloga tih dugmadi jeste unos cifara (digitalno) za određene vrijednosti. Na primjer, ako se klikne na dugme FREQUENCY, dobiće se *meni* za podešavanje graničnih vrijednosti frekvencija, pri čemu se te vrijednosti unose pomoću ovih dugmadi ili putem klizača (analogno).

## 6.1.6. Signal-generator

Generatori signala su elektronski uređaji koji generišu signale sa zadatim vrijednostima amplitude, frekvencije i talasnog oblika. Generatori signala pokrivaju velike opsege učestanosti, reda veličine od Hz do GHz.

Na slici 6.19 prikazan je signal-generator HP 8647A, i njegove osnovne funkcije.



### NAPOMENA

Nije naodmet da ovdje ukažemo na razliku između instrumenata sličnih funkcija – generatora signala i generatora funkcija. Generator signala može generisati jednostavne talasne oblike (obično samo sinusni oblik), iako neki mogu generisati signale pravougaonog ili testerastog oblika. Takođe omogućuju različite vrste modulacije. Generator funkcija može da generiše sve oblike koje generiše generator signala; ali za razliku od njega, može generisati i znatno složenije talasne oblike, koji se u nekim slučajevima mogu kreirati i učitati u generator pomoću softvera.

Slika 6.19. Signal-generator sa prikazom osnovnih funkcija

Dugme ON/OFF ili POWER (1) služi za uključenje/isključenje signal-generatora. Na displeju instrumenta (2) očitavaju se vrijednosti učestanosti i amplitude generisanog signala, kao i tip modulacije. Funkcionalna dugmad FUNCTION (3) služe za unos vrijednosti pri podešavanju učestanosti, amplitude i nivoa modulacije izlaznog signala. Dugme za inkrementaciju INCR SET (4) sa kursorima  $\uparrow$  i  $\downarrow$  omogućuje mijenjanje izgleda izlaznog RF signala inkrementacijom njegovih vrijednosti. Memorijska dugmad (6) omogućuju da se memorišu podešene vrijednosti na instrumentu i da se po želji aktiviraju. Izvori modulacije (7) uključuju/isključuju izvor modulacije. Na primjer, pritisni 1 KHZ + EXT DC da bi se u istom trenutku frekvencijski modulisao RF signal sa internim (unutrašnjim) 1 kHz nosiocem i signalom iz eksternog (spoljašnjeg) izvora.



## 6.2. Softveri za simulaciju rada telekomunikacionih uređaja

Razumijevanje rada nekog telekomunikacionog sklopa ili nekog telekomunikacionog procesa često zavisi od toga da li ste bili u prilici da praktično utvrdite kako oni funkcionišu u praksi. To je moguće u laboratoriji, kroz neposredan rad sa laboratorijskim uređajima i samim sklopovima, ali to najčešće zahtijeva znatna materijalna sredstva. U nedostatku tih sredstava dobra alternativa jeste rad sa softverima za simulaciju rada telekomunikacionih sklopova. Postoji velik broj tih softvera, više ili manje kvalitetnih, besplatnih ili licenciranih.

Za realizaciju praktičnih vježbi iz modula Elektronske komunikacije II – zbog svoje jednostavne upotrebe i visokih performansi – preporučuje se softver MATLAB (*Matrix Laboratory*). Njegove mogućnosti su višestruko veće od onog što će kroz ove vježbe biti zahtijevano. Pored softvera MATLAB, za realizaciju praktičnih vježbi mogu se koristiti softveri *Fourier Series Applet*, *Digital Filters* i drugi.

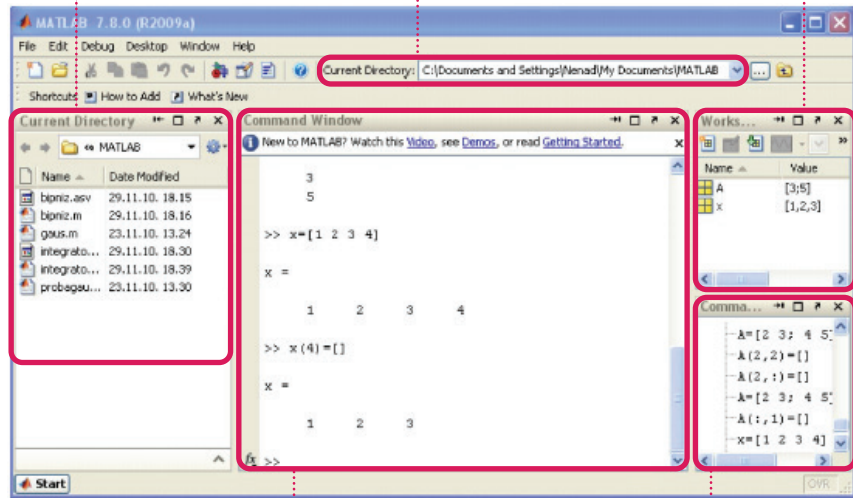
MATLAB je viši programski jezik namijenjen obradi podataka u formi matrica i brojeva. Zahvaljujući širokom spektru ugrađenih funkcija, kojima se efikasno dolazi do numeričkih rješenja mogućnošću razvoja algoritama i programiranja, MATLAB se nametnuo kao nezamjenjiv alat za rješavanje problema u gotovo svim oblastima inženjerske prakse. Programski paket MATLAB omogućava interaktivan i programski rad. U interaktivnom radu naredbe se zadaju u promptu komandnog prozora MATLAB i interpretiraju odmah po zadavanju. Programi se takođe pozivaju iz komandnog prompta navođenjem imena i interpretiraju liniju po liniju. Najjednostavniji tip MATLAB programa naziva se *skript*. Skript je fajl sa ekstenzijom *.m*, koji sadrži više linija MATLAB komandi i funkcijskih poziva. Skript se pokreće unošenjem njegovog imena u komandnoj liniji. Ovaj alat se naziva *toolbox*. Pomoću softvera MATLAB mogu se riješiti problemi iz različitih oblasti obrade signala u telekomunikacionim sistemima, kao što je digitalna modulacija signala, što će biti tema laboratorijskih vježbi broj 6 u nastavku.

Nove verzije softvera MATLAB imaju moderniji grafički korisnički interfejs i širi spektar funkcija, ali je osnovna funkcionalnost programa ostala ista. Na slici 6.20 prikazano je radno okruženje softvera MATLAB.

**Current Direcorry**  
Prikaz svih fajlova u  
tekućem direktorijumu

**Current Direcorry**  
Tekući direktorijum

**Workspace**  
Radni prostor prikazuje  
promjenljive koje su  
prethodno kreirane



**Command Window**  
Ovdje se unose Matlab  
komande i funkcija

**Command History**  
Prozor u kome su  
prikazane prethodno  
korištene komande  
i funkcije

**Slika 6.20.** Radno okruženje softvera MATLAB

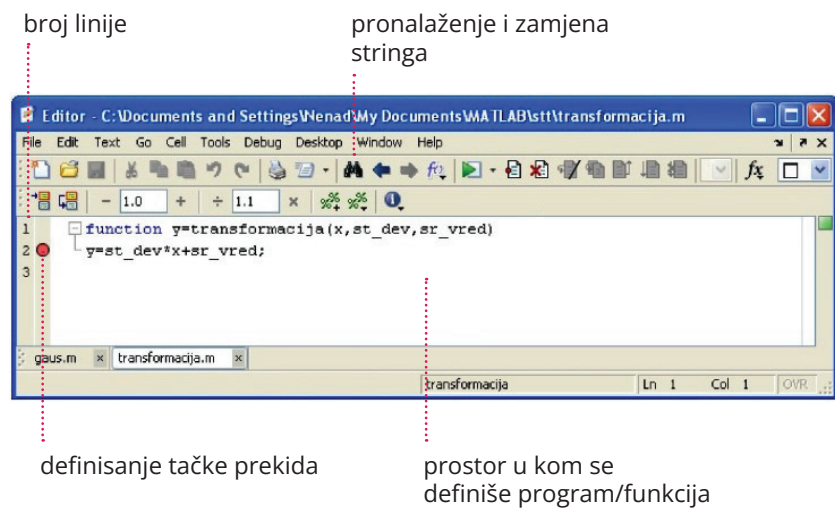
*Command window* – komandni prozor je dio radnog okruženja namijenjen za interaktivno izvršavanje komandi i pozivanje MATLAB funkcija. Nakon MATLAB prompta (>>) može se unijeti proizvoljan izraz, komanda ili ime funkcije (m-fajla). Pritiskom na taster *Enter*, komanda se izvršava i rezultat ispisuje u komadnom prozoru. U radno okruženje, poslije komandnog prompta, može se unijeti kopiranjem i grupa naredbi koje rješavaju složenu funkciju. Naredbe se izvršavaju pritiskom na taster *Enter* nakon kopiranja, kada se zahtijeva unošenje ulaznih promjenljivih. Može se unositi jedan broj (npr. frekvencija signala nosioca) ili više brojeva (npr. digitalni modulišući signal), kao niz binarnih 1 i 0. Poslije unošenja ulaznih vrijednosti, pritiskom na tipku *Enter*, rezultati se ispisuju u komandnom prozoru. Rezultat izvršenja naredbi može biti, na primjer, modulisani signal u vremenskom ili frekvencijskom domenu.

*Command History* – linije unijete u komandni prozor memorišu se u prozoru *command history*. Preko ovog prozora mogu se pogledati prethodno korištene funkcije, kopirati ili izvršavati selektovane linije.

*Workspace* – radni prostor softvera MATLAB koji sadrži skup promjenljivih koje su generisane tokom rada i sačuvane u memoriji. Promjenljive iz ovog prostora mogu se editovati dvostrukim klikom. Korišćenjem funkcija, pokretanjem MATLAB fajlova, dodaju se nove promjenljive u ovom prostoru.

*Current Directory* – prozor tekućeg direktorijuma, koji omogućava manipulaciju fajlovima u okviru MATLAB okruženja. Tekući direktorijum predstavlja standardnu putanju pri snimanju i učitavanju fajlova iz MATLAB okruženja. Proširenje funkcionalnosti softvera MATLAB može se ostvariti pisanjem korisničkih programa i funkcija (m-fajlova). Za kreiranje i korekcije m-fajlova može se koristiti komanda *Editor/Debugger*, koja je dio MATLAB okruženja, ili bilo koji drugi tekst editor (npr. Notepad).

On sadrži funkcije za editovanje teksta i ispravljanje grešaka u programu, koje su neizbježne u radu sa m-fajlovima. Na slici 6.21 prikazan je prozor za editovanje programa MATLAB (m-fajla).



**Slika 6.21.** Prozor za editovanje m-fajla

Osim osnovnih funkcija, MATLAB raspolaže dodatnim paketima alata za rješavanje posebnih klasa problema. *Control Systems Toolbox* obezbeđuje funkcije koje su od posebne koristi za analizu i sintezu sistema automatskog upravljanja, ali imaju svoju primjenu i u drugim oblastima tehnike, pa i u telekomunikacijama. Uz pomoć *SIMULINK Toolbox*, ili samo *Simulink* alata, moguće je vršiti simulaciju različitih sistema i sklopova. Uz to *Simulink* obezbeđuje i grafičko okruženje, u kome se skicira blok-dijagram sistema i vrši njegova simulacija.

## 6.3. Uputstvo za korišćenje QR koda

QR kôd (engl. *quick response code*) matrični je kôd za brzo dekodiranje odgovarajućih sadržaja. Iza QR koda, mogu se nalaziti: podaci za kontakt, neki tekst, multimedijalni sadržaj, SMS poruka, URL adresa, email, broj telefona i sl. Na slici 6.22 prikazan je QR kôd za jednu praktičnu vježbu.



**Slika 6.22.** QR kôd za praktičnu vježbu

QR kôd se može napraviti pomoću velikog broja besplatnih QR kôd generatora. Korisnici koji imaju pametni (smart) telefon sa kamerom i odgovarajući softver (QR Scanner), mogu da skeniraju sliku QR koda, čime mogu da pregledaju ili preuzmu odgovarajući sadržaj iz oblaka (engl. *cloud*) koji odgovara skeniranom QR kodu. Skeniranjem zadatog QR koda imaš mogućnost da u elektronskoj formi preuzmeš kompletne radne zadatke koji su potrebni za realizaciju praktičnih vježbi.



## 6.4. Laboratorijske vježbe

### 6.4.1. Uvodna laboratorijska vježba

Snimanje talasnog oblika na ekranu osciloskopa korišćenjem generatora funkcija

Laboratorijska vježba povezana je sa svim poglavljima u kojima se koriste osciloskop i generator funkcija.

#### Cilj vježbe:

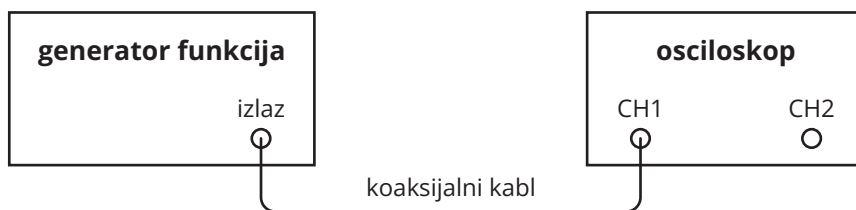
Sticanje vještina u radu sa ova dva uređaja

#### Potrebni laboratorijski uređaji:

osciloskop i generator funkcija

#### Praktični dio vježbe:

1. Uključi generator funkcija i generiši sinusni signal učestanosti 50 Hz i amplitude 5 V (10  $V_{p-p}$ ). Uključi osciloskop i poveži izlaz generatora funkcija sa jednim od kanala na osciloskopu (slika 6.23). Najprije izvrši podešavanje vremenske baze i naponske rezolucije tako da su prilagođeni za optimalan prikaz generisanog signala. Uz odgovarajuće pozicioniranje signala, izmjeri njegovu amplitudu i periodu, a zatim izračunaj njegovu učestanost. Isti postupak sprovedi i za signale pravougaonog i testerastog oblika sa nekim drugim vrijednostima učestanosti i amplitude. Rezultate mjerenja upiši u tabelu 1.



Slika 6.23. Blok-šema za povezivanje generatora funkcija i osciloskopa

Tabela 1.

Talasni oblik	VOLTS/DIV	DIV	Amplituda (V)	TIME/DIV	DIV	Perioda (T)	Učestanost (f)
Sinusoida							
Pravougaoni							
Testerasti							

2. Pomoću jednog generatora funkcija generiši sinusni signal učestanosti 100 kHz i amplitude 5 V. Zatim pomoću drugog generatora generiši testerasti napon učestanosti 20 kHz i amplitude 20 V. Generisane signale dovedi na ulaze osciloskopa i prikaži istovremeno na ekranu. Izmjeri amplitudu i periodu ovih signala i rezultate mjerenja upiši u tabelu 2. Izračunaj frekvencije ova dva signala, kao i međusobni odnos između amplituda, perioda i frekvencija ova dva signala. Analiziraj rezultate mjerenja.

Tabela 2.

Talasni oblik	VOLTS/DIV	DIV	Amplituda (V)	TIME/DIV	DIV	Perioda (T)	Učestanost (f)
Sinusoida							
Testerasti							



## 6.4.2. Laboratorijska vježba br. 1

Snimanje talasnog oblika i spektra AM-2BO signala korišćenjem laboratorijskih uređaja

Laboratorijska vježba je povezana sa 1. poglavljem – Amplitudska modulacija signala.

### Cilj vježbe:

Snimiti talasni oblik i spektar AM-2BO signala primjenom laboratorijskih uređaja

### Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente:

Emona Telecoms-Trainer ETT-101, osciloskop, analizator spektra, generator funkcija i pomoćna oprema – kablovi, konektori

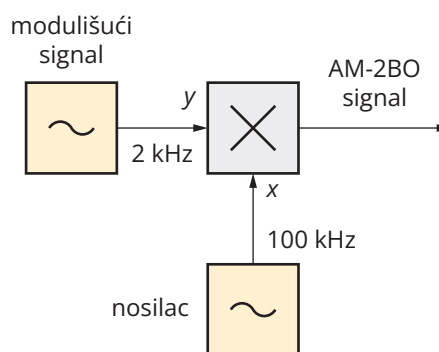
### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Kako se dobija amplitudski modulirani signal? Šta su AM-2BO signali? Koje su karakteristike spektra AM-2BO signala?

### Praktični dio vježbe:

#### 1. Snimanje talasnog oblika AM-2BO signala

AM-2BO signal dobija se u postupku AM-2BO modulacija, za šta se koristi sistem čija je blok-šema prikazana na slici 6.24.



Slika 6.24. Blok-šema sistema za dobijanje AM-2BO signala

Da bi se dobio amplitudski modulirani signal, u blok za množenje sa generatora funkcija na ETT dovedi sinusni signali od 100 kHz (nosilac) i od 2 kHz (modulišući signal). Poveži aparaturu kao na slici 6.25. Na osciloskopu se dobija prikaz talasnog oblika AM-2BO signala.



Slika 6.25. Povezivanje opreme za generisanje AM signala

2. Na milimetarski papir precrtaj vremenski oblik modulišućeg signala.
3. Na milimetarski papir precrtaj vremenski oblik AM-2BO signala.
4. **Snimanje spektra AM-2BO signala:**  
Da bi snimio/snimila spektar AM-2BO signala, poveži izlazni signal iz EMONA uređaja na analizator spektra, umjesto na osciloskop.
5. Na milimetarski papir precrtaj spektar modulišućeg signala.
6. Na milimetarski papir precrtaj spektar AM-2BO signala.

## Rezime vježbe

U ovoj laboratorijskoj vježbi pomoću laboratorijske opreme generisani su AM-2BO signali. Jasno je naznačeno koji se blokovi ETT koriste u te svrhe. Na osciloskopu, odnosno analizatoru spektra, snimljeni su vremenski oblici AM-2BO signala, kao i njihov spektar. Korišćenjem generatora funkcija, generisan je sinusni modulišućí signal i signal nosilac od 2 kHz i 100 kHz, te snimljeni odgovarajući vremenski oblici i oblici spektra AM-2BO signala pomoću osciloskopa i analizatora spektra.





### 6.4.3. Laboratorijska vježba br. 2

Snimanje talasnog oblika i spektra KAM signala korišćenjem laboratorijskih uređaja

Laboratorijska vježba povezana je sa 1. poglavljem – Amplitudska modulacija signala.

#### Cilj vježbe:

Snimiti talasni oblik i spektar KAM signala primjenom laboratorijskih uređaja

#### Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente:

Emona Telecoms-Trainer ETT-101, osciloskop, analizator spektra, generator funkcija i pomoćna oprema – kablovi, konektori

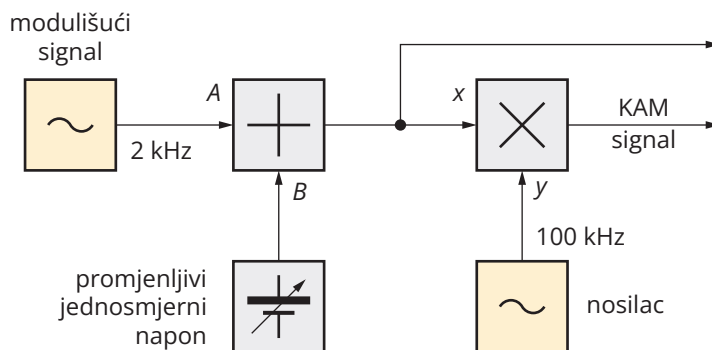
#### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Kako se dobija amplitudski modulirani signal? Šta je KAM signal? Koje su karakteristike spektra KAM signala?

#### Praktični dio vježbe:

##### 1. Snimanje talasnog oblika KAM signala

Sistem za dobijanje KAM signala predstavljen je na slici 6.26 blok-šemom.



