



Osnove telekomunikacija

Prof. dr Igor Radusinović (igorrad@ucg.ac.me)

Prof. dr Enis Kočan (enisk@ucg.ac.me)

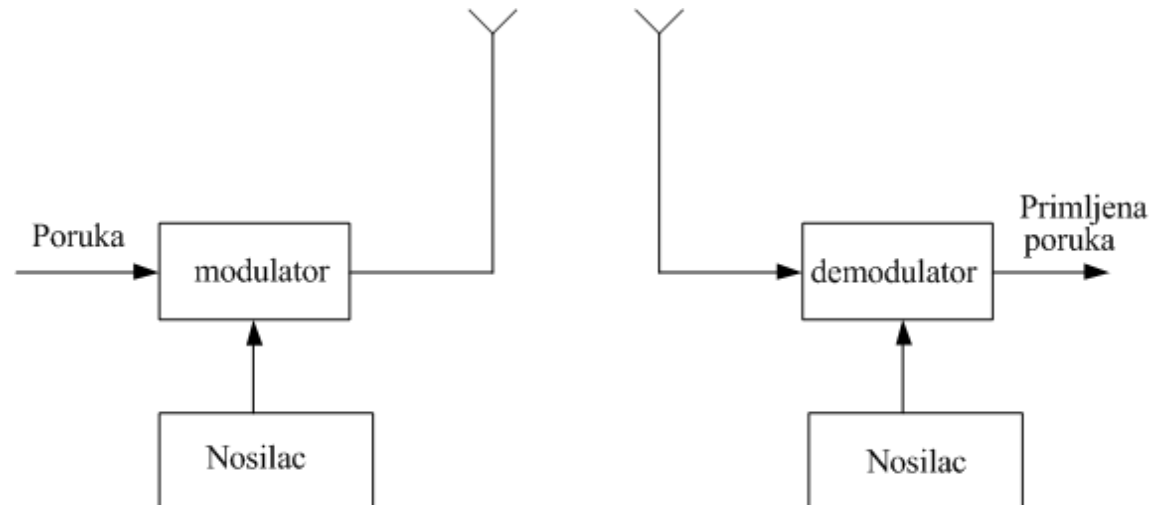
Dr Slavica Tomović (slavicat@ucg.ac.me)

Sadržaj

- **Pojam modulacije**
- Amplitudske modulacije
- Demodulacija amplitudski modulisanih signala
- Ugaone modulacije
- Demodulacija ugaonih modulacija

Pojam modulacije

- Modulacija predstavlja postupak obrade signala u cilju što efikasnijeg prenosa, odnosno prilagođenja signala medijumu za prenos.
- Modulacijom se signal poruke (**modulišući signal**) utiskuje u pomoćni signal (**nosilac**), tako da se neki od parametara nosioca mijenja u skladu sa promjenama poruke
 - Kao pomoćni signal se najčešće koristi prostoperiodična (sinusna) funkcija, a u nekim slučajevima povorka pravougaonih impulsa
 - Signal na izlazu modulatora se označava kao **modulisani signal**



Pojam modulacije

- Na mjestu prijema obavlja se inverzan proces: **iz modulisanog signala treba izvući originalan signal koji nosi poruku**. Takav postupak obrade modulisanog signala naziva se **demodulacija**, a na prijemu dobijeni originalan signal **demodulisani (detektovani) signal**.
- Modulacija i demodulacija predstavljaju dva nerazdvojiva postupka u prenosu signala. Prvi je vezan za predajnik, a drugi za prijemnik.
- Sklop kojim se obavlja modulacija naziva se **modulator**, a sklop u kome se obavlja demodulacija **demodulator**.
- U opštem modelu komunikacionog sistema, modulator je sastavni dio kanalnog koder, a demodulator kanalnog dekoder. Zajedničkim imenom, modulator i demodulator nazivaju se **modem**