Slika 6.26. Principna blok-šema generisanja KAM signala

KAM signal dobija se tako što se jednosmjerni DC napon u bloku za sabiranje na ETT, dodaje sinusoidalnom signalu frekvencije 2 kHz. Zatim se taj izlaz vodi na blok za množenje, sa sinusoidalnim signalom od 100 kHz, koji predstavlja nosilac. Poveži aparaturu kao na slici 6.27. Na osciloskopu dobija se prikaz talasnog oblika KAM signala.



Slika 6.27. Povezivanje opreme za generisanje KAM signala

2. Na milimetarski papir precrtaj vremenski oblik KAM signala.

### 3. Snimanje spektra KAM signala

Da bi snimio/snimila spektar KAM signala, potrebno je da povežeš izlazni signal iz uređaja ETT-101, na analizator spektra, umjesto na osciloskop.

4. Na milimetarski papir precrtaj spektar KAM signala.

### 5. Snimanje talasnih oblika i spektra KAM signala za različite oblike i učestanosti modulišućeg signala

U prethodnim primjerima kao modulišući signal koristio/koristila si sinusni signal od 2 kHz, generisan u uređaju ETT-101. Za snimanje talasnih oblika modulišućih signala različitih frekvencija i oblika, potrebno je da koristiš generator funkcija.

**Uputstvo za rad:** Na generatoru funkcija odaberi sinusni ton učestanosti  $f_m = 10$  kHz, amplitude  $2V_{pp}$  (razlika između minimalne i maksimalne vrijednosti sinusoide) i dovedi ga na ulaz KAM modulatora, umjesto sinusoide od 2 kHz. KAM signal dovedi na ulaz analizatora spektra. Na analizatoru spektra pomoću menija *Frequency Channel* podesi start frekvenciju na 50 kHz i stop frekvenciju na 150 kHz.

6. Na milimetarski papir precrtaj vremenski oblik i spektar KAM signala. Uporedi ih sa prethodno dobijenim rezultatima.

## Rezime vježbe

U ovoj laboratorijskoj vježbi, pomoću laboratorijske opreme generisani su KAM signali. Jasno je naznačeno koji se blokovi ETT koriste u te svrhe. Na osciloskopu, odnosno analizatoru spektra, snimljeni su vremenski oblici KAM signala, kao i njihov spektar. Korišćenjem generatora funkcija generisan je sinusni modulišući signal od 2 kHz i 10 kHz, te snimljeni odgovarajući vremenski oblici i oblici spektra KAM signala pomoću osciloskopa i analizatora spektra.



## 6.4.4. Laboratorijska vježba br. 3

Snimanje talasnog oblika i spektra frekvencijski modulisanog signala pomoću laboratorijskih uređaja

Laboratorijska vježba povezana je sa 2. poglavljem – Ugaone modulacije.

### Cilj vježbe:

Generisati FM signal, te snimiti njegov talasni oblik i spektar primjenom laboratorijskih uređaja

### Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente:

Emona Telecoms-Trainer ETT-101, osciloskop, analizator spektra, generator funkcija i pomoćna oprema – kablovi, konektori

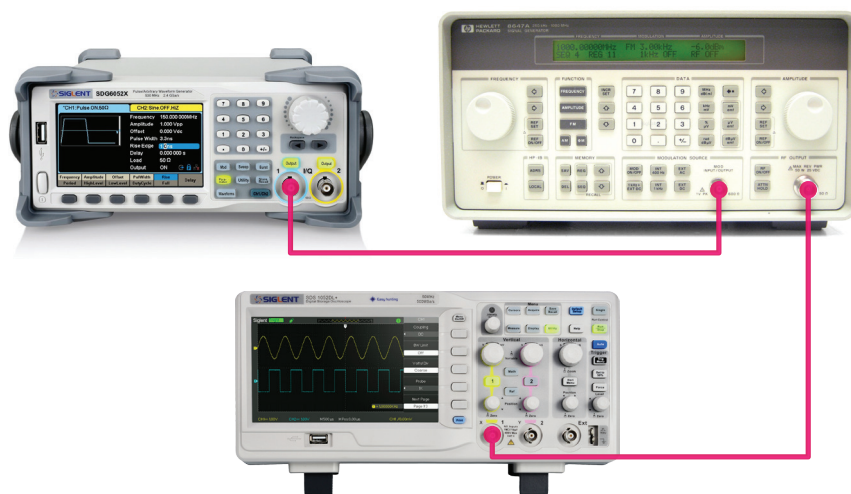
### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Kako se dobija frekvencijski modulisani signal? Koje su karakteristike spektra FM signala?

### Praktični dio vježbe:

#### 1. Snimanje talasnog oblika FM signala

Pomoću generatora funkcija generiši periodičnu povorku pravougaonih impulsa periode 1 ms. Poveži izlazni signal iz generatora funkcija na NF ulaz signal-generatora (*Mod input/output*) onako kako je prikazano na slici 6.28. Izaberi eksterni modulišući signal za signal-generator, tj. opciju *EXT AC*. Parametre signal-generatora podеси tako da je učestanost nosioca 250 kHz, maksimalna devijacija učestanosti 100 kHz i nivo izlaznog signala 10 dBm. Na RF izlaz signal-generatora postavi N konektor sa prelazom na BNC. Koaksijalnim kablom od 50  $\Omega$  završenim BNC konektorima, poveži izlaz generatora sa ulazom osciloskopa.



Slika 6.28. Šema povezivanja uređaja

2. Na milimetarski papir precrtaj vremenski oblik frekvencijski modulisanog signala.

### 3. Snimanje spektra FM signala

Ponovi postupak iz prethodne vježbe. Umjesto na ulaz osciloskopa, signal iz signal-generatora poveži na ulaz analizatora spektra.

#### Radni zadatak.

### 4. Na milimetarski papir precrtaj spektar FM signala.

Da bi uočio/uočila kako promjena maksimalne devijacije učestanosti mijenja spektar frekvencijski modulisanog signala, na signal-generatoru mijenjaj dati parametar.

Da bi uočio/uočila kako promjena maksimalne učestanosti modulišućeg signala mijenja spektar frekvencijski modulisanog signala, na generatoru funkcija mijenjaj dati parametar.

Generiši prvo sinusni modulišući signal učestanosti 50 kHz generatorom funkcija. Parametre signal-generatora podesi tako da je učestanost nosioca 500 kHz, maksimalna devijacija učestanosti 50 kHz i nivo izlaznog signala 10 dBm. RF izlaz signal-generatora poveži 50  $\Omega$  koaksijalnim kablom, umjesto na ulaz osciloskopa na ulaz analizatora spektra na koji je prethodno postavljen N konektor. Na analizatoru spektra pomoću menija *Frequency Channel* podesi početnu (start) frekvenciju na 300 kHz i stop frekvenciju na 700 kHz, te pomoću menija *Amplitude Y scale* odaberi linearnu skalu.

**Zadatak (a)** Na milimetarski papir precrtaj spektar tako dobijenog FM signala.

**Zadatak (b)** Ako se maksimalna devijacija učestanosti FM signala smanji pet puta, a maksimalna učestanost modulišućeg signala ostane nepromijenjena, skiciraj spektar FM signala i uporedi ga sa rezultatom iz prethodnog zadatka. Tako dobijeni spektar FM signala precrtaj na milimetarski papir.

**Zadatak (c)** Ako maksimalna devijacija učestanosti FM signala ostane 50 kHz, a maksimalna učestanost modulišućeg signala je 92,5 kHz, skiciraj spektar FM signala i uporedi ga sa prethodnim rezultatima. Tako dobijeni spektar FM signala precrtaj na milimetarski papir.

---

#### Rezime vježbe

U ovoj laboratorijskoj vježbi, pomoću odgovarajuće opreme generisani su FM signali. Jasno je naznačeno koja se oprema koristi, kao i način njenog korišćenja. Za obavljanje procesa frekvencijske modulacije korišćen je signal-generator. Snimljeni su vremenski oblici FM signala, kao i njihov spektar. Uočeno je kako spektar FM signala zavisi od maksimalne devijacije učestanosti nosioca, odnosno od maksimalne učestanosti u spektru modulišućeg signala.



## 6.4.5. Laboratorijska vježba br. 4

Snimanje talasnih oblika impulsno modulisanih signala pomoću laboratorijskih uređaja

Laboratorijska vježba povezana je sa 3. poglavljem – Impulsne modulacije.

### Cilj vježbe:

Generisati IKM signal, te snimiti njegov talasni oblik primjenom laboratorijskih uređaja

### Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente:

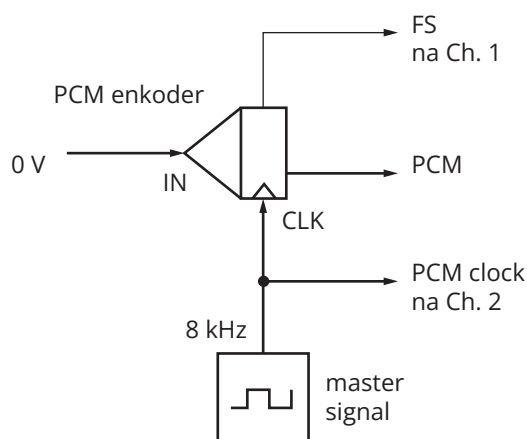
Emona Telecoms-Trainer ETT101, osciloskop, pomoćna oprema – kablovi, konektori

### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Šta je impulsna modulacija? Kako glasi teorema odabiranja? Kako se dobija IKM signal?

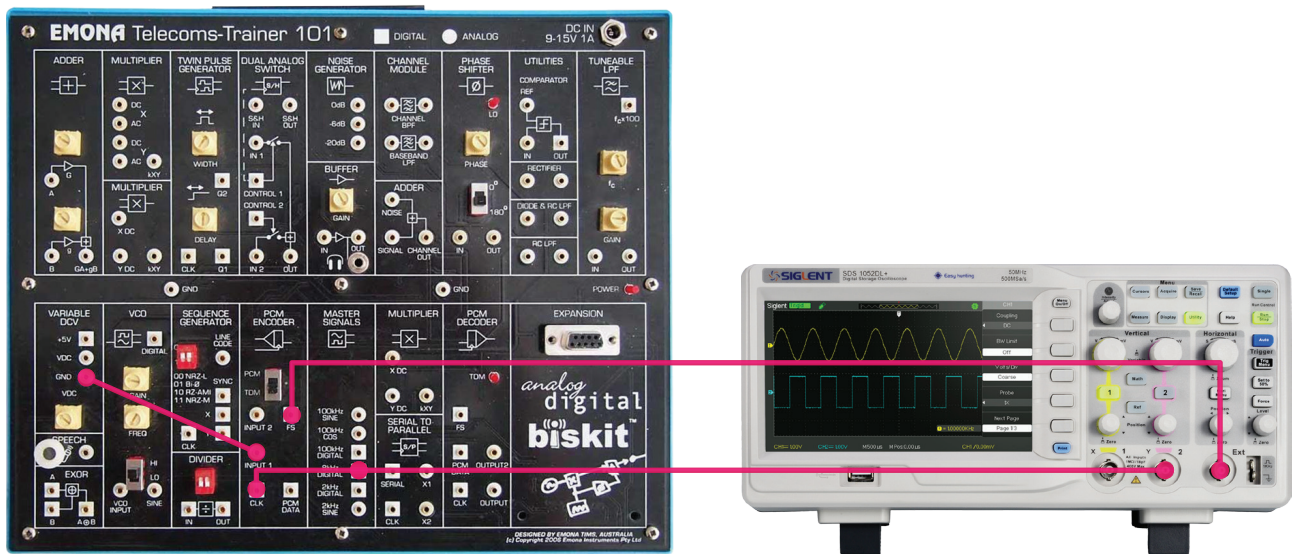
### Praktični dio vježbe:

Da bi se provjerile karakteristike IKM sistema, prvo treba utvrditi broj bita kojim se kodira svaki odbirak. Jedan od praktičnih načina za obavljanje ovog zadatka jeste poređenje trajanja jednog okvira (FS – *frame synchronization*) i trajanja jednog bita (PCM clock) pri učestanosti odabiranja od 8 kHz. Blok-šema kojom se to ostvaruje data je na slici 6.29.



Slika 6.29. Blok-šema za utvrđivanje broja bita

Radi realizacije prethodne šeme, poveži aparaturu prema slici 6.30.



Slika 6.30. Povezivanje ETT i osciloskopa

Upoređivanjem vremenskih oblika FS i PCM clock signala, dobija se da je broj bita kojim se kodira svaki odbirak signala jednak \_\_\_\_\_, odnosno da je broj kvantizacionih nivoa \_\_\_\_\_.

**Zadatak (a)** Izmijeni prethodnu šemu tako da se kanalom dva osciloskopa snima vremenski oblik IKM signala. Podеси vremensku bazu osciloskopa tako da se uoče najmanje dva okvira IKM signala. Nactaj vremenske oblike FS i PCM signala na milimetarskom papiru.

Sekvenca kojom se kodira jednosmjerni napon od 0 V jeste \_\_\_\_\_.

**Zadatak (b)** Nacrtaj na milimetarskom papiru vremenski oblik IKM signala ako je modulišući signal sinusoida učestanosti  $f_m = 2$  kHz. Učestanost clock signala iznosi 8 kHz. Uređaje poveži kao na slici 6.31.



Slika 6.31. Šema povezivanja ETT i osciloskopa

## Rezime vježbe

U ovoj laboratorijskoj vježbi, pomoću odgovarajuće aparature generisani su IKM signali. Jasno je naznačeno koja se aparatura koristi, kao i način njenog povezivanja. Snimljeni su vremenski oblici IKM signala.



## 6.4.6. Laboratorijska vježba br. 5

### Snimanje dijagrama oka pomoću laboratorijskih uređaja

Laboratorijska vježba povezana je sa 4. poglavljem – Prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti.

#### Cilj vježbe:

Snimiti dijagram oka pomoću laboratorijskih uređaja

#### Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente:

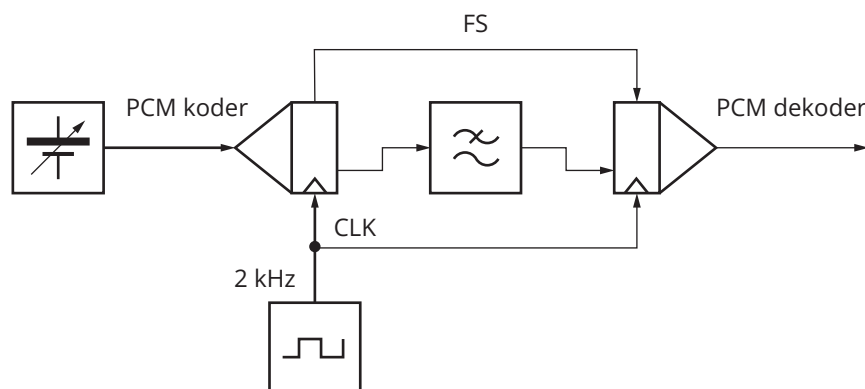
Emona Telecoms-Trainer ETT101, osciloskop, generator funkcija i pomoćna oprema – kablovi, konektori

#### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Kako linija veze utiče na prenos digitalnih signala? Šta je intersimbolska interferencija? Šta je dijagram oka? Navedi veličine na dijagramu oka na osnovu kojih se može procijeniti veličina intersimbolske interferencije.

#### Praktični dio vježbe:

Uticaj linije veze na prenos digitalnih signala može se modelovati filtrom propusnikom niskih učestanosti. Za analizu izobličenja digitalnog signala koje unosi linija veze može se koristiti šema prikazana na slici 6.32.



Slika 6.32. Blok-šema

Ekvivalentna šema povezivanja na ETT uređaju, koja odgovara prethodnoj slici, prikazana je na slici 6.33.





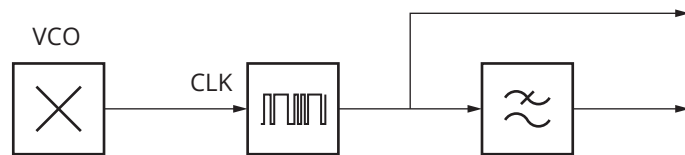
Slika 6.33. Šema povezivanja uređaja ETT-101 za vježbu br. 5

1. Postavi potencioetre na filteru propusniku niskih učestanosti i na VCO bloku u položaj ekvivalentan položaju 9 h na časovniku. Vremensku bazu osciloskopa postavi na 1 ms i snimi vremenske oblike IKM signala i signala na izlazu iz filtra. Skiciraj vremenski oblik signala na milimetarskom papiru.
2. Smanjij graničnu učestanost filtra propusnika niskih učestanosti i komentariši kako to utiče na oblik signala na ulazu u PCM dekodier.
3. Vrti graničnu učestanost filtra na vrijednost kao u tački 1. Osciloskopom snimi vremenske oblike modulišućeg i demodulisanog signala. Mijenjaj vrijednosti napona modulišućeg signala i posmatraj da li demodulisani signal u potpunosti prati te promjene. Zatim smanjij graničnu učestanost filtra propusnika niskih učestanosti, te objasni zbog čega se razlikuju modulišućii demodulisani signal.
4. Ograničen opseg medijuma za prenos utiče na pojavu izobličenja digitalnog signala, što je pokazano u prethodnom dijelu vježbe. Radi analize nivoa izobličenja koje unosi linija veze, može se posmatrati dijagram oka. U tu svrhu ostvari povezivanje prema slici 6.34.



Slika 6.34. Povezivanje na uređaj ETT-101 za vježbu broj 5

- Postavi prekidač na VCO bloku u LO poziciju, a potencijetre na VCO i filtru propusniku niskih učestanosti u položaj koji je ekvivalentan položaju 12 h na časovniku. Vremensku bazu osciloscopa podesi na 100  $\mu$ s.  
Na slici 6.35 data je ekvivalentna blok-šema.



Slika 6.35. Ekvivalentna blok-šema

- Ne koristeći opciju stopiranja snimljenog signala (run/stop) na osciloskopu, skiciraj vremenski oblik signala na izlazu iz filtra propusnika niskih učestanosti. Uoči jedan od dobijenih dijagrama oka i na njemu označi otvor oka, maržu za šum i izobličenje amplitude odbiraka.
- Precrtaj dijagram oka na milimetarski papir.
- Povećaj brzinu prenosa digitalnog signala i posmatraj promjene na dijagramu oka. Kako povećanje brzine prenosa utiče na veličinu otvora oka i na maržu za šum?
- Smanji brzinu prenosa digitalnog signala na nivo kao u tački 1, te zatim smanjij graničnu učestanost filtra propusnika niskih učestanosti. Komentariši promjene koje se javljaju na dijagramu oka.

## Rezime vježbe

U ovoj laboratorijskoj vježbi, pomoću aparature su snimani dijagrami oka. Objasnjen je eksperimentalni postupak. Jasno je naznačeno koja se aparatura koristi, kao i načini njenog povezivanja. Pokazano je kako propusni opseg linije veze utiče na interferenciju, odnosno na izgled dijagrama oka.



## 6.4.7. Laboratorijska vježba br. 6

Snimanje talasnog oblika i spektra ASK digitalno moduliranih signala upotrebom softvera za simulaciju

Laboratorijska vježba povezana je sa 5. poglavljem – Prenos digitalnog signala moduliranim nosiocem.

### Cilj vježbe:

Snimiti talasni oblik i spektar ASK moduliranog signala upotrebom softvera za simulaciju


### Potreban softver:

Vježba se realizuje u programskom paketu MATLAB R215a (ova laboratorijska vježba, kao i slijedeće vježbe, mogu se realizovati u starijoj ili novijoj verziji softvera MATLAB).

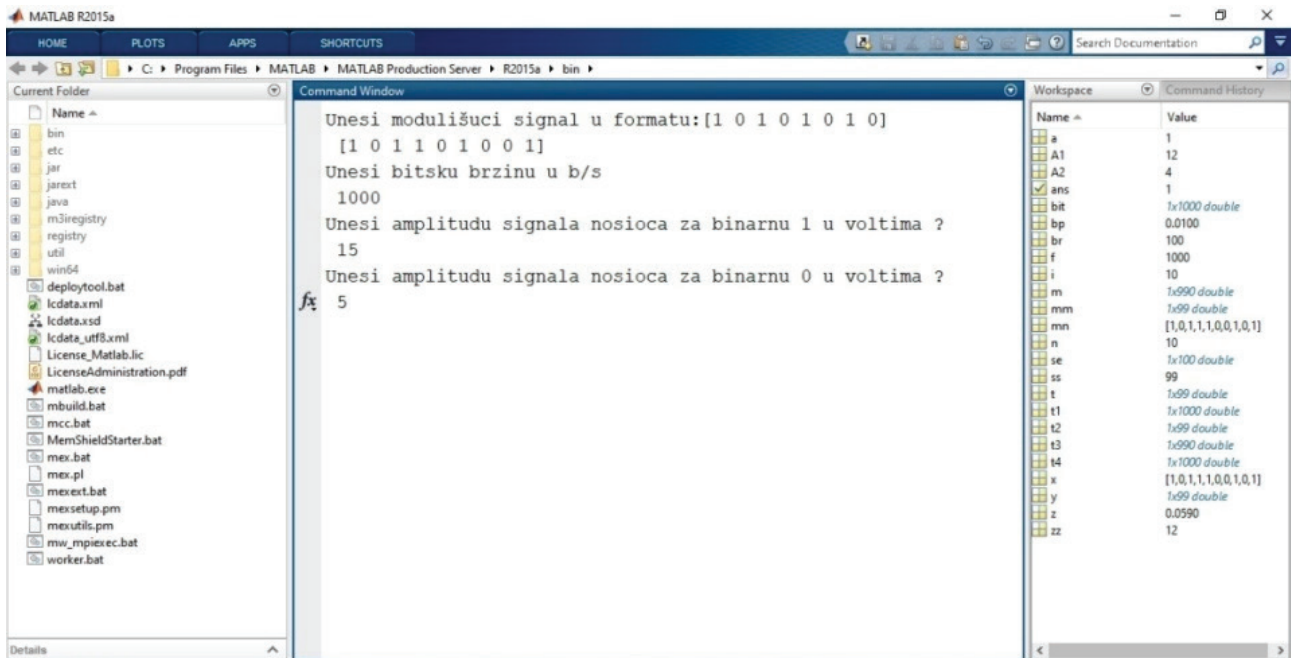
### Pitanja za ponavljanje usvojenog sadržaja:

Šta su digitalno modulirani signali? Navedi vrste digitalno moduliranih signala, te najvažnije karakteristike ASK moduliranog signala.

### Praktični dio vježbe:

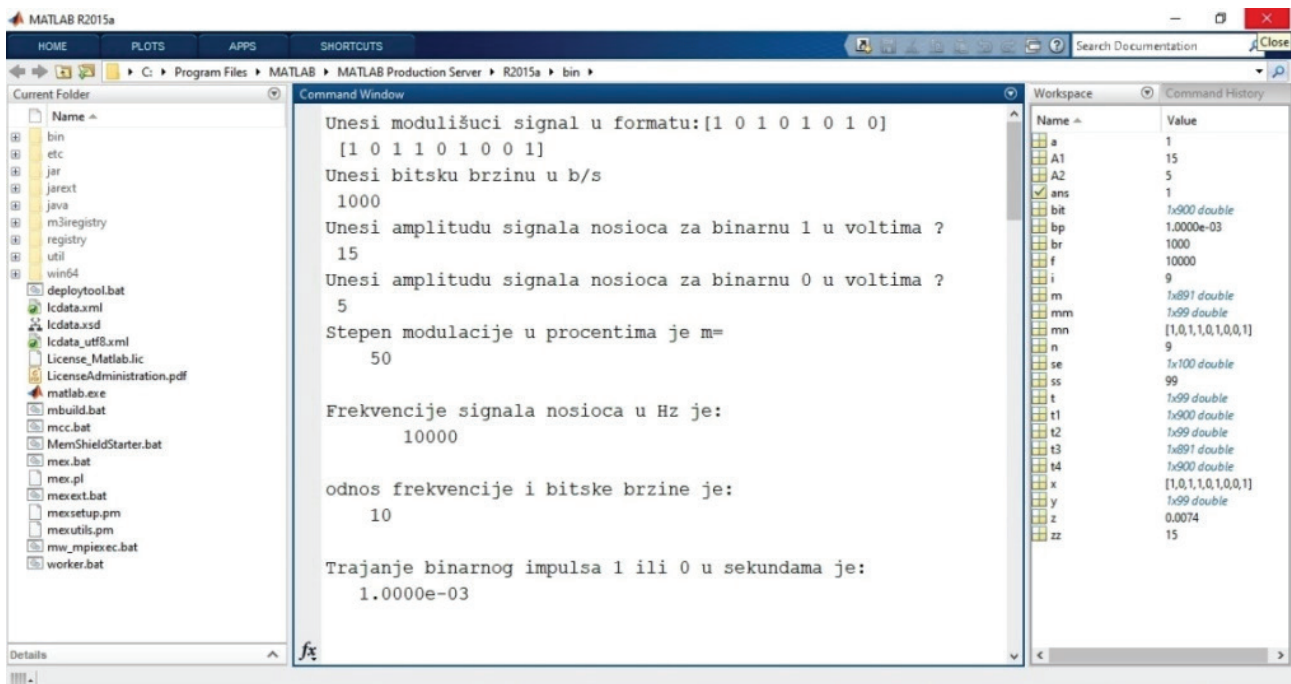
Provjeri da li postoji instalacija na računaru u folderu c:\MATLAB R215a. Ako postoji instalacija programa na računaru, pokreni program, klikom na ikonicu . Program koji je potreban za realizaciju vježbe nalazi se u Prilozima. Pošto si pokrenuo/pokrenula program, možeš pokrenuti vježbu.

1. Kopiraj program ASK iz Priloga\_1 (str. 213) u komandnu liniju i potvrdi unos pritiskom na *Enter*.
2. U glavnom prozoru MATLAB-a će se pojaviti interakcija koja zahtijeva unošenje modulišućeg signala, bitske brzine u b/s, amplitude signala nosioca za binarnu 1 u voltima i amplitude signala nosioca za binarnu 0 u voltima. U uglastu zagradu unesi proizvoljan niz bitova kojima se moduliše signal: [1 0 1 1 0 1 0 0 1] i potvrdi unos pritiskom na *Enter*. Unesi dalje redom bitsku brzinu 1 000 b/s kao i dvije amplitude u voltima 15 V i 5 V (slika 6.36)



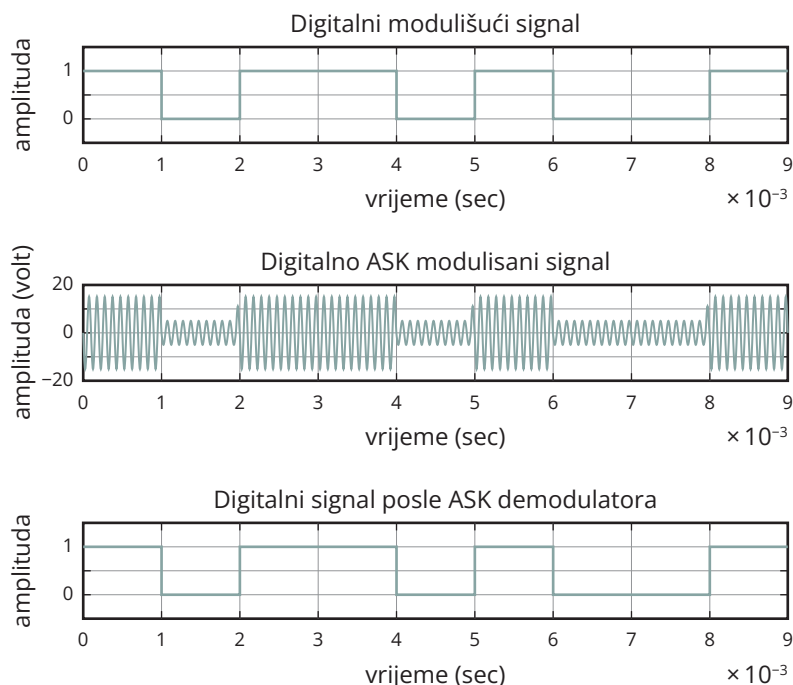
Slika 6.36. Izgled prozora po unošenju stepena modulacije i niza bitova

Pojaviće se slika sa parametrima koje smo unijeli u program. U glavnom prozoru će biti ispisani podaci o stepenu modulacije, frekvenciji signala nosioca kao i odnos frekvencije signala nosioca i bitske brzine. Izgled prozora prikazan je na slici 6.37.



Slika 6.37. Izgled prozora sa vrijednostima izračunatih parametara

Na ekranu će biti prikazana tri dijagrama: binarni modulišući signal, signal nosilac i prijemni digitalni signal, poslije ASK demodulatora (slika 6.38)



**Slika 6.38.** Vremenski oblici signala sa zadatim parametrima, poslije izvršenja programa

3. Unesi novu bitsku brzinu od 5 000 b/s, novi modulirani signal: [1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1], kao i amplitude 12 V i 4 V. Na milimetarskom papiru skiciraj oblik modulišućeg signala, signala nosioca kao i ASK modulirani signal za zadate parametre. Uporedi dobijeni ASK modulirani signal po periodu, stepenu modulacije i frekvenciji u odnosu na prethodno dobijeni ASK signal, kada je bitska brzina bila 5 puta manja. Uočite vezu između bitske brzine i trajanja binarne 0 ili 1, kao i između bitske brzine i frekvencije signala nosioca. Izvedi zaključak o načinu realizacije ASK modulacije digitalnog signala.
4. Nacrtaj na milimetarskom papiru spektar ASK moduliranog signala i uočite značajne spektralne komponente.

### Rezime vježbe

U ovoj vježbi su snimani talasni oblici i spektar ASK moduliranog signala, upotrebom MATLAB softvera za simulaciju. Simulacija je izvršena kopiranjem gotovih programa iz priloga.



## 6.4.8. Laboratorijska vježba br. 7

Snimanje talasnog oblika i spektra FSK digitalno moduliranih signala, upotrebom softvera za simulaciju

Laboratorijska vježba je povezana sa 5. poglavljem – Prenos digitalnog signala moduliranim nosiocem.

---

### Cilj vježbe:

Snimiti talasni oblik i spektar FSK moduliranog signala, upotrebom softvera za simulaciju

---

### Potreban softver:

Vježba se realizuje u programskom paketu MATLAB R215a.


---

### Zadatak za ponavljanje usvojenog sadržaja:

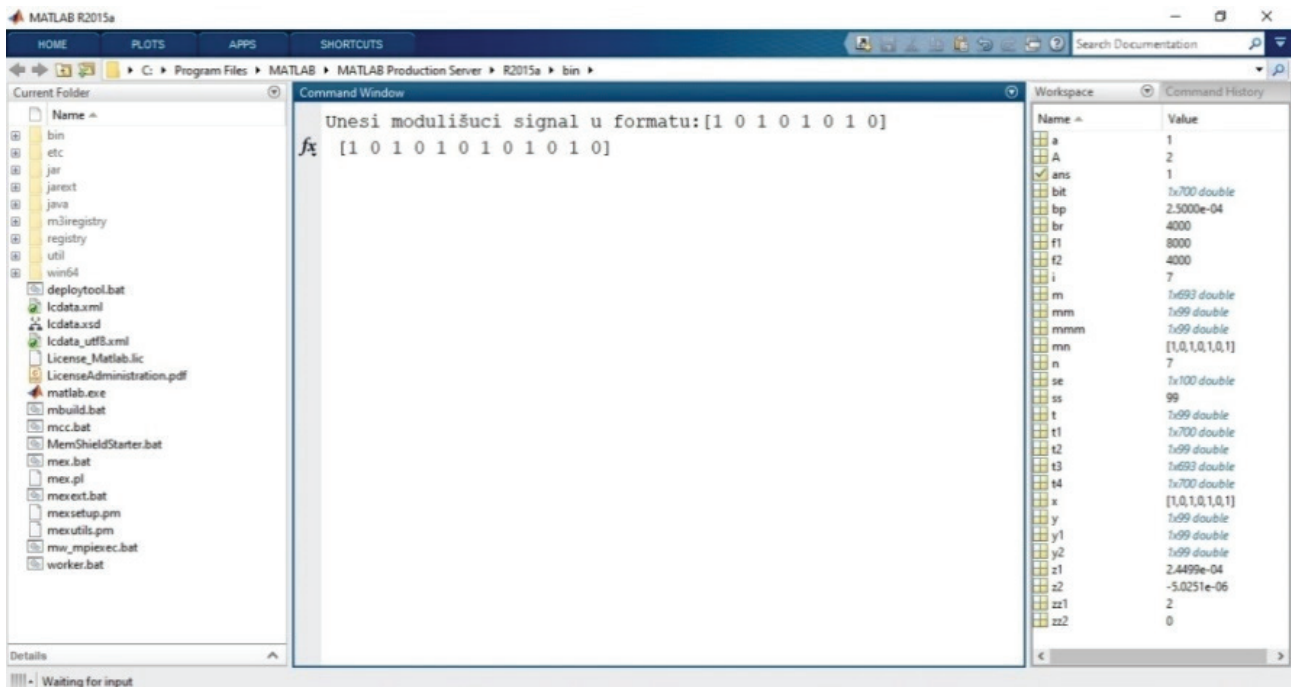
Opiši osnovne karakteristike i način dobijanja FSK digitalno moduliranog signala.

---

### Praktični dio vježbe:

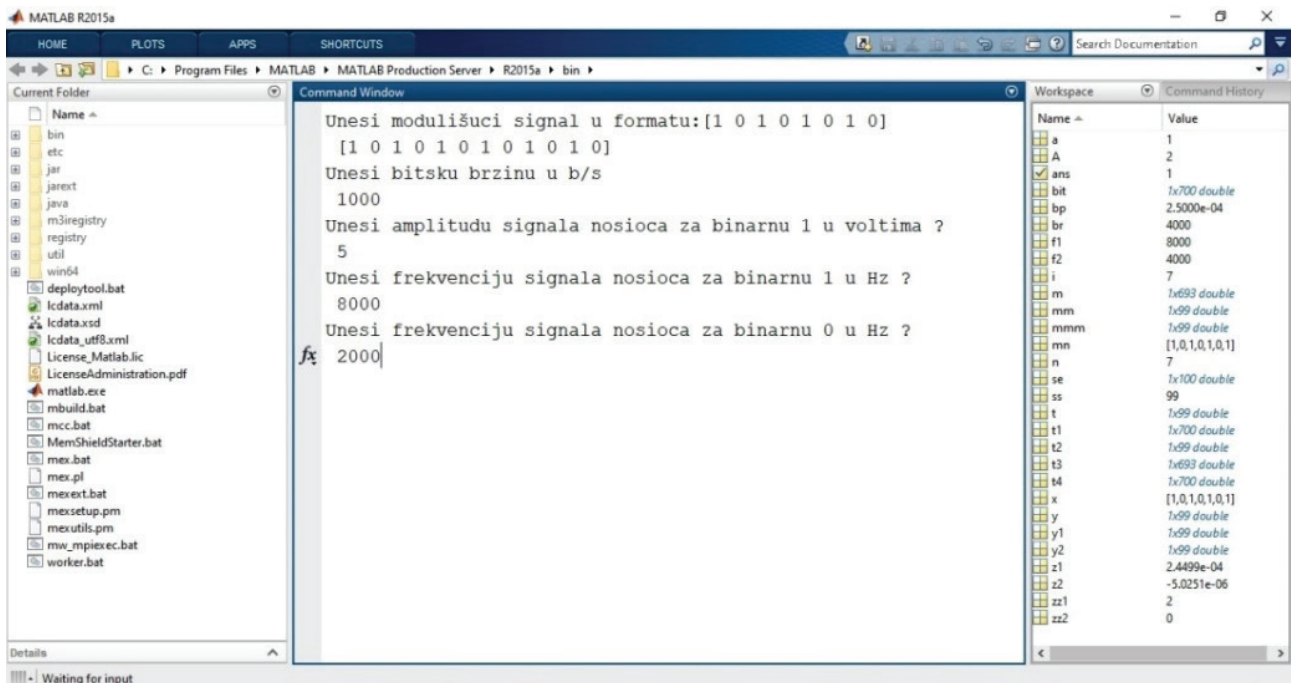
Provjeri da li postoji instalacija na računaru u folderu c:\ MATLAB R215a. Ako postoji instalacija programa na računaru, pokreni program, klikom na ikonicu . Program koji je potreban za realizaciju vježbe nalazi se u Prilozima. Pošto si pokrenuo/pokrenula program, možeš pokrenuti vježbu.

1. Kopiraj program FSK iz Priloga\_2 u komandnu liniju i potvrdi unos pritiskom na *Enter*.
2. U glavnom prozoru će se pojaviti interakcija koja zahtijeva unos niza bitova, kojima se vrši modulacija. Unesi niz [1 0 1 0 1 0 1 0 1 0]. Pritiskom na *Enter*, unos se potvrđuje (slika 6.39).



Slika 6.39. Izgled prozora pri unosu niza bitova

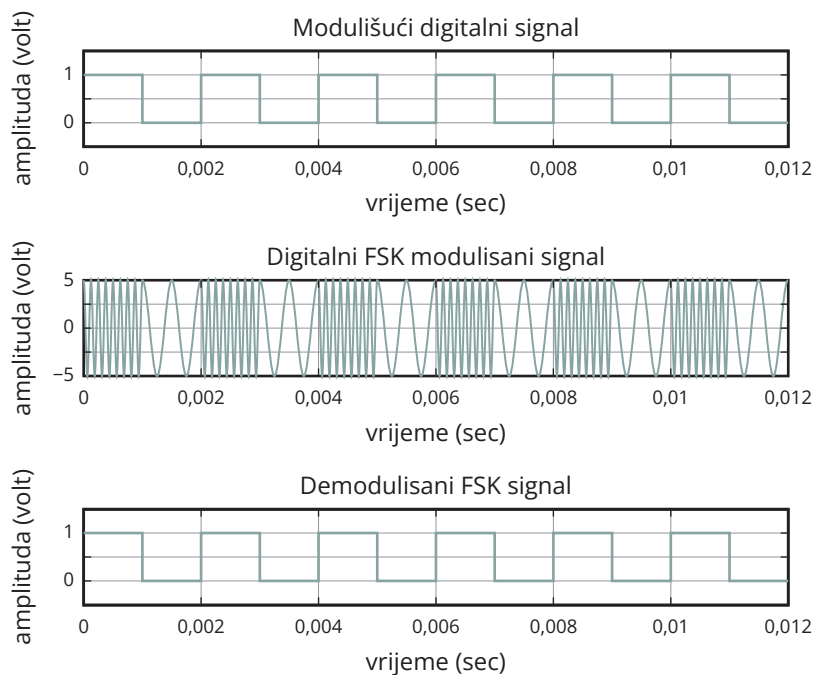
- Unesi bitsku brzinu od 1 000 b/s, učestanost nosioca logičke nule 2 000 Hz i logičke jedinice 8 000 Hz, i svaku pojedinačno potvrdi pritiskom na *Enter* (slika 6.40).



Slika 6.40. Izgled prozora pri unosu učestanosti nosilaca logičke nule i jedinice



Unošenjem ovih učestanosti dobiće se prikaz signala modulisanog na ovaj način (slika 6.41).



Slika 6.41. FSK signal

4. Unesi novu bitsku brzinu od 2 000 b/s, učestanost nosioca logičke nule 4 000 Hz i logičke jedinice 16 000 Hz, i svaku pojedinačno potvrdi pritiskom na *Enter* novi modulisani signal: [1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1], kao i amplitudu od 4 V. Na milimetarskom papiru skiciraj oblik modulišućeg signala, signala nosioca kao i FSK modulisanog signala za zadate parametre. Uporedi dobijeni FSK modulisani signal po periodu i frekvenciji u odnosu na prethodno dobijeni FSK signal kada je bitska brzina bila dva puta manja. Izvedi zaključak o načinu realizacije FSK modulacije digitalnog signala.
5. Nacrtaj na milimetarskom papiru spektar FSK modulisanog signala i uočči značajne spektralne komponente.