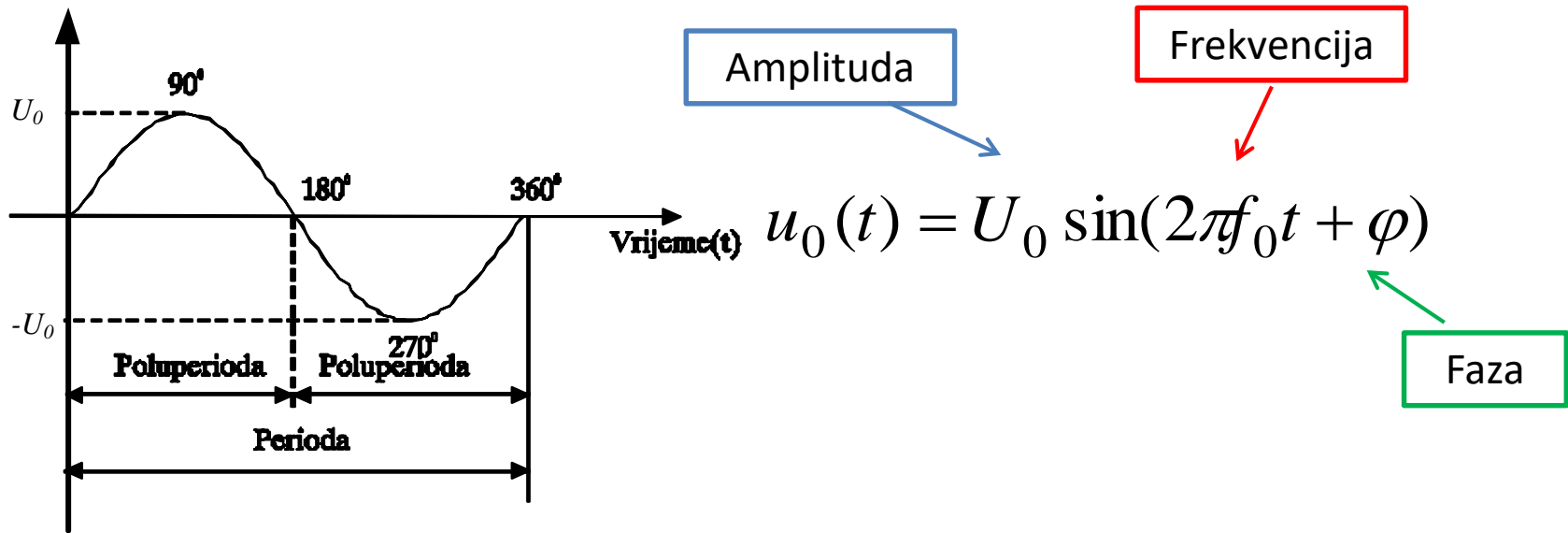
Pojam modulacije

- Postupak modulacije može da se analizira u vremenskom i u frekvencijskom domenu
- Rezultati obrade signala postupkom modulacije mnogo jasnije se uočavaju u domenu učestanosti
- Različiti postupci modulacije imaju različite efekte na oblik signala u domenu učestanosti, kao što su:
 - Pomjeranje spektra signala na više učestanosti
 - Proširenje spektra signala
 - Proširenje i pomjeranje spektra signala.
- Ukoliko se u sistemu ne primjenjuje modulacija, onda kažemo da se signal prenosi **u osnovnom opsegu**
 - Ovakav tip prenosa nedovoljno koristi frekvencijski opseg koji ima na raspolaganju
 - Imaju mnogo manju primjenu nego sistemi prenosa sa modulacijom.

Pojam modulacije

- Obrada signala ima veliki značaj. Neke mogućnosti koje pruža modulacija su:
 - ✓ Radioprenos poruka
 - ✓ Frekvencijski multipleksni ili višekanalni sistemi prenosa
 - ✓ Veća zaštita prenošenog signala od uticaja smetnji u vidu šumova.
 - ✓ Specijalnim postupcima modulacije signali se mogu zabilježiti i uskladištiti, što ima poseban značaj za njihovu reprodukciju u bilo kom vremenu.
- Danas postoji mnogo načina za modulisanje nosilaca koji se mogu klasifikovati u nekoliko grupa. Podjela se može izvršiti prema talasnom obliku modulisanog signala:
 - 1) postupci u kojima je modulisani signal kontinualan
 - 2) postupci kojima se kao rezultat modulacije dobija signal impulsnog talasnog oblik.