### Rezime vježbe

U ovoj vježbi su snimani talasni oblici i spektar FSK modulisanog signala, upotrebom MATLAB softvera za simulaciju. Simulacija je izvršena kopiranjem gotovih programa iz priloga.



## 6.4.9. Laboratorijska vježba br. 8

Snimanje talasnog oblika i spektra PSK digitalno moduliranih signala, upotrebom softvera za simulaciju

Laboratorijska vježba je povezana sa 5. poglavljem – Prenos digitalnog signala moduliranim nosiocem.

---

### Cilj vježbe:

Snimiti talasni oblik i spektar PSK moduliranog signala, upotrebom softvera za simulaciju

---

### Potreban softver:

Vježba se realizuje u programskom paketu MATLAB R215a.


---

### Pitanja i zadaci za ponavljanje usvojenog sadržaja:

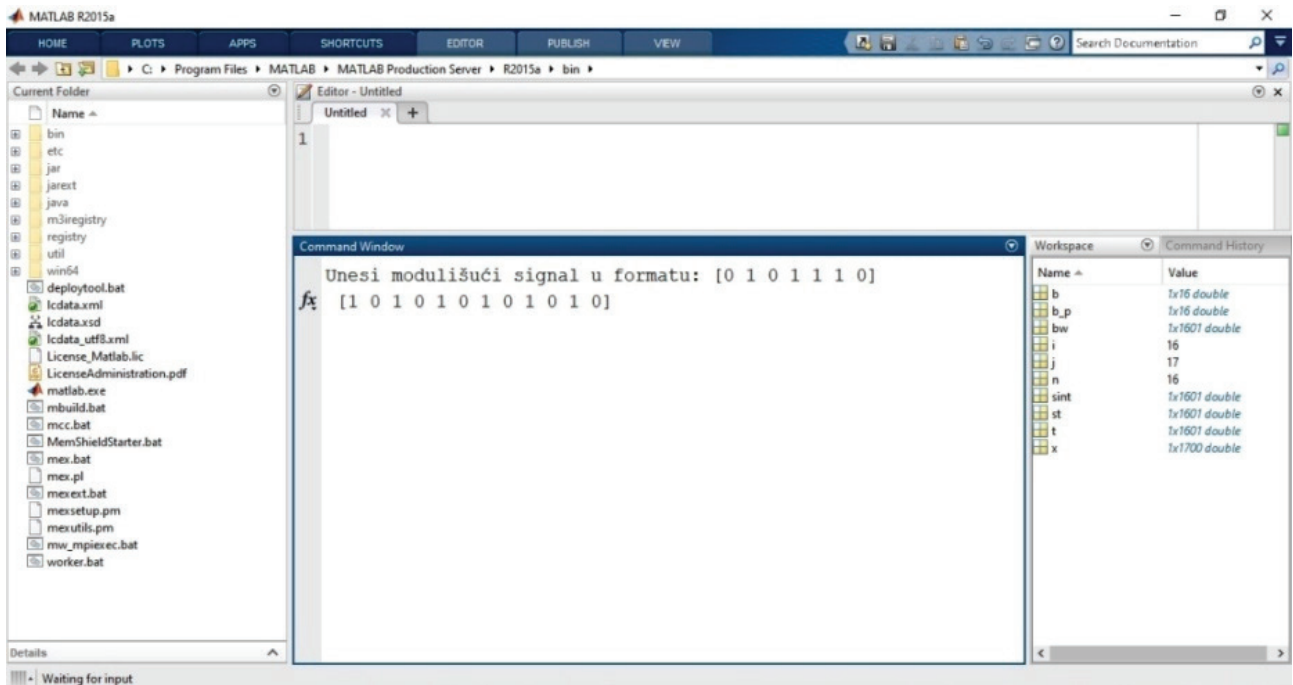
Opiši osnovne karakteristike i način dobijanja PSK digitalno moduliranog signala. Šta je bitska brzina? Šta je brzina signalizacije? U čemu se ove brzine izražavaju i kada su iste?

---

### Praktični dio vježbe:

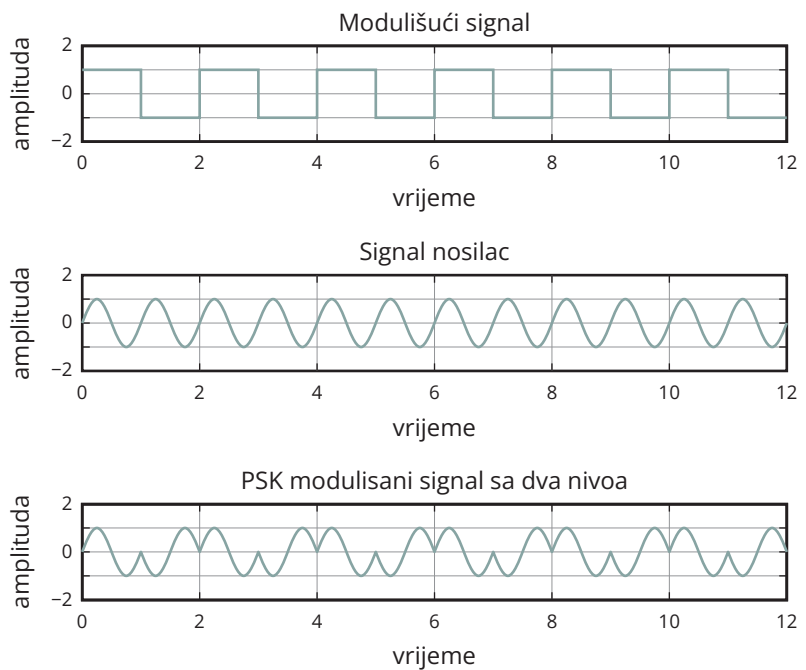
Provjeri da li postoji instalacija na računaru u folderu c:\ MATLAB R215a. Ako postoji instalacija programa na računaru, pokreni je klikom na ikonicu . Programi koji su potrebni za realizaciju vježbe, nalaze se u Prilozima za laboratorijske vježbe. Pošto si pokrenuo/pokrenula program, možeš pokrenuti vježbu.

1. Kopiraj program PSK iz Priloga\_3 u komandnu liniju i potvrdi unos pritiskom na *Enter*.
2. U glavnom prozoru pojaviće se interakcija koja zahtijeva unos niza bitova kojima se vrši modulacija. Unesi niz [1 0 1 0 1 0 1 0 1 0]. Pritiskom na *Enter*, unos se potvrđuje (slika 6.42).



Slika 6.42. Izgled glavnog prozora pri unosu niza bitova

Pojaviće se slika modulišućeg signala koji smo unijeli, signala nosioca i PSK modulisanog signala (slika 6.43).



Slika 6.43. Modulišući zadati signal, signal nosilac i PSK modulisani signal

## NAPOMENA

U prethodnim vježbama moguće je, koristeći alat za zumiranje (lupa sa plusom), uvećati djelove slika koje daje MATLAB. Ovu opciju iskoristi da detaljnije pregledaš djelove spektra signala oko nosećih učestanosti, kao i djelove talasnih oblika moduliranih signala radi uočavanja promjena faze.

3. Koji je odnos između bitske i signalizacione brzine u prethodnom slučaju? Sa koliko se bita koduje faza moduliranog signala? Nacrtaj konstalacioni dijagram za prethodni slučaj.
4. Nacrtaj na milimetarskom papiru izgled PSK moduliranog signala ako je bitska brzina dva puta veća od brzine u baudima. Sa koliko se bita koduje faza moduliranog signala u ovom slučaju? Nacrtaj konstalacioni dijagram za dobijeni PSK signal. Uporedi fazno modulirane digitalne signale u prethodna dva slučaja. Izvedi zaključak o načinu dobijanja PSK signala sa 1, 2, 4, 8 i više nivoa, kao i odnos bitske i signalizacione brzine u opštem slučaju.

## Rezime vježbe

U ovoj vježbi snimani su talasni oblici PSK moduliranog signala na osnovu zadatog digitalnog modulišućeg signala, upotrebom MATLAB softvera za simulaciju. Simulacija je izvršena kopiranjem gotovih programa iz priloga.



## 6.5. Prilozi za laboratorijske vježbe

### Prilog 1: ASK modulacija

```
%>>> MATLAB kod za binarnu ASK modulaciju i demodulaciju >>>%
clc;
clear all;
close all;
x = input('Unesi modulišuci signal u formatu:[1 0 1 0 1 0 1
0] \n '); % Unošenje modulišućeg signala
br = input('Unesi bitsku brzinu u b/s \n '); % Unošenje
bitske brzine u b/s
bp = 1 / br;

%XX Predstavljanje binarne informacije u digitalni signal XX%
bit = [];

for n = 1:1:length(x)

    if x(n) == 1;
        se = ones(1, 100);
    else x(n) == 0;
        se = zeros(1, 100);
    end

    bit = [bit se];
end

t1 = bp / 100:bp / 100:100 * length(x) * (bp / 100);
subplot(3, 1, 1);
plot(t1, bit, 'linewidth', 2.5); grid on;
axis([0 bp * length(x) - .5 1.5]);
ylabel('Amplituda(volt)');
xlabel('vrijeme(sec)');
title('Digitalni modulišuci signal');

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX Binarna-ASK modulacija XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX%
A1 = input('Unesi amplitudu signala nosioca za binarnu 1 u
voltima ? \n ');
A2 = input('Unesi amplitudu signala nosioca za binarnu 0 u
voltima ? \n ');
m = (A1 - A2) / (A1 + A2) * 100; %XXXX Defnicija stepena
modulacije m ASK signala XXXX%
disp('Stepen modulacije u procentima je m=');
disp(m);
f = br * 10;
```

```

disp('Frekvencije signala nosioca u Hz je:');
disp(f);
disp('odnos frekvencije i bitske brzine je:');
disp(f / br);
disp('Trajanje binarnog impulsa 1 ili 0 u sekundama je:');
disp(bp);
t2 = bp / 99:bp / 99:bp;
ss = length(t2);
m = [];

for (i = 1:1:length(x))

    if (x(i) == 1)
        y = A1 * cos(2 * pi * f * t2);
    else
        y = A2 * cos(2 * pi * f * t2);
    end

    m = [m y];
end

t3 = bp / 99:bp / 99:bp * length(x);
subplot(3, 1, 2);
plot(t3, m);
xlabel('vrijeme(sec)');
ylabel('Amplituda(volt)');
title('Digitalno ASK modulirani signal');

%XXXXXXXXXX Binary ASK demodulator XXXXXXXXXXXX%
mn = [];

for n = ss:ss:length(m)
    t = bp / 99:bp / 99:bp;
    y = cos(2 * pi * f * t); % signal nosilac
    mm = y .* m((n - (ss - 1)):n);
    t4 = bp / 99:bp / 99:bp;
    z = trapz(t4, mm) % integracija
    zz = round((2 * z / bp))

    if (zz > 7.5) % logički nivo = (A1+A2)/2
        a = 1;
    else
        a = 0;
    end

    mn = [mn a];
end

disp(' Binarni signal u prijemniku:');
disp(mn);

```

```

%XXXX Prijemni digitalni signal posle ASK demodulatora XXXX%
%a ASKdemodulacija XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX%
bit = [];

for n = 1:length(mn);

    if mn(n) == 1;
        se = ones(1, 100);
    else mn(n) == 0;
        se = zeros(1, 100);
    end

    bit = [bit se];
end

t4 = bp / 100:bp / 100:100 * length(mn) * (bp / 100);
subplot(3, 1, 3)
plot(t4, bit, 'LineWidth', 2.5); grid on;
axis([0 bp * length(mn) - .5 1.5]);
ylabel('Amplituda(volt)');
xlabel('vrijeme(sec)');
title('Digitalni signal posle ASK demodulatora');

%>>>>>>>>>>>>>>> kraj programa >>>>>>>>>>>>>>>%

```

## Prilog 2: FSK modulacija

```
%>>>>>>>>>> MATLAB kod za FSK modulaciju signala >>>>>>>>>>%
clc;
clear all;
close all;
x = input('Unesi modulišuci signal u formatu:[1 0 1 0 1 0 1
0] \n '); % Unošenje modulišućeg signala
br = input('Unesi bitsku brzinu u b/s \n '); % Unošenje
bitske brzine u b/s
bp = 1 / br; % Trajanje binarne 1 ili 0

%XXX Pretvaranje binarne informacije u digitalni signal XXXX%
bit = [];

for n = 1:1:length(x)

    if x(n) == 1;
        se = ones(1, 100);
    else x(n) == 0;
        se = zeros(1, 100);
    end

    bit = [bit se];
end

t1 = bp / 100:bp / 100:100 * length(x) * (bp / 100);
subplot(3, 1, 1);
plot(t1, bit, 'linewidth', 2.5); grid on;
axis([0 bp * length(x) - .5 1.5]);
ylabel('Amplituda(volt)');
xlabel(' Vrijeme(sec)');
title('Modulišuci digitalni signal');

%XXXXXXXXXXXXX Binarna FSK modulacija XXXXXXXXXXXXXXXX%
A = input('Unesi amplitudu signala nosioca za binarnu 1 u
voltima ? \n ');
f1 = input('Unesi frekvenciju signala nosioca za binarnu 1 u
Hz ? \n '); %Unosi se prva frekvencija
f2 = input('Unesi frekvenciju signala nosioca za binarnu 0 u
Hz ? \n '); %Unosi se druga frekvencija
t2 = bp / 99:bp / 99:bp;
ss = length(t2);
m = [];

for (i = 1:1:length(x))

    if (x(i) == 1)
```



```

        y = A * cos(2 * pi * f1 * t2);
    else
        y = A * cos(2 * pi * f2 * t2);
    end

    m = [m y];
end

t3 = bp / 99:bp / 99:bp * length(x);
subplot(3, 1, 2);
plot(t3, m);
xlabel('Vrijeme(sec)');
ylabel('Amplituda(volt)');
title('Digitalni FSK modulirani signal');

%XXXXXXXXXXXXX Binarna FSK demodulacija XXXXXXXXXXXXXXXX%
mn = [];

for n = ss:ss:length(m)
    t = bp / 99:bp / 99:bp;
    y1 = cos(2 * pi * f1 * t); % signal nosilac za binarnu 1
    y2 = cos(2 * pi * f2 * t); % signal nosilac za binarnu 0
    mm = y1 .* m((n - (ss - 1)):n);
    mmm = y2 .* m((n - (ss - 1)):n);
    t4 = bp / 99:bp / 99:bp;
    z1 = trapz(t4, mm) % intregacija
    z2 = trapz(t4, mmm) % intregacija
    zz1 = round(2 * z1 / bp)
    zz2 = round(2 * z2 / bp)

    if (zz1 > A / 2) % logički nivo amplitude=(0+A)/2 or (A+0)/2
        a = 1;
    else (zz2 > A / 2)
        a = 0;
    end

    mn = [mn a];
end

%XXXXXXXXXXXXX Demodulacija FSK signala XXXXXXXXXXXXXXXX%
bit = [];

for n = 1:length(mn);

    if mn(n) == 1;
        se = ones(1, 100);
    else mn(n) == 0;
        se = zeros(1, 100);
    end
end

```





# 7. Rješenja zadataka

## 7.1. Amplitudska modulacija signala

1. Maksimalna amplituda KAM signala zavisi od amplitude signala nosioca  $U_0$  i amplitude modulišućeg signala  $U_m$ . Maksimalna i minimalna amplituda KAM signala dobija se korišćenjem izraza:

a)  $m = 0$

$$U_{max} = U_0 + m \cdot U_m = 1 \text{ V} + 0 \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$U_{min} = U_0 - m \cdot U_m = 1 \text{ V} - 0 \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

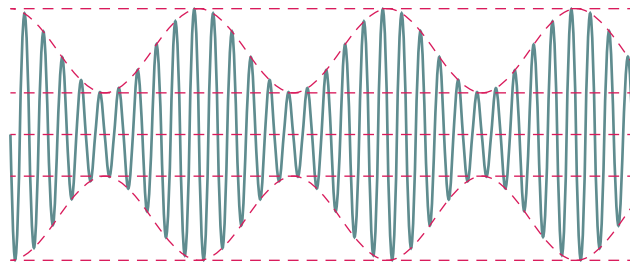
U ovom slučaju maksimalna i minimalna amplituda su iste, što znači da nema modulacije.

b)  $m = 0,50$

$$U_{max} = U_0 + m \cdot U_m = 1 \text{ V} + 0,50 \cdot 1 \text{ V} = 1,50 \text{ V}$$

$$U_{min} = U_0 - m \cdot U_m = 1 \text{ V} - 0,50 \cdot 1 \text{ V} = 0,50 \text{ V}$$

Oblik KAM signala za ovu vrijednost stepena modulacije prikazan je na slici:

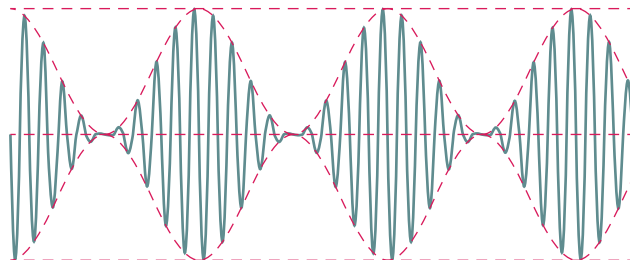


c)  $m = 1$

$$U_{max} = U_0 + m \cdot U_m = 1 \text{ V} + 1 \cdot 1 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$U_{min} = U_0 - m \cdot U_m = 1 \text{ V} - 1 \cdot 1 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

Oblik KAM signala za ovu vrijednost stepena modulacije prikazan je na slici:

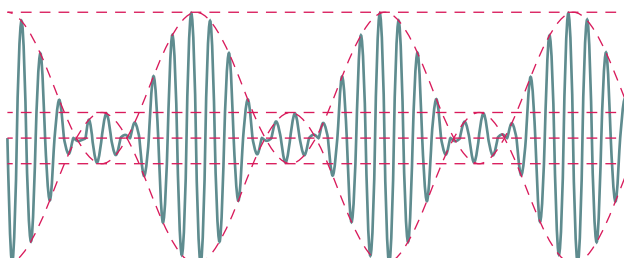


d)  $m = 1,25$

$$U_{max} = U_0 + m \cdot U_m = 1 \text{ V} + 1,25 \cdot 1 \text{ V} = 2,25 \text{ V}$$

$$U_{min} = U_0 - m \cdot U_m = 1 \text{ V} - 1,25 \cdot 1 \text{ V} = -0,25 \text{ V}$$

Oblik KAM signala za ovu vrijednost stepena modulacije prikazan je na slici:



U slučaju pod a) nema modulacije, jer je maksimalna i minimalna amplituda KAM signala jednaka amplitudi signala nosioca. U slučaju b) stepen modulacije je manji od 1, što znači da je to KAM modulacija koja se sreće u praksi. U slučaju pod c) stepen modulacije je najveći, jer je minimalna amplituda AM signala jednaka 0 V, dok je maksimalna amplituda dva puta veća od amplitude signala nosioca. U slučaju d) imamo premodulaciju signala, jer je anvelopa signala pala ispod 0.

2. U prvom slučaju imamo AM modulaciju sa dva bočna opsega, pa je širina spektra AM-2BO modulisanog signala dva puta veća od granične učestanosti govornog signala:

$$B_{AM-2BO} = 2 \cdot f_g = 2 \cdot 3,4 \text{ kHz} = 6,8 \text{ kHz.}$$

U drugom slučaju imamo AM-1BO modulaciju, pa je širina spektra AM-1BO modulisanog signala jednaka graničnoj učestanosti govornog signala:

$$B_{AM-1BO} = f_g = 3,4 \text{ kHz.}$$

3. Radio-stanica emituje signal u opsegu od 0 Hz do 5 kHz, što znači da je maksimalna učestanost modulišućeg signala  $f_g = 5 \text{ kHz}$ . Signal nosilac je na učestanosti  $f_0 = 980 \text{ kHz}$ . Gornji bočni opseg AM signala dobija se tako što se učestanosti signala nosioca dodaju granične učestanosti modulišućeg signala:

$$f_{GBO \min} = f_0 + 0 \text{ kHz} = 980 \text{ kHz,}$$

$$f_{GBO \max} = f_0 + 5 \text{ kHz} = 980 \text{ kHz} + 5 \text{ kHz} = 985 \text{ kHz.}$$

Donji bočni opseg AM signala dobija se tako što se od učestanosti signala nosioca oduzmu granične učestanosti modulišućeg signala:

$$f_{\text{DBO max}} = f_0 - 0 \text{ kHz} = 980 \text{ kHz},$$

$$f_{\text{DBO min}} = f_0 - 5 \text{ kHz} = 980 \text{ kHz} - 5 \text{ kHz} = 975 \text{ kHz}.$$

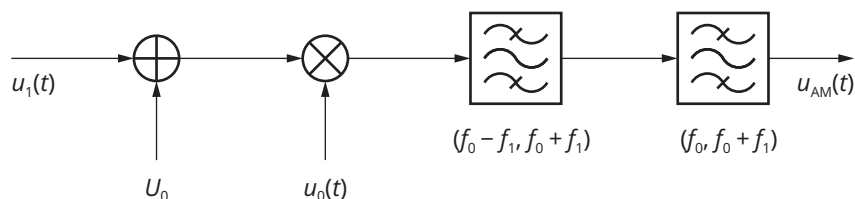
Ukupna širina propusnog opsega  $B_{\text{AM}}$  može se dobiti kao razlika između maksimalne učestanosti gornjeg bočnog opsega i minimalne učestanosti donjeg bočnog opsega:

$$B_{\text{AM}} = f_{\text{GBO max}} - f_{\text{DBO min}} = 985 \text{ kHz} - 975 \text{ kHz} = 10 \text{ kHz}.$$

Ukupnu širinu propusnog opsega možemo dobiti i kao dvostruku širinu učestanosti modulišućeg signala  $f_m$ :

$$B_{\text{AM}} = 2 \cdot f_m = 2 \cdot 5 \text{ kHz} = 10 \text{ kHz}.$$

4. Blok-šema AM modulatora sa signalom nosiocem i sinusnom funkcijom kao modulišućim signalom, mora imati sabirač i množač, filter propusnik opsega učestanosti koji izdvaja modulacione signale u oba bočna opsega, kao i filter propusnik opsega učestanosti koji izdvaja samo spektralne komponente u gornjem bočnom opsegu (slika):



**Slika uz zadatak 4.** AM modulator sa signalom nosiocem i prenosom u gornjem bočnom opsegu

Na donjoj slici prikazane su spektralne komponente na ulazu i izlazu AM modulatora, te filtra propusnika opsega učestanosti sa idealnom prenosnom karakteristikom, gdje su:

$f_g$  – frekvencija modulišućeg sinusnog signala  $u_1(t)$ ,

$f_0$  – frekvencija signala nosioca  $u_0(t)$ ,

$U_0$  – amplituda signala nosioca,

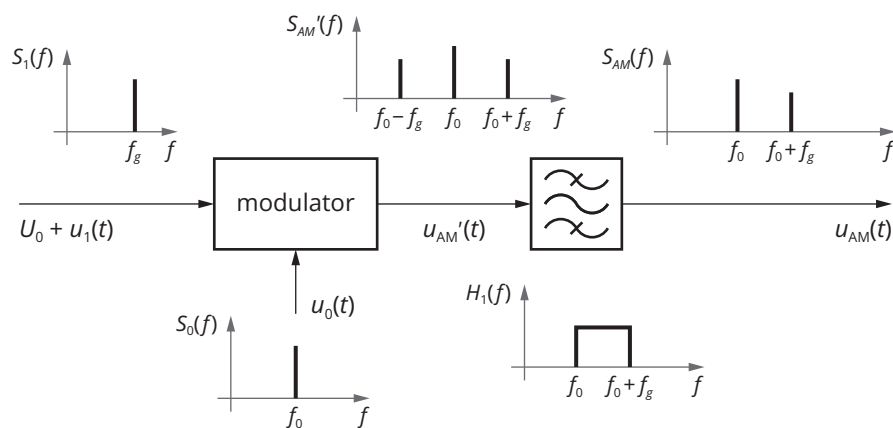
$S_1(f)$  – spektar modulišućeg sinusnog signala,

$S_0(f)$  – spektar signala nosioca,

$S_{\text{AM}}'(f)$  – spektar AM signala na izlazu modulatora,

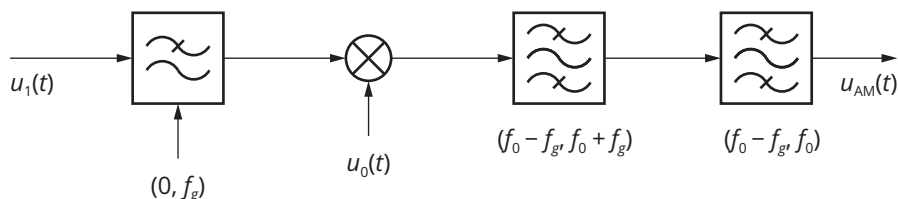
$S_{\text{AM}}(f)$  – spektar AM signala na izlazu pojasno-propusnog filtra i

$H_1(f)$  – idealna prenosna karakteristika pojasno-propusnog filtra.



**Slika uz zadatak 4.** Spektar signala AM-2BO modulatora sa signalom nosiocem i modulacijom u gornjem bočnom opsegu

5. AM modulator sa istisnutim signalom nosiocem i složenim modulišućim signalom na ulazu, ima množač i dva filtra propusnika opsega učestanosti, od kojih jedan izdvaja modulisani signal u oba bočna opsega, a drugi izdvaja modulisani signal u donjem bočnom opsegu (slika).



**Slika uz zadatak 5.** AM-2BO modulator sa istisnutim signalom nosiocem i modulacijom u donjem bočnom opsegu

Na sljedećoj slici prikazane su spektralne komponente na ulazu i izlazu AM modulatora, sa dva filtra propusnika opsega učestanosti sa idealnom prenosnom karakteristikom, gdje su:

$f_g$  – najveća frekvencija slučajnog modulišućeg signala  $u_1(t)$ ,

$f_0$  – frekvencija signala nosioca  $u_0(t)$ ,

$U_0$  – amplituda signala nosioca,

$S_1(f)$  – spektar modulišućeg signala,

$S_0(f)$  – spektar signala nosioca,

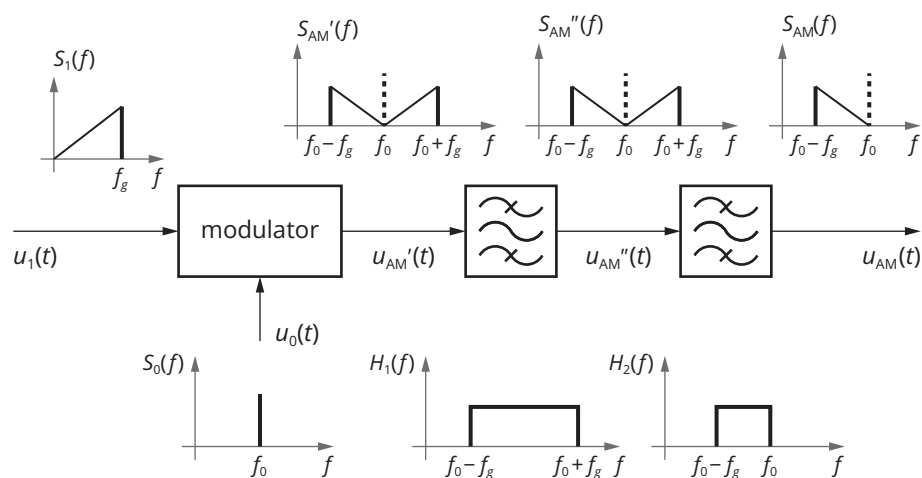
$S_{AM}'(f)$  – spektar AM signala na izlazu modulatora,

$S_{AM}''(f)$  – spektar AM signala na izlazu prvog pojasno-propusnog filtra,

$S_{AM}(f)$  – spektar AM signala na izlazu drugog pojasno-propusnog filtra i

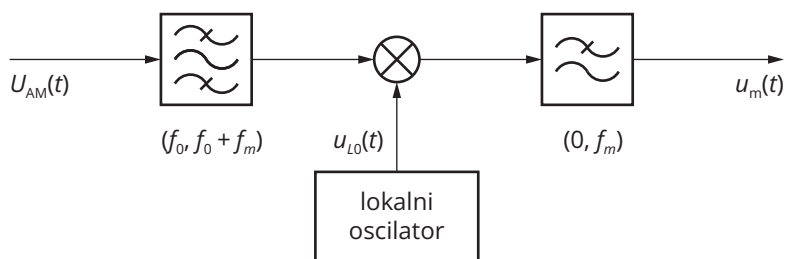
$H_1(f)$  i  $H_2(f)$  – idealne prenosne karakteristike pojasno-propusnih filtara.





**Slika uz zadatak 5.** Spektar signala AM-2BO modulatora sa istisnutom centralnom komponentom u lijevom bočnom opsegu

6. Prijemni uređaj za sinhronu demodulaciju AM-1BO signala sastoji se od filtra propusnika opsega, množača, lokalnog oscilatora i niskopropusnog filtra. Filtar propusnik opsega izdvaja spektar AM signala u gornjem bočnom opsegu – od donje ( $f_0$ ) do gornje ( $f_0 + f_g$ ) granične učestanosti. Pošto se radi o sinhronom demodulatoru, AM signal se množi sa izlaznim signalom iz lokalnog oscilatora, čija je učestanost jednaka učestanosti signala nosioca. Izlazni niskopropusni filtar izdvaja složeni modulišući signal iz AM modulacionog signala u opsegu od 0 do  $f_m$ , što predstavlja najveću učestanost složenog modulišućeg signala. Blok-šema prijemnog uređaja – produktnog demodulatora AM-1BO data je na slici:



**Slika uz zadatak 6.** Blok-šema produktnog demodulatora AM-1BO signala

## 7.2. Ugaone modulacije

1. Zadati FM signal ima sljedeći oblik:

$$u_{\text{FM}}(t) = 25 \cos(15 \cdot 10^8 + 2000 \cos(15000))t.$$

Polazeći od izraza za opšti oblik FM signala:

$$u_{\text{FM}}(t) = U_0 \cos(2\pi \cdot f_0 + 2\pi \cdot \Delta f \cdot u_m(t))t$$

i njegovim poređenjem sa zadatim izrazom, dobijamo da je:  $U_0 = 25 \text{ V}$ , i da su:  $2\pi \cdot f_0 = 15 \cdot 10^8$ ,  $2\pi \cdot \Delta f = 2000$  i  $2\pi \cdot f_m = 15000$ . Rješavanjem prve jednačine dobija se učestanost signala nosioca:

$$f_0 = 15 \cdot \frac{10^8}{2\pi} = 238,9 \text{ MHz.}$$

Rješavanjem druge jednačine dobija se maksimalna devijacija učestanosti:

$$\Delta f = \frac{2000}{2\pi} = 318 \text{ Hz.}$$

Rješavanjem treće jednačine dobija se učestanost modulišućeg signala:  $f_m = 15000/2\pi = 2,389 \text{ kHz}$ . Indeks modulacije FM signala jeste:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{318 \text{ Hz}}{2,389 \text{ kHz}} = 0,13.$$

Pošto je učestanost modulišućeg signala mnogo niža od učestanosti signala nosioca, onda je širina opsega učestanosti FM signala:

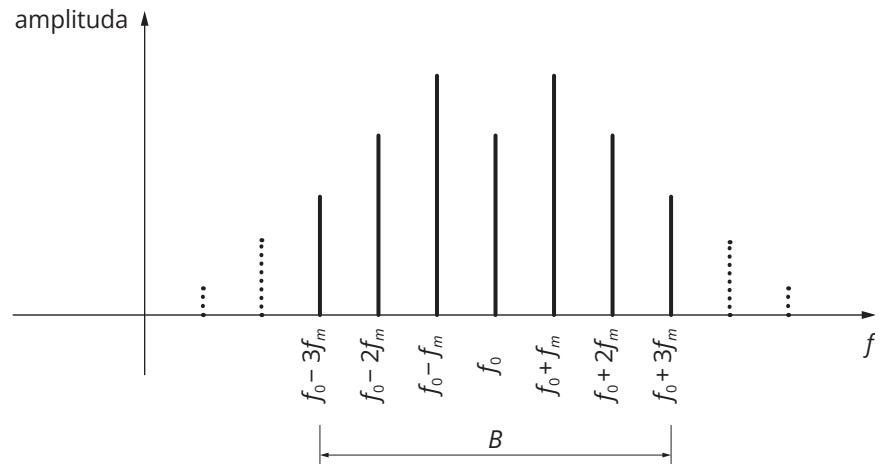
$$B = 2 \cdot \Delta f = 2 \cdot 318 \text{ Hz} = 636 \text{ Hz.}$$

2. Snaga signala na izlazu prijemnika jeste  $S = 100 \text{ mW}$  a snaga šuma  $N = 0,1 \text{ }\mu\text{W}$ . Odnos snage signala i šuma u dB je:

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} \text{ [dB]} &= 10 \cdot \log\left(\frac{S}{N}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{100 \text{ mW}}{0,1 \text{ }\mu\text{W}}\right) \\ &= 10 \cdot \log(1000 \cdot 10^3) \\ &= 10 \log(10^6) \\ &= 60 \cdot \log(10) = 60 \text{ dB.} \end{aligned}$$

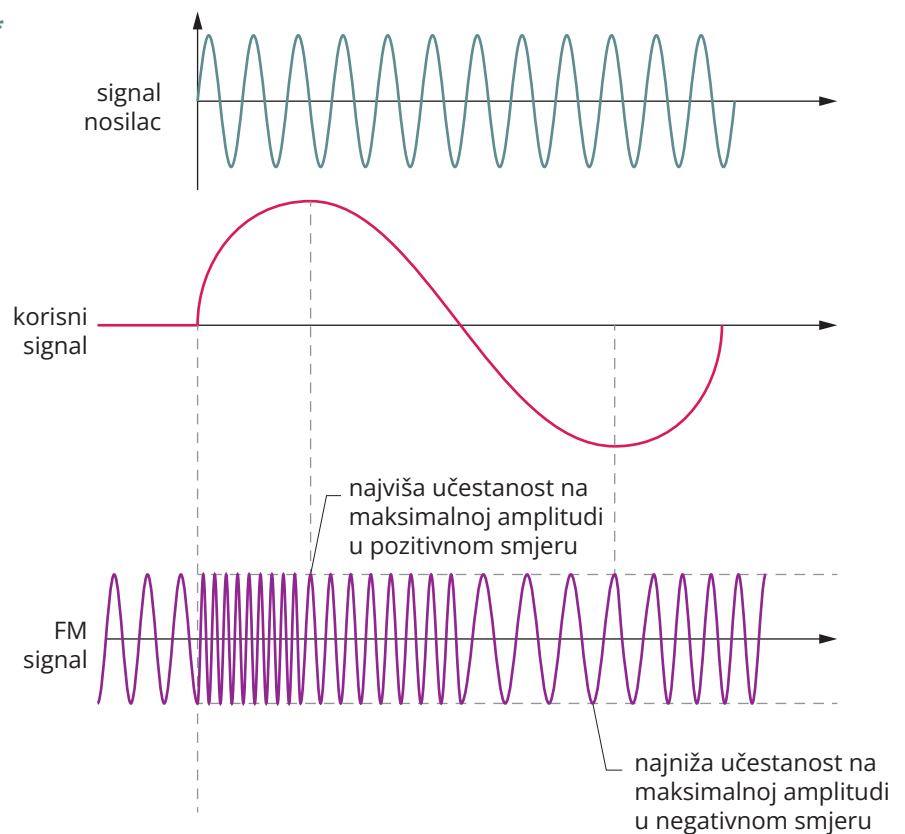
3. Govorni signal ima beskonačno širok spektar ali se najveći dio spektralnih komponenti nalazi do maksimalne frekvencije  $f_m$ . Bočne spektralne komponente FM signala nalaze se desno i lijevo od frekvencije

signala nosioca  $f_0$ . Tri desne spektralne komponente nalaze se na frekvenciji:  $f_0 + f_m$ ,  $f_0 + 2f_m$  i  $f_0 + 3f_m$ . Tri lijeve bočne komponente nalaze se na frekvenciji:  $f_0 - f_m$ ,  $f_0 - 2f_m$  i  $f_0 - 3f_m$ . Širina spektra FM signala je:  $B = 6 \cdot f_m = 20,4 \text{ kHz}$ . Spektar FM signala sa tri para bočnih komponenti dat je na sljedećoj slici:



Slika uz zadatak 3. Spektar FM signala sa tri para bočnih komponenti

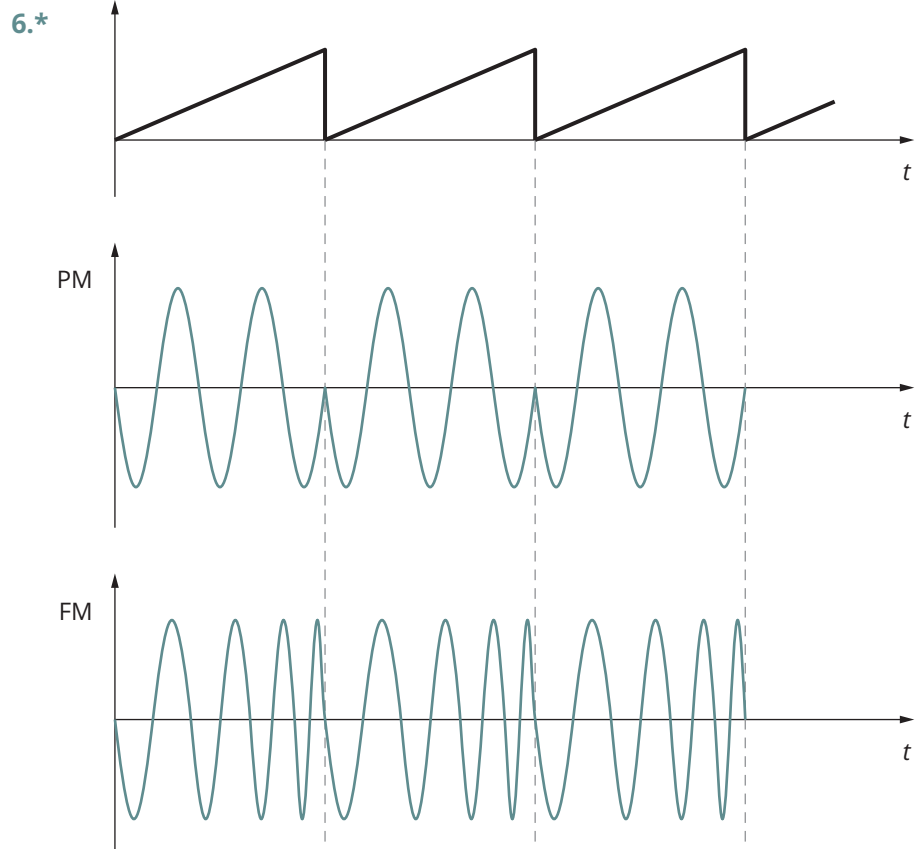
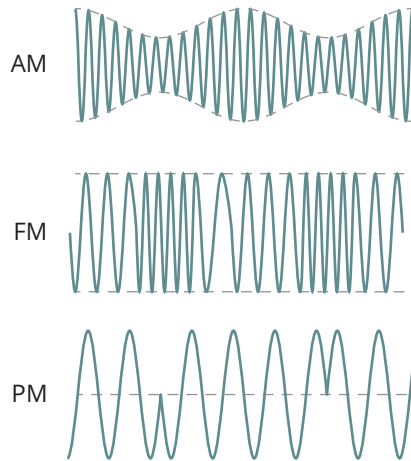
4.\*



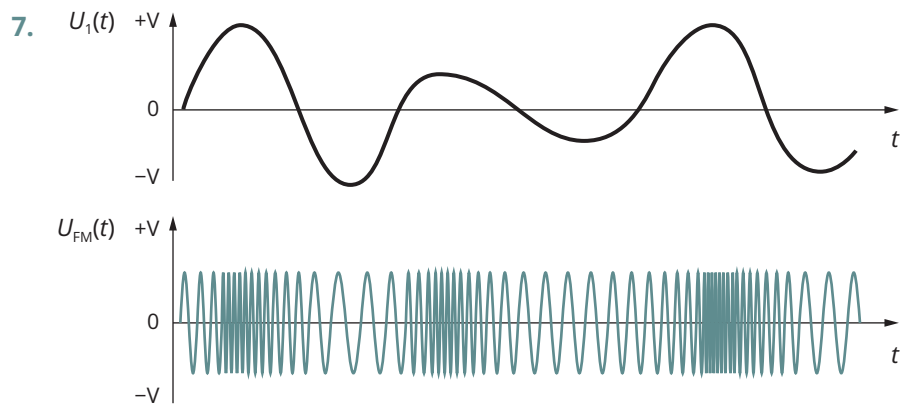
Slika uz zadatak 4. Frekvencijski modulisan signal FM

5.\* Kod amplitudske modulacije, amplituda nosioca mijenja se u ritmu promjene korisnog signala, kod frekvencijske modulacije frekvencija nosioca mijenja se u ritmu promjene amplitude korisnog signala, a kod fazne modulacije faza nosioca mijenja se u ritmu promjene amplitude korisnog signala.

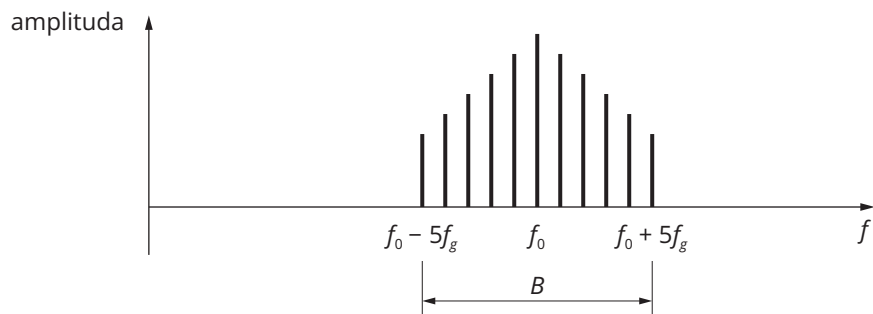
Na osnovu definicija AM, FM i PM signala, skicirani su talasni oblici FM i PM signala za zadati oblik AM signala:



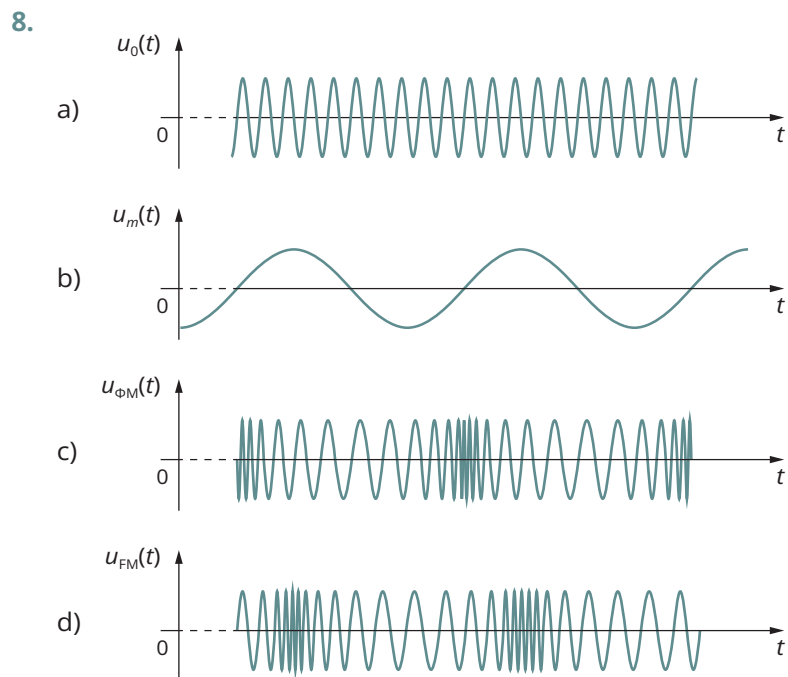
Slika uz zadatak 6.



Slika uz zadatak 7. Vremenski oblik FM signala

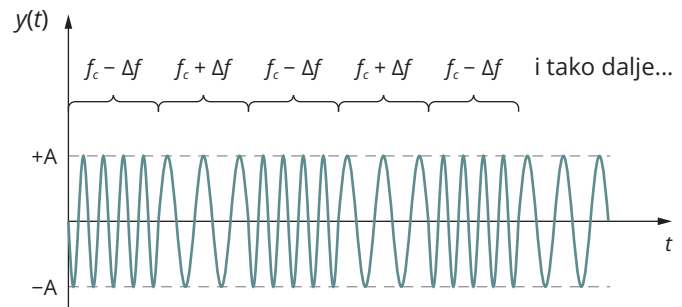


Slika uz zadatak 7. Spektar FM signala



Slika uz zadatak 8. Frekvencijski i fazno modulisan signal ako je modulišuci signal sinusoida

- 9.\* a) Riječ je o vremenskom multipleksiranju (TDM) signala.  
b) Talasni oblik multipleksiranog signala prikazan je na slici:



Slika uz zadatak 9.\*

## 7.3. Impulsne modulacije

1. a) Pošto je frekvencijski opseg muzičkog signala od 0 Hz do  $f_g = 15$  kHz, odbirci signala se uzimaju frekvencijom  $2f_m$ , odnosno uzima se:

$$2 \cdot 15 \text{ kHz} = 30\,000 = 30 \cdot 10^3 \text{ odbiraka u sekundi.}$$

- b) Perioda uzimanja odbiraka računa se, po Nikvistovom kriterijumu, prema izrazu:

$$T \leq \frac{1}{2f_g} \leq \frac{1}{2 \cdot 15 \cdot 10^3} \frac{1}{\text{sec}} = 0,33 \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ sec} \leq 333 \text{ } \mu\text{sec.}$$

- c) Pošto se odbirci muzičkog signala koduju sa 16 bitova, bitska brzina računa se prema izrazu:

$$\begin{aligned} V_B &= \text{broj bitova/odbirku} \cdot \text{broj odbiraka/sec} \\ &= 16 \text{ bitova/odbirku} \cdot 30\,000 \text{ odbiraka/sec} = 480 \text{ kb/sec.} \end{aligned}$$

2. Odnos signal/šum kvantizacije zavisi od broja kvantizacionih nivoa i broja bitova kojim se kodiraju odbirci. Pošto je odnos signal/šum dat logaritamskim odnosom:

$$a_{\frac{S}{N}} \text{ [dB]} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_S}{P_N}\right) = 20 \cdot \log(q),$$

u prethodnom izrazu zamijenimo vrijednost broja kvantizacionih nivoa  $q$  sa  $2^n$  i dobićemo (koristeći matematičko pravilo logaritma stepena):

$$a_{S/N} = 20 \cdot \log(q) = 20 \cdot \log(2^n) = n \cdot 20 \cdot \log(2) = n \cdot 20 \cdot 0,3 = 6 \cdot n \text{ [dB]},$$

što je trebalo i dokazati.

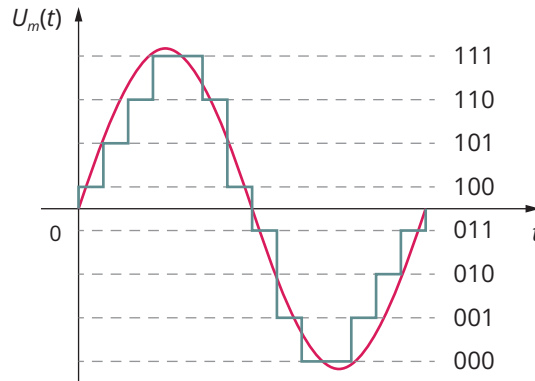
Pošto se odbirci muzičkog signala koduju sa 16 bitova, onda je broj kvantizacionih nivoa

$$q = 2^n = 2^{16} = 65\,536.$$

Odnos signal/šum kvantizacije može se dobiti pomoću izraza:

$$\begin{aligned} a_{\frac{S}{N}} \text{ [dB]} &= 10 \cdot \log\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \\ &= 20 \cdot \log(q) \\ &= 20 \cdot \log(65\,536) \\ &= 20 \cdot 4,82 = 96,4 \text{ dB.} \end{aligned}$$

3. Na slici je prikazan IKM signal nastao poslije sljedećih faza digitalizacije: odabiranje, kvantizacija i kodiranje. Kvantizacija se vrši sa osam kvantizacionih nivoa sa ravnomjernim korakom kvantizacije. Kodiranje se vrši sa tri bita, od kodne riječi 000 do 111.



Slika uz zadatak 3.

4. a)  $2 \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 20 \text{ MHz}$   
 b) Iz relacije  $2^n = 128$ , slijedi da je  $n = 7$   
 c)  $7 \cdot 20 \cdot 10^6 = 140 \text{ Mb/s}$
5. a)  $2 \cdot 4 \text{ MHz} \cdot 8\,000\,000 \text{ uzoraka/s} \cdot 8 \text{ bitova} = 64 \text{ Mb/s}$   
 b)  $19,2 \text{ Gb/s}$
6. a) Granična učestanost signala je  $f_m = 1\,000 \text{ Hz}$ , pa se na osnovu njega može izračunati period odabiranja u svakom kanalu:

$$T = 1/2 f_m = 1/1\,000 \text{ Hz} = 500 \mu\text{s}.$$

Ako je dužina okvira  $500 \mu\text{s}$ , i pošto je on podijeljen na 20 kanala, odnosno 20 vremenskih odsječaka, onda je vrijeme trajanja jednog odsječka  $T_i$ :

$$T_i = 500 \mu\text{s}/20 = 25 \mu\text{s}.$$

Broj bitova za kodiranje je 4, jer se kodiranje vrši sa  $q = 16$  nivoa ( $2^4 = 16$ ), što znači da svaki vremenski odsječak sadrži po četiri bita. Trajanje bita  $T_b$  može se izračunati kao količnik trajanja vremenskog odsječka i broja bitova potrebnih za kodiranje:

$$T_b = T_i/4 = 25 \mu\text{s}/4 = 6,25 \mu\text{s}.$$

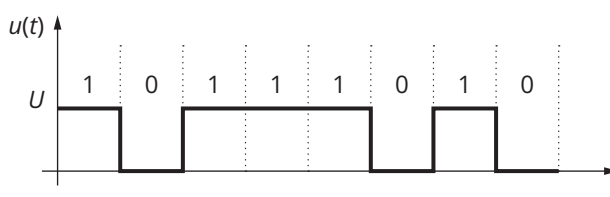
- b) Ukupan binarni protok multipleksa (bitska brzina) računa se kao proizvod broja kanala i brzine jednog kanala (kanali su brzine  $64 \text{ kb/s}$ , što predstavlja E1 standard za primarni multipleksni signal):

$$V_b = 20 \cdot 64 \text{ kb/s} = 1280 \text{ kb/s}.$$



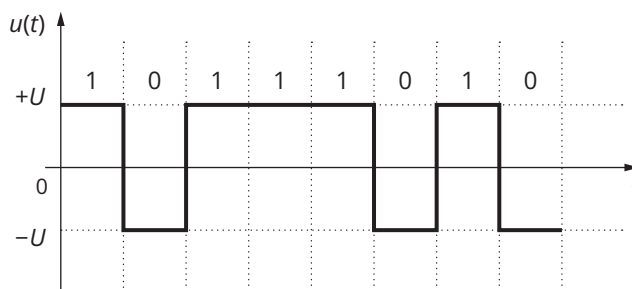
## 7.4. Prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti

1. a) Unipolarni binarni signal – Unipolarni linijski kod je najjednostavniji zato što koristi samo jedan polaritet. Odgovaraju mu dva naponska nivoa,  $+U$  i  $0$ . Kada postoji, signal na ulazu ima vrijednost  $+U$ , dok  $0$  označava da na ulazu nije prisutan signal. Na sljedećoj slici dat je talasni oblik unipolarnog binarnog signala koji kodira poruku 10111010.



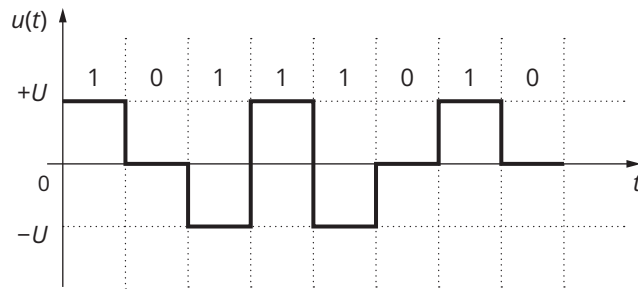
Slika uz zadatak 1. Unipolarni binarni signal

- b) Polarni binarni signal – za razliku od unipolarnih linijskih kodova koji koriste samo jedan polaritet, polarni linijski kodovi koriste dva polariteta – pozitivan i negativan,  $+U$  i  $-U$ . Na sljedećoj slici dat je talasni oblik polarnog binarnog signala koji kodira poruku 10111010.



Slika uz zadatak 1. Polarni binarni signal

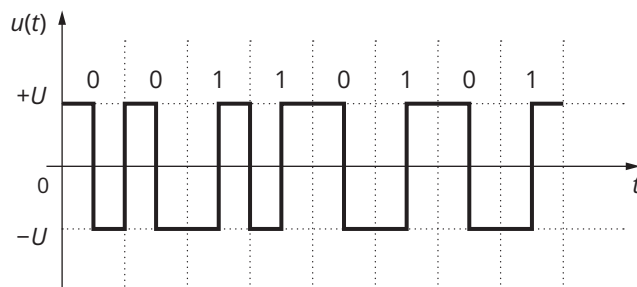
- c) Bipolarni binarni signal – bipolarno kodiranje je vrsta kodiranja kod koga se za prenos logičke jedinice koriste dva nivoa napona suprotnog polariteta, tako da se prenose tri vrijednosti:  $+U$ ,  $-U$  i nula. Na sljedećoj slici dat je talasni oblik bipolarnog binarnog signala koji kodira poruku 10111010, gdje bit „1“ naizmjenično poprima vrijednost  $+U$  i  $-U$ :



Slika uz zadatak 1. Bipolarni binarni signal

2. Diferencijalno kodiranje važno je kod prenosa digitalnih signala, kada se ne može razlikovati neaktivnost predajnika i bit „0“ koji se prenosi. Diferencijalno kodiranje osigurava da primaoci bita mogu tačno da utvrde početak i kraj svakog bita koji se prenosi. Prvi bit u diferencijalnom kodiranju uzme se proizvoljno „0“ ili „1“. Svakom „0“ u originalnom signalu odgovara promijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval. Svakom „1“ u originalnom signalu odgovara nepromijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval. Kod Mančester kodiranja period svakog bita dijeli se na dva jednaka intervala.

Ako je originalni binarni niz 00110101, onda je diferencijalni binarni kod sa bitom 1 na početku: 10111001. Na sljedećoj slici dat je izgled digitalnog signala za niz bitova 00110101, koristeći Mančester kodiranje:



Slika uz zadatak 2. Izgled digitalnog signala pri Mančester kodiranju

3. Pošto je opseg TV kanala  $f_m = 5 \text{ MHz}$  i pošto je  $M = 4 = 2^2$ , to znači da se prenose dva bita istovremeno, maksimalna brzina može se dobiti prema Nikvistovoj teoremi:

$$v_{max} [\text{b/s}] = 2f_m \log_2 M = 2 \cdot 5 \text{ MHz} \cdot \log_2 4 = 10 \text{ MHz} \cdot 2 = 20 \text{ Mb/s}.$$

Maksimalna brzina za prenos digitalnog signala na četiri nivoa je dva puta veća od maksimalne brzine kojom se digitalni signal prenosi na dva nivoa, zato što se za isto vrijeme prenose dva bita istovremeno.

4. Širina propusnog opsega kanala jeste  $B = 1$  MHz a  $S/N = 6$  dB. Prema Šenonovoj teoremi, maksimalna brzina prenosa podataka kroz kanal dobija se pomoću izraza:

$$v_{max} [\text{b/s}] = B \log_2(1 + S/N).$$

Pošto je zadat odnos  $S/N$  u dB, mora se naći odnos  $S/N$  kao bezdimenzioni broj:

$$S/N [\text{dB}] = 10 \log S/N,$$

odakle se dobija izraz:

$$S/N = 10^{\frac{S/N [\text{dB}]}{10}} = 10^{\frac{6}{10}} = 3,98.$$

Zamjenom dobijene vrijednosti u izraz za maksimalnu brzinu, dobijamo:

$$\begin{aligned} v_{max} [\text{b/s}] &= B \log_2(1 + S/N) \\ &= 1 \text{ MHz} \log_2(1 + 3,98) \\ &= 1 \text{ MHz} \log_2(4,98) = 2,33 \text{ Mb/s}. \end{aligned}$$

5. Širina propusnog opsega kanala za prenos –  $B$ , maksimalna brzina prenosa u kanalu –  $v_{max}$  i odnos srednje snage signala i šuma –  $S/N$ , povezani su Šenonovom teoremom:

$$v_{max} [\text{b/s}] = B \log_2(1 + S/N).$$

Iz prethodnog izraza, nepoznata je širina propusnog opsega  $B$  koja se može izraziti pomoću jednakosti:

$$\begin{aligned} B &= \frac{v_{max} [\text{b/s}]}{\log_2(1 + S/N)} \\ &= \frac{4 \text{ Mb/s}}{\log_2(1 + 15)} = \frac{4 \text{ Mb/s}}{\log_2 16} = \frac{4 \text{ Mb/s}}{\log_2 2^4} = \frac{4 \text{ Mb/s}}{4 \cdot \log_2 2} = \frac{4 \text{ Mb/s}}{4 \cdot 1} = 1 \text{ MHz}. \end{aligned}$$

6. Iz Šenonove teoreme možemo dobiti izraz  $\log_2(1 + S/N)$ :

$$\log_2(1 + S/N) = \frac{v_{max} [\text{b/s}]}{B},$$

iz kojeg se odnos  $S/N$  može dobiti pravilom stepenovanja u matematici:

$$S/N = 2^{\frac{v_{max} [\text{b/s}]}{B}} - 1 = 2^{\frac{10 \text{ Mb/s}}{5 \text{ MHz}}} - 1 = 2^{\frac{10}{5}} - 1 = 2^2 - 1 = 3.$$

Iz prethodnog izraza možemo zaključiti da je srednja snaga signala tri puta veća od srednje snage šuma.

7. Frekvencijski opseg signala dat je od najmanje do najveće frekvencije, pa je širina njegovog opsega  $B = f_{max} - f_{min} = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$ . Prema Šenonovoj teoremi, maksimalna brzina prenosa podataka kroz kanal dobija se pomoću izraza:

$$v_{max} [\text{b/s}] = B \log_2(1 + S/N).$$

Kao iz prethodnog zadatka, prvo moramo naći odnos  $S/N$ :

$$S/N = 10^{\frac{S/N [\text{dB}]}{10}} = 10^{\frac{24}{10}} = 251,19.$$

Zamjenom dobijene vrijednosti u izraz za maksimalnu brzinu, dobijamo:

$$v_{max} [\text{b/s}] = B \log_2(1 + S/N) = 1 \text{ MHz} \log_2(1 + 251,19) = 1 \text{ MHz} \cdot 8 = 8 \text{ Mb/s}.$$

Pošto je maksimalna brzina protoka osam puta veća od širine propusnog opsega signala, korisni signal može se predstaviti sa osam signalizacionih nivoa, gdje se u svakom vremenskom intervalu prenose tri bita ( $2^3 = 8$ ).

8. a) Frekvencijski opseg telefonskog kanala je  $f_m = 3 \text{ kHz}$ . Pošto je  $M = 2$ , maksimalna brzina prenosa kroz telefonski kanal računa se prema Nikvistovoj teoremi, pomoću izraza:

$$v_{max} [\text{b/s}] = 2f_m \log_2 M = 2 \cdot 3 \text{ kHz} \cdot \log_2 2 = 6 \text{ kHz} \cdot 1 = 6 \text{ kb/s}.$$

- b) Za  $M = 4$ , maksimalna brzina je:

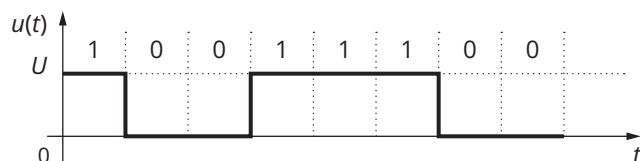
$$v_{max} [\text{b/s}] = 2f_m \log_2 M = 2 \cdot 3 \text{ kHz} \cdot \log_2 4 = 6 \text{ kHz} \cdot 2 = 12 \text{ kb/s}.$$

- c) Ako je broj nivoa  $M = 8$ , onda je maksimalna brzina:

$$v_{max} [\text{b/s}] = 2f_m \log_2 M = 2 \cdot 3 \text{ kHz} \cdot \log_2 8 = 6 \text{ kHz} \cdot 3 = 18 \text{ kb/s}.$$

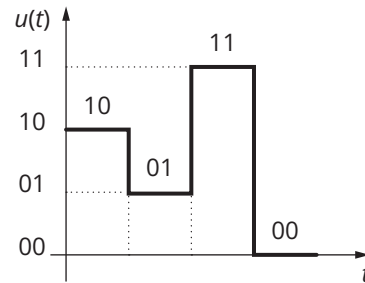
Iz prethodnih rješenja može se izvesti sljedeći zaključak: najmanju brzinu prenosa digitalnih signala kroz telefonski kanal ima prenos u dva nivoa. Brzina prenosa signala u četiri nivoa veća je dva puta nego u dva nivoa, zato što se istovremeno prenese dva bita. Brzina prenosa signala u osam nivoa veća je tri puta od prenosa signala u dva nivoa zato što se za isto vrijeme prenese tri bita istovremeno.

9. a) Unipolarni talasni oblik signala koji kodira digitalnu poruku 10011100, u  $M = 2$  nivoa, dat je na slici:



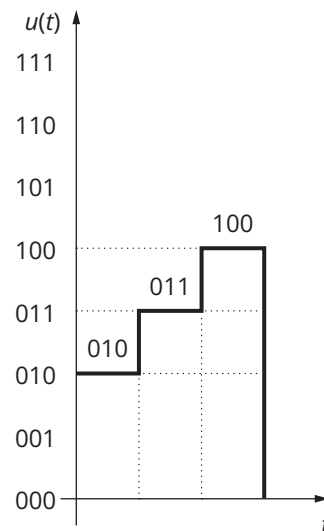
**Slika uz zadatak 9a.** Unipolarni talasni oblik signala za digitalnu poruku 10011100 u  $M = 2$  nivoa

- b) Unipolarni talasni oblik signala koji kodira digitalnu poruku 10011100, u  $M = 4$  nivoa (00, 01, 10 i 11). Prenos u četiri nivoa znači da se za prenos grupišu po dva bita i prenose za isto vrijeme, kao u prethodnom slučaju, kada se prenosio po jedan bit. Grupisani bitovi su, u našem slučaju: 10, 01, 11 i 00, što čini prenos u četiri nivoa:



**Slika uz zadatak 9b.** Unipolarni talasni oblik signala za niz bitova 10011100 u  $M = 4$  nivoa

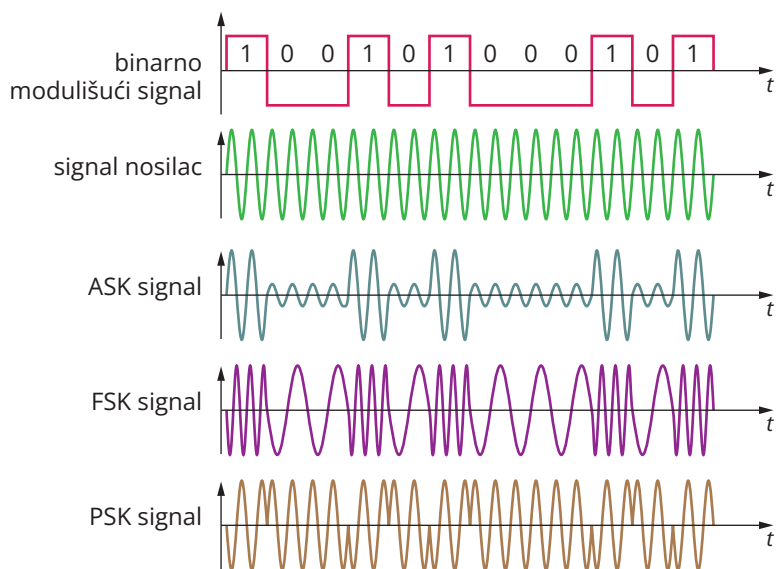
- c) Ako se prenos vrši u  $M = 8$  nivoa (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 i 111), to znači da je potrebno grupisati digitalnu poruku 10011100, zdesna ulijevo, sa po tri bita. U našem slučaju to su grupe: 100, 011 i 10. Pošto digitalna poruka ima osam bitova, grupi 10 ćemo s lijeve strane dodati 0, da bi se dobila poruka od tri bita. Unipolarni talasni oblik signala koji kodira digitalnu poruku 10011100, na  $M = 8$  nivoa, dat je na sljedećoj slici.



**Slika uz zadatak 9c.** Unipolarni talasni oblik signala za niz bitova 10011100 u  $M = 8$  nivoa

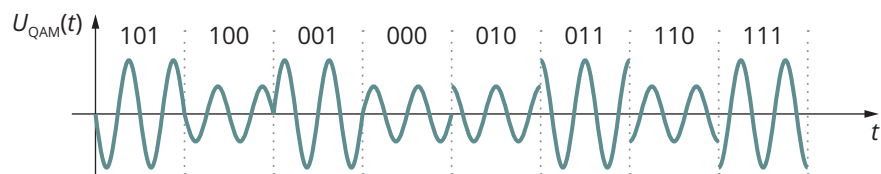
## 7.5. Prenos digitalnih signala modulisanim nosiocem

1. Na slici je prikazan signal nosilac, ASK signal, FSK signal i PSK signal za digitalni modulišući signal, koji odgovara povorci bitova 100101000101.



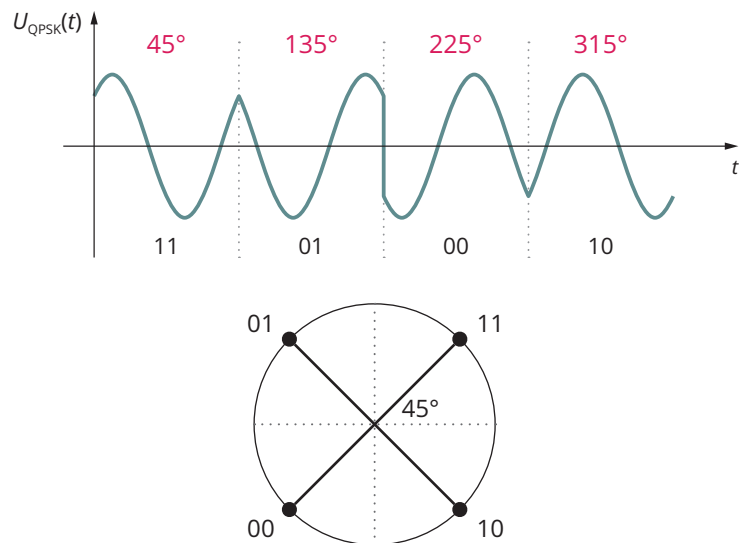
**Slika uz zadatak 1.** ASK signal, FSK signal, PSK signal i signal nosilac za binarno modulišući signal 100101000101

2. QAM signal ima dvije amplitude i četiri različite faze, odnosno četiri fazna pomjeraja. Kombinacijom dvije amplitude i četiri faze, može da se definiše osam različitih nivoa signala. Za predstavljanje osam različitih nivoa signala mogu se koristiti tri bita. Ovakav signal, sa osam nivoa, označava se sa 8-QAM. Dekadski simboli binarnih kombinacija su, redom: 5, 4, 1, 0, 2, 3, 6 i 7. Faza pri prelazu jednog simbola na drugi teže se definiše i računa. Zbog toga se za prikaz osam stanja QAM signala koristi prikaz signala na konstelacionom dijagramu u obliku tačaka, gdje svaka tačka ima svoju amplitudu i fazu. Talasni oblik 8-QAM signala koji prenosi niz bitova u grupi od tri bita (osam simbola), prikazan je na slici:



**Slika uz zadatak 2.** Talasni oblik 8-QAM signala koji prenosi niz bitova 101 100 001 000 010 011 110 111

3. Modemski standard V.32 koristi 32-QAM sa brzinom signalizacije od 2 400 bauda. Koriste se 32 konstelacione tačke za prenošenje četiri bita podataka po simbolu i jednog redundantnog bita po simbolu, petog bita (za kontrolu parnosti); znači, ukupno pet bitova ( $2^5 = 32$ ). Bitska brzina četiri puta je veća od brzine signalizacije jer se prenose četiri bita podataka u simbolu istovremeno. Znači, bitska brzina je 2 400 bauda  $\cdot 4 = 9 600$  b/s. Za standard V.64 koriste se 64 konstelacione tačke za prenošenje pet bitova podataka po simbolu i jednog bita za kontrolu parnosti; znači, ukupno šest bitova ( $2^6 = 64$ ). I u ovom slučaju brzina signalizacije je 2 400 bauda ali je bitska brzina 2 400 bauda  $\cdot 5 = 12 000$  b/s. Znači, za ova dva standarda, brzina signalizacije je ista, a bitska brzina je veća kod standarda V.64 za 2 400 b/s, jer se za kodiranje simbola koristi pet bitova a ne četiri bita.
4. Na slici je dat primjer QPSK modulacije sa četiri faze  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 135^\circ$ ,  $\varphi_3 = 225^\circ$  i  $\varphi_4 = 315^\circ$ , kojima odgovaraju sljedeće kombinacije bita, redom: 11, 01, 00 i 10. Pridruživanje dvobitne kombinacije odgovarajućoj fazi definisano je tako da se susjedne kombinacije bita razlikuju samo u jednom binarnom znaku. Vertikalnim isprekidanim linijama prikazani su trenuci u kojima nosilac mijenja fazu. Najprije se kroz sistem prenosi signal koji odgovara simbolu 11. Pomjeranje faze mjeri se uglom promjene, pa dolazak simbola 01 mijenja fazu signala od  $45^\circ$  ( $\pi/4$ ) na  $135^\circ$  ( $3\pi/4$ ), znači promjenu faze za ugao od  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). Druga promjena faze na slici od ukupno  $180^\circ$  ( $\pi$ ), odgovara simbolu 00, kada se faza mijenja sa  $135^\circ$  ( $3\pi/4$ ) na  $225^\circ$  ( $5\pi/4$ ). Treća promjena faze od ukupno  $270^\circ$  ( $3\pi/2$ ), odgovara prenosu simbola 10, što mijenja fazu signala od  $225^\circ$  ( $5\pi/4$ ) do  $315^\circ$  ( $7\pi/4$ ). Dakle, u datom vremenu prenijeto je osam bitova ili četiri simbola, pa je bitska brzina povećana dva puta.



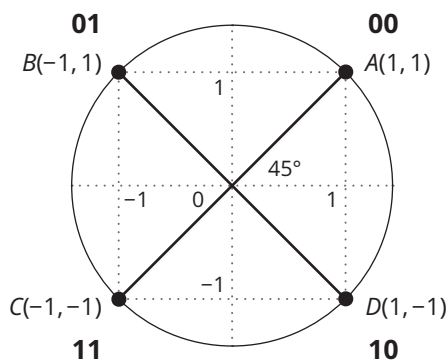
**Slika uz zadatak 4.** Talasni oblik zadatog QPSK signala i odgovarajući konstelacioni dijagram

Analitički oblik QPSK signala koji odgovara konstelacionom dijagramu sa slike izgleda ovako:

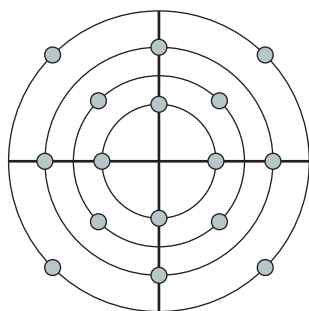
$$u_{QPSK}(t) = \begin{cases} U_0 \cos\left(2\pi f_0 + \frac{\pi}{4}\right), & \text{za kombinaciju 11} \\ U_0 \cos\left(2\pi f_0 + \frac{3\pi}{4}\right), & \text{za kombinaciju 01} \\ U_0 \cos\left(2\pi f_0 + \frac{5\pi}{4}\right), & \text{za kombinaciju 00} \\ U_0 \cos\left(2\pi f_0 + \frac{7\pi}{4}\right), & \text{za kombinaciju 10} \end{cases}$$

Na konstelacionom dijagramu QPSK signala, amplituda je konstantna a pomjeraj faze mijenja se u zavisnosti od toga koja se kombinacija bitova prenosi kao fazno modulisan analogni signal.

5. Konstelacioni dijagram za zadati modemska signal u četiri tačke ima jednu amplitudu i četiri faze, što znači da signal može biti u četiri stanja. Stanja se mogu kodirati sa dva bita ( $2^2 = 4$ ). Amplituda ima vrijednost A. Faze su, redom:  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  i  $315^\circ$ . Razlika između faznih pomjeraja je  $360^\circ/4 = 90^\circ$ . Znači, radi se o 4-QPSK modemu. Na slici je prikazan konstelacioni dijagram sa zadate četiri tačke A, B, C i D sa svojim koordinatama:



Slika uz zadatak 5. Konstelacioni dijagram za zadati QPSK signal



Slika uz zadatak 6. Konstelacioni dijagram za zadati QAM signal

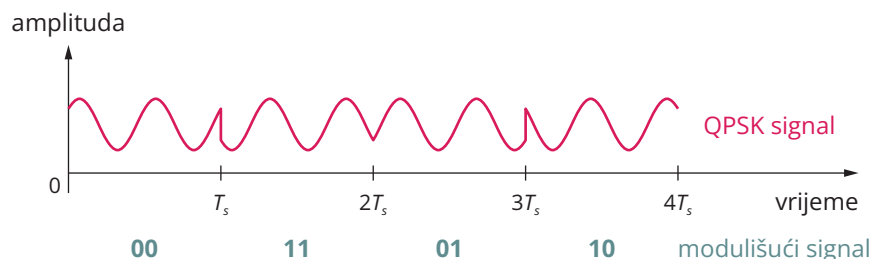
6. Na slici je prikazan konstelacioni signal za uređaj koji koristi QAM tehniku od četiri amplitude i četiri fazna pomaka.

Konstelacioni dijagram ima četiri amplitude signala (četiri koncentrična kruga), gdje prva i treća amplituda imaju fazni pomjeraj, redom:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  i  $270^\circ$ . Druga i četvrta amplituda imaju fazni pomjeraj, redom:  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  i  $315^\circ$ . Signal sa četiri amplitude i četiri pomjeraja po fazi ima 16 stanja (konstelacione tačke) koja se mogu predstaviti sa po četiri bita, koji se mogu uzeti iz skupa svih mogućih 16 ( $2^4 = 16$ ) kombinacija: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100,



1101, 1110 i 1111. Razlika u fazi je  $90^\circ$ , jer svaka amplituda ima po četiri fazna pomaka ( $360^\circ/4 = 90^\circ$ ). U ovom slučaju radi se o 16-QAM signalu.

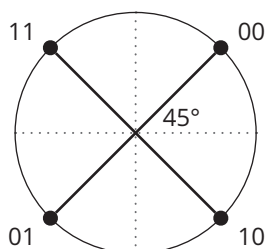
7. Na slici je prikazan QPSK modulirani signal za zadati modulišući signal 00110110.



**Slika uz zadatak 7.** QPSK modulirani signal za zadati modulišući binarni signal

Sa četiri fazna pomjeraja prenosi se simbol od dva bita, redom: 00, 11, 01, 10, kod koga su faze međusobno pomjerene za  $\pi/2$ , što predstavlja četiri stanja digitalnog signala i četiri tačke na konstelacionom dijagramu. Četiri fazna pomjeraja su elementi sljedećeg skupa:  $(\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$ . Svakom faznom pomjeraju proizvoljno se dodjeljuje po jedan binarni par od dva bita, i to na sljedeći način: faznom pomjeraju  $\pi/4$  dodijeljen je simbol 00, faznom pomjeraju  $3\pi/4$  dodijeljen je simbol 11, faznom pomjeraju  $5\pi/4$  dodijeljen je simbol 01, i na kraju – faznom pomjeraju  $7\pi/4$  dodijeljen je simbol 10.

Najprije se kroz sistem prenosi signal koji odgovara simbolu 00. Pomjeranje faze mjeri se uglom promjene, pa dolazak simbola 11 mijenja fazu signala od  $45^\circ$  ( $\pi/4$ ) na  $135^\circ$  ( $3\pi/4$ ), znači – promjenu faze za ugao od  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). Na slici vidimo da sljedeća promjena faze od  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) odgovara simbolu 01 kada se faza mijenja sa  $135^\circ$  ( $3\pi/4$ ) na  $225^\circ$  ( $5\pi/4$ ). Treća promjena faze od  $270^\circ$  ( $5\pi/4$ ) odgovara prenosu simbola 10, što mijenja fazu signala od  $225^\circ$  ( $5\pi/4$ ) do  $315^\circ$  ( $7\pi/4$ ). Dakle, u datom vremenu preneto je osam bitova ili četiri simbola, pa je bitska brzina povećana dva puta. Na sljedećoj slici dat je konstelacioni dijagram QPSK modulisanog signala za zadati modulišući binarni signal 00110110.



**Slika uz zadatak 7.** Konstelacioni dijagram QPSK modulisanog signala za zadati modulišući binarni signal

## 8. Lista engleskih skraćenica korišćenih u udžbeniku

**A/D** analog/digital (analogni/digitalni)

**AC** alternating current (naizmjenična struja)

**ADSL** asymmetric digital subscriber line (asimetrična digitalna pretplatnička linija)

**AM** amplitude modulation (amplitudski modulator)

**AMI** alternate mark inversion (alternativni bipolarni kod)

**AP** access point (pristupna tačka)

**ASCII** American Standard Code for Information Interchange (Američki kodni standard za razmjenu informacija)

**ASK** amplitude shift keying (amplitudsko pomjeranje – amplitudska digitalna modulacija)

**BER** bit error rate (greška po bitu)

**BNC** bajonet Neill-Concelman (konektor za koaksijalni kabl)

**CATV** cable television (kablovska televizija)

**CD** compact disc (optički disk)

**CRC** cycle redundancy check (kodovi ciklične redundantne provjere)

**D/A** digital/analog (digitalni/analogni)

**DC** direct current (jednosmjerna struja)

**DECT** digital enhanced cordless telecommunications (bežični telefonski sistemi)

**DMT** discrete multitone (diskretan višetonski sistem)

**DSB** double-sided disk (dva bočna opsega)

**DSL** digital subscriber line (digitalna pretplatnička linija)

**DSLAM** digital subscriber line access multiplexer (digitalna multiplekverska pretplatnička linija)

**ETT** Emona Telecoms-Trainer (eksperimentalna pločica za simulaciju)

**FEC** forward error correction (kod za ispravljanje grešaka na mjestu prijema)

**FM** frequency modulation (frekvencijska modulacija)

**FS** frame synchronization (sinhronizacija okvira podataka)

**FSK** frequency shift keying (frekvencijsko pomjeranje – frekvencijska digitalna modulacija)

**ICT** information and communication technology (informaciona i komunikaciona tehnologija)

**ISM** industrial, scientific and medical (industrijski, naučni i medicinski)

**ISO** International Standards Organization (Međunarodna organizacija za standarde)

**ISP** Internet Service Provider (davalac internetskih usluga)

**LAN** local area networks (lokalna računarska mreža)

**LED** light emitting diode (svjetleća dioda)

**LoS** line of sight (linija optičke vidljivosti)

**LSB** lower sideband (donji bočni pojas)

**NRZ** nonreturn to zero (bez povratka na nulu)

**PCM** pulse code modulation (impulsna kodna modulacija)

**PM** phase modulation (fazna modulacija)

**PN** pseudo-noise (pseudoslučajni šum)

**PSK** phase-shift keying (fazno pomjeranje – fazna digitalna modulacija)

**QAM** quadrature amplitude modulation (kvadratura amplitudska modulacija)

**QPSK** quadrature phase shift keying (binarno fazno modulirani signal sa 4 faze)

**RZ** return to zero (sa povratkom na nulu)

**S/N** signal/noise (odnos signal/šum)

**SSB** single sideband (jedan bočni opseg)

**TDM** time division multiplexing (multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala)

**UTP** unshielded twisted pair (neoklopljena upredena parica)

**Wi-Fi** wireless fidelity (bežični prenos)

# 9. Rječnik pojmova iz telekomunikacija

## A

**A/D konvertor** – uređaj u kojem se vrši A/D konverzija.

**A/D konverzija** – postupak pretvaranja analognog signala u digitalni.

**amplituda** – najveće rastojanje od vrha talasa u odnosu na trenutak kad nema talasa.

**amplitudska karakteristika kola** – apsolutna vrijednost funkcije prenosa kola.

**analogne modulacije** – modulacije kad kojih je modulišući signal kontinualan.

**antena** – pretvarač električnih signala visokih učestanosti u elektromagnetno zračenje.

**anvelopa** – obvojnica signala.

## D

**D/A konvertor** – uređaj u kojem se vrši D/A konverzija.

**D/A konverzija** – postupak pretvaranja digitalnog u analogni signal.

**dekoder** – uređaj na prijemnoj strani komunikacionog sistema u kojem se obavlja dekodiranje.

**dekodiranje** – postupak kojim se iz kodiranog signala dobija originalna informacija.

**demodulacija** – postupak kojim se u prijemu iz modulisanog signala izdvaja informacija, odnosno signal koji je u predajniku ostvaren modulacijom.

**demodulator** – sklop u kojem se obavlja demodulacija.

**detektor anvelope** – diodni detektor.

**devijacija faze** – vrijednost promjene faze nosioca, prouzrokovana promjenom amplitude modulišućeg signala.

**devijacija učestanosti** – vrijednost promjene učestanosti nosioca, prouzrokovana promjenom amplitude modulišućeg signala.

**diferencijator** – složeni sklop koji se, između ostalog, koristi za dobijanje fazno modulisanog signala od frekvencijski modulisanog signala.

**dioda** – elektronska komponenta koja, u zavisnosti od smjera napona na koji se priključi, dozvoljava ili ne dozvoljava protok struje:

- **laserska** – radi na principu stimulisane emisije, što omogućuje dobijanje signala velike izlazne snage i znatno užeg spektra zračenja
- **LED** – poluprovodnička dioda koja emituje svjetlost kada kroz nju prolazi struja
- **varikap** – poluprovodnička dioda čija se kapacitivnost mijenja promjenom vrijednosti inverznog napona koji je priključen na nju.

**diodni detektor** – asinhroni demodulator KAM signala.

**diskretne poruke** – nizovi posebnih elemenata sa konačnim brojem stanja.

**diskriminator** – sklop u kojem se obavlja detekcija FM signala.

**domen** – oblast:

- **frekvencijski** – oblast u kojoj se prikazuje skup svih učestanosti signala
- **vremenski** – oblast u kojoj se prikazuje promjena signala u vremenu.

**duobinarni signal** – binarni kodirani signal kod koga se za kodiranje binarne jedinice koriste dva napona suprotnog polariteta.

## E

**ekspander** – uređaj koji se nalazi u prijemniku i koji radi obrnutu radnju od kompresora.

**električni signal** – poruka (govor, slika, podatak) pretvorena u odgovarajući električni oblik.

## F

**filter** – električno kolo koje selektivno propušta određene elemente signala, a druge odstranjuje ili ih svodi na minimum:

- **granične učestanosti filtra** – učestanosti koje oblast učestanosti u kojoj nema slabljenja signala razdvajaju od oblasti u kojima postoji slabljenje
- **slabljenje filtra** – odnos napona na ulazu i izlazu filtra

- **filtri propusnici niskih učestanosti** (niskofrekvencijski filtri) – električna kola koja propuštaju sve signale ispod određene učestanosti, a blokiraju ili slabe signale iznad te učestanosti
- **filtri propusnici visokih učestanosti** (visokofrekvencijski filtri) – električna kola koja propuštaju sve signale iznad određene učestanosti, a blokiraju ili slabe signale ispod te učestanosti
- **filtri propusnici opsega učestanosti** – električna kola koja propuštaju signale u okviru određenog opsega učestanosti, a blokiraju ili slabe signale ispod ili iznad tog opsega
- **filtri nepropusnici opsega učestanosti** – električna kola koja ne propuštaju signale u okviru određenog opsega učestanosti, a propuštaju signale ispod ili iznad tog opsega
- **optimalni filter** – filter kojim se koriguje funkcija prenosa sistema kako bi se minimizirala vjerovatnoća greške u prenosu digitalnog signala
- **transverzalni filter** – filter koji koriguje funkcije prenosa sistema.

**funkcija prenosa** – matematički odnos između ulaznog i izlaznog signala nekog sistema.

## H

**harmonijski spektar** – spektar koji sadrži samo frekventijske komponente čije su frekvencije cijeli umnošci osnovne frekvencije; takve frekvencije poznate su kao harmonici.

**harmonik** – signal sa frekvencijom koja predstavlja cijeli pozitivan umnožak osnovne frekvencije originalnog sinusnog signala.

## I

**idealni sistem prenosa** – sistem kod koga je izlazni signal identičan ulaznom signalu.

**integrator** – složeni sklop koji se, između ostalog, koristi za dobijanje frekvencijski modulisanog signala od fazno modulisanog signala.

**internet** – skup računarskih mreža i uređaja koji su međusobno povezani odgovarajućim protokolima koji im omogućuju da funkcionišu kao jedna ogromna globalna mreža.

**intersimbolska interferencija** – oblik izobličenja signala koji nastaje preklapanjem jednog simbola sa susjednim simbolima.

## K

**kašnjenje** – vrijeme koje je potrebno da se poruka prenese od pošiljaoca do primaoca.

**kôd** – skup simbola koji predstavljaju informaciju:

- **linijski kôd** – kôd čija je namjena da se signal koji se prenosi prilagodi liniji veze
- **polarni linijski kôd** – kôd koji koristi dva polariteta, pozitivan i negativan
- **unipolarni linijski kôd** – kôd koji koristi samo jedan polaritet
- **zaštitni kôd** – kôd kojim se obezbjeđuje detekcija i korekcija grešaka u toku prenosa digitalnih signala.

**koder** – elektronski sklop u kojem se obavlja kodiranje.

**kodiranje** – postupak pretvaranja informacija ili podataka iz jednog oblika u drugi korišćenjem određenog sistema simbola:

- statističko – kodiranje radi ekonomičnosti prenosa
- zaštitno – kodiranje za pouzdaniji prenos.

**komparator** – uređaj koji vrši upoređivanje dva signala.

**kompresija** – uklanjanje suvišnih podataka u informaciji radi njenog sažimanja, kako bi se poruka smjestila na manji prostor ili prenijela manjom brzinom.

**kompresor** – uređaj koji kompresuje podatke.

**konstelacioni dijagrami** – dijagrami koji za definisanje svih mogućih promjena signala koriste tačke zadate u koordinatnom sistemu.

**kontinualne poruke** – poruke koje se javljaju kao funkcije vremena i koje imaju teorijski neograničen broj stanja, definisanih odgovarajućim granicama.

**konvertor signala** – pretvarač signala iz jednog oblika u drugi.

**korisnik** – osoba ili uređaj kome je poruka namijenjena.

**kriptografija** – kodiranje radi obezbjeđenja tajnosti poruke.

**kvantizacija** – postupak u kom se beskonačan skup vrijednosti amplituda analognog signala čini konačnim, dodjelom odgovarajućih vrijednosti amplitudama iz prethodno definisanog skupa:

- **greška kvantizacije** – razlika u vrijednostima amplituda kojima se dodjeljuje ista binarna vrijednost
- **kvantizacioni nivoi** – brojčane vrijednosti koje se dodjeljuju amplitudama signala
- **korak kvantizacije** – rastojanje između nivoa kvantizacije
- **ravnomjerna** – kvantizacija kod koje je korak kvantizacije isti
- **neravnomjerna** – kvantizacija kod koje je korak kvantizacije različit.

## L

**linija veze** – sredina kroz koju se signal prenosi od predajnika do prijemnika.

**link** – put prenosa između dvije tačke.

**lokalni oscilator** – sklop koji generiše periodični signal određene amplitude i frekvencije.

## M

**M-arni signal** – signal koji ima jednu od M mogućih vrijednosti koje odgovaraju određenim naponskim stanjima.

**modem** – uređaj koji obavlja postupak modulacije na predajnoj i postupak demodulacije na prijemnoj strani komunikacionog sistema.

**modulacija** – proces u kojem se signal transponuje iz svog osnovnog opsega u viši opseg učestanosti, pogodniji za prenos:

- **amplitudska** – modulacija kod koje je amplituda nosioca direktno proporcionalna modulišućem signalu
- **analogna** – modulacija kod koje je modulišući signal kontinualan
- **fazna** – modulacija kod koje je faza nosioca direktno proporcionalna modulišućem signalu
- **frekvencijska** – modulacija kod koje je učestanost nosioca direktno proporcionalna modulišućem signalu
- **impulsna** – modulacija kod koje je modulišući signal digitalan
- **impulsna amplitudska modulacija** – modulacija kod koje se pod dejstvom informacije mijenja amplituda digitalnog signala
- **impulsna kodna modulacija** – impulsna modulacija koja obuhvata postupke odabiranja, kvantizacije i kodiranja analognog signala



- **impulsna modulacija po trajanju** – modulacija kod koje se mijenja trajanje impulsa tako da ono bude srazmjerno vrijednosti signala informacije
- **impulsna položajna modulacija** – modulacija kod koje se u ritmu promjena vrijednosti signala informacije impuls pomjera u odnosu na položaj kada nema modulacije
- **ugaona** – fazna i frekventijska modulacija.

**modulacioni indeks** – odnos amplitude modulišućeg signala i amplitude nosioca.

**modulator** – sklop u kojem se obavlja proces modulacije.

**modulišućí signal** – slučajni signal koji je nosilac informacije.

**multipleksiranje** – proces istovremenog prenosa više signala po zajedničkom medijumu:

- **frekventijsko** – proces multipleksiranja kod koga se raspoloživi opseg frekvencija potreban za prenos signala podijeli u više grupa kojima se informacije prenose nezavisno jedna od druge
- **kodno** – proces kada se učesnicima u komunikaciji po zajedničkom kanalu dodjeljuje različit jezik sporazumijevanja – kôd
- **vremensko** – način višestrukog korišćenja prenosnog medijuma, kojim se vrijeme prenosa dijeli na segmente.

## N

**nelinearni element** – sklop koji ima nelinearnu prenosnu karakteristiku.

**nosilac** – pomoćni periodični signal kojem se modifikuju neki osnovni parametri, i u koji se u procesu modulacije utiskuje originalni signal.

## O

**obvojnica** – amplitudska promjena AM signala u ritmu promjene modulišućeg signala.

**odabiranje** – proces uzimanja određenog broja vrijednosti iz nekog kontinualnog signala na unaprijed utvrđen način.

**okviri** – jedinice podataka koje prenose računarske mreže, i koje imaju istu osnovnu organizaciju sa upravljačkim bitovima i bitovima podataka.

**osnovni opseg** – prenosni opseg komunikacionih sistema kod kojih prenosni medijum u datom trenutku prenosi samo jednu poruku u digitalnom obliku.

## P

**period** – vrijeme ponavljanja signala.

**prag** – referentni napon bitan za odlučivanje u prijemniku, za regenerisanje digitalnih signala.

**predajnik** – uređaj u kojem se poruka pretvara u signal pogodan za prenos.

**premodulacija** – vrsta AM modulacije kada je amplituda modulišućeg signala veća od amplitude signala nosioca.

**preslušavanje** – pojava miješanja signala iz različitih vodova u telefoniji.

**prijemnik** – uređaj koji obavlja operaciju inverznu onoj u predajniku: transformiše primljeni električni signal u poruku, identičnu onoj koja je nastala na izlazu iz izvora poruke.

**primopredajnik** – uređaj koji može biti i prijemni i predajni uređaj.

**propusni opseg sistema** – širina intervala učestanosti komunikacijskog kanala između predajne i prijemne strane sistema.

## S

**selektivnost** – sposobnost prijemnika da razlikuje signalne stanice koje emituju signale na međusobno bliskim frekvencijama.

**signal** – nosilac informacija u telekomunikacionom sistemu:

- **analogni** – signali koji se kontinualno mijenjaju u vremenu
- **aperiodični** – signali koji se ne ponavljaju u istom obliku poslije određenog vremena
- **binarni** – signali koji imaju dva stanja; obično se označavaju kao stanje logičke jedinice i logičke nule
- **determinisani** – signali koji se mogu definisati vremenskom funkcijom
- **digitalni** – signali koji imaju konačan broj stanja
- **periodični** – signali koji se ponavljaju u istom obliku poslije određenog vremena
- **slučajni** – signal koji se ne može predvidjeti i kojem ne možemo znati vrijednost prije nego što se generiše.

**signalizacioni interval** – vrijeme između dva susjedna značajna trenutka.

**spektar** – skup svih frekvencijskih komponenti signala.

**standard** – javno dostupan dokument koji donosi nadležni organ; njime se utvrđuju propisi, zahtjevi, karakteristike i uputstva koja uređuju neku oblast.

## Š

**šifriranje** – drugi naziv za kriptografiju.

**šum** – neželjeni električni signal, generisan prirodnim putem ili pomoću električnih kola, koji pogoršava performanse komunikacionog kanala:

- **ambijentalni** – šum prostorije u kojoj se govori, i koji se transformacijom preko mikrofona prenosi u telekomunikacioni sistem
- **bijeli** – šum koji sadrži komponente na svim učestanostima
- **intermodulacioni** – šum koji se javlja pri prenosu signala različitih frekvencija istim prenosnim medijumom
- **termički** – šum koji se javlja u svim sistemima čija je apsolutna temperatura ( $T$ ) viša od  $0\text{ °K}$
- **šum kvantizacije** – šum koji se javlja usljed greške kvantizacije
- **šum preslušavanja** – šum koji nastaje usljed elektromagnetne sprege između susjednih bakarnih kablova kojima se prenose informacije.

## T

**telekomunikacije** – emitovanje, prenos ili prijem poruka u vidu signala, korišćenjem žičnih, radijskih, optičkih ili drugih sistema prenosa.

**televizija** – prenos pokretne slike na daljinu.

**transponovani opseg** – viši opseg frekvencija.

## U

**uniformni kôd** – binarni kôd kod koga su kodne riječi iste dužine.

## Z

**značajan trenutak** – vrijeme u kojem se pojavljuje stanje signala.

# 10. Literatura

1. I. S. Stojanović: *Osnovi telekomunikacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1977.
2. M. Filipović: *Osnovi telekomunikacija za II razred elektrotehničke škole*, ISBN 86-17-09225-4, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
3. M. Dukić: *Principi telekomunikacija*, Akademska misao, Beograd, 2014.
4. A. Tanenbaum: *Računarske mreže*, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Mikro knjige, Beograd, 2005.
5. W. Shay: *Komunikacione tehnologije i mreže*, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Kompjuterske biblioteke, 2004.
6. S. Haykin: *Communication Systems*, John Wiley, 2001.
7. *Understanding Telecommunication*, Ericsson Telecom, Telia and Studentlitteratur, 2001.
8. B. Williams, S. Sawyer: *Using Information Technology*, Mc Graw Hill, 2014.
9. Z. Veljović, S. Mujović, V. Radulović: *Praktikum laboratorijskih vježbi na osnovnim akademskim studijama*, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 2011.
10. R. Vojinović, R. Božović: *Osnove elektronike za I razred elektrotehničke škole*, ISBN978-86-303-2368-3, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Podgorica, 2020.
11. G. Marković: *Telekomunikacije II*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2020.
12. I. Klajn, M. Šipka: *Veliki rečnik stranih reči i izraza*, Prometej, Novi Sad, 2006.
13. *Računarski rečnik*, Microsoft Press, ISBN 86-7991-066-x, CET Beograd, 1999.

# Korisni sajтови

1. [www.ucg.ac.me/etf](http://www.ucg.ac.me/etf)
2. [www.telekomunikacije.etf.rs](http://www.telekomunikacije.etf.rs)
3. [www.es.elfak.ni.ac.rs](http://www.es.elfak.ni.ac.rs)
4. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
5. [www.tutorialspoint.com/digital\\_communication](http://www.tutorialspoint.com/digital_communication)
6. [www.mathworks.com/](http://www.mathworks.com/)
7. [www.mathworks.com/help/matlab/ref/repmat.html#bumlfja](http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/repmat.html#bumlfja)
8. [www.electronicsforu.com/electronics-projects/digital-modulation-techniques-simulation-using-matlab](http://www.electronicsforu.com/electronics-projects/digital-modulation-techniques-simulation-using-matlab)
9. [www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30995-digital-modulation-ask-psk-fsk](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30995-digital-modulation-ask-psk-fsk)
10. [www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/ASK-modulation-matlab-code.html](http://www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/ASK-modulation-matlab-code.html)
11. [www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/FSK-modulation-matlab-code.html](http://www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/FSK-modulation-matlab-code.html)
12. [www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/PSK-modulation-matlab-code.html](http://www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/PSK-modulation-matlab-code.html)
13. 193.198.68.210 > dokumenti, Telecommunications 2 – Erasmus + project BENEFIT
14. [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org)
15. [www.tecnoedu.com/Download/Emona-ETT101-SAMPLE-LabManual-rev1.pdf](http://www.tecnoedu.com/Download/Emona-ETT101-SAMPLE-LabManual-rev1.pdf)
16. [www.emona-tims.com/wp-content/uploads/2016/07/BiSKIT-broch-v6\\_1-A4.pdf](http://www.emona-tims.com/wp-content/uploads/2016/07/BiSKIT-broch-v6_1-A4.pdf)
17. [www.globaltechnologies.biz/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/emona-datex-vol1-labmanual-e2-student-rev3\\_1.pdf](http://www.globaltechnologies.biz/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/emona-datex-vol1-labmanual-e2-student-rev3_1.pdf)
18. [www.fer.unizg.hr](http://www.fer.unizg.hr)