Pojam modulacije

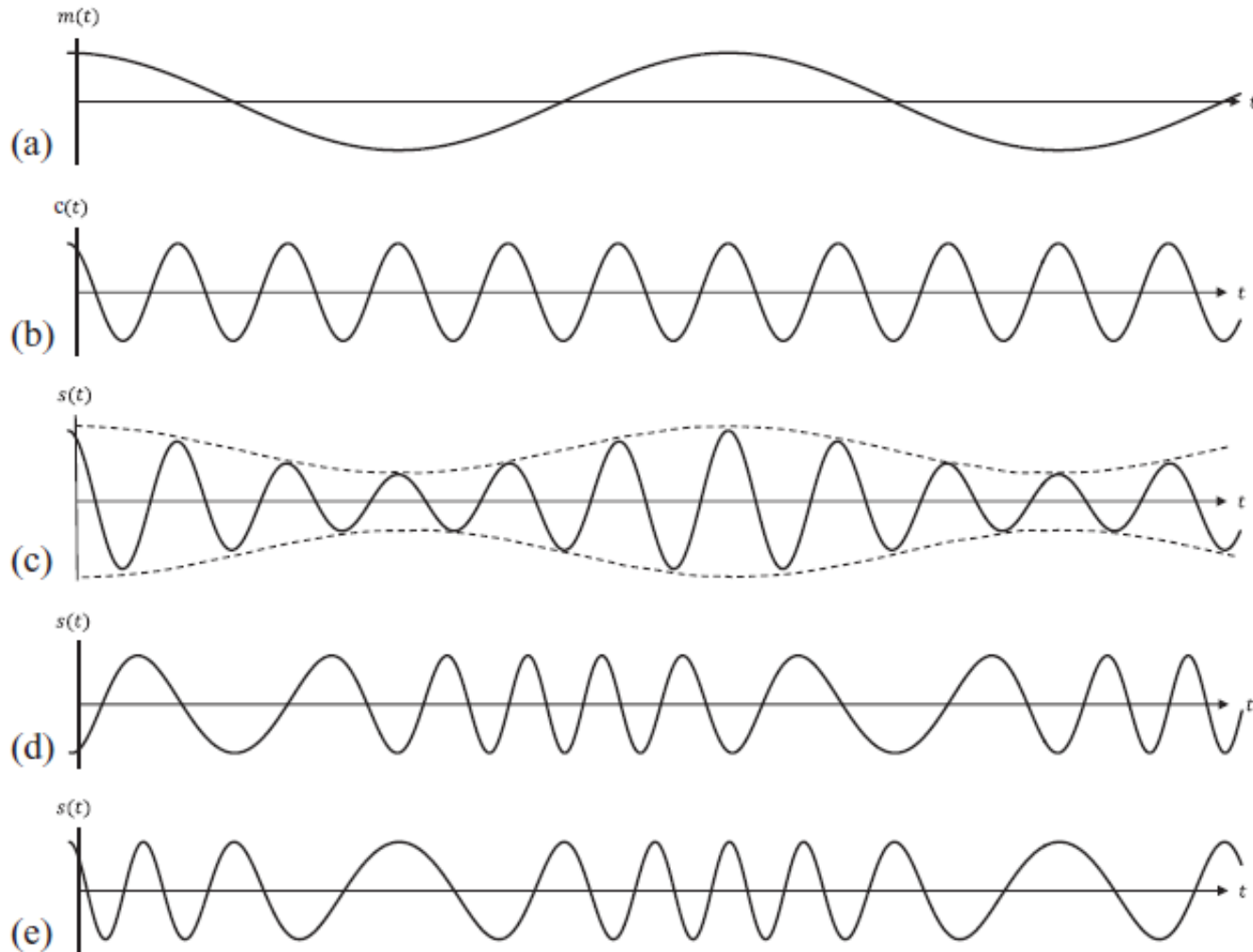


- Kod postupaka u kojima se dobija ***kontinualan*** modulisani signal kao nosilac se koristi signal ***sinusoidalnog talasnog oblika***. On ima tri karakteristična parametra: amplitudu, učestanost i fazu.
 - Na svaki od ovih parametara se može posebno uticati, tako što se izabrani parametar mijenja direktno srazmjerno modulišućem signalu.

Pojam modulacije

- U skladu sa prethodnim, razlikuju se sledeći osnovni tipovi modulacija:
 - a) **Amplitudska modulacija (AM)** - amplituda nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu;
 - b) **Frekvencijska modulacija (FM)** - učestanost nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu;
 - c) **Fazna modulacija (Φ M)** - faza nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu.
- Poslednja dva modulaciona postupka se nazivaju zajedničkim imenom **ugaona modulacija (UM)**.
- Kada je modulišućí signal kontinualan, onda se ove modulacije označavaju kao **analogne modulacije**.

Analogne modulacije



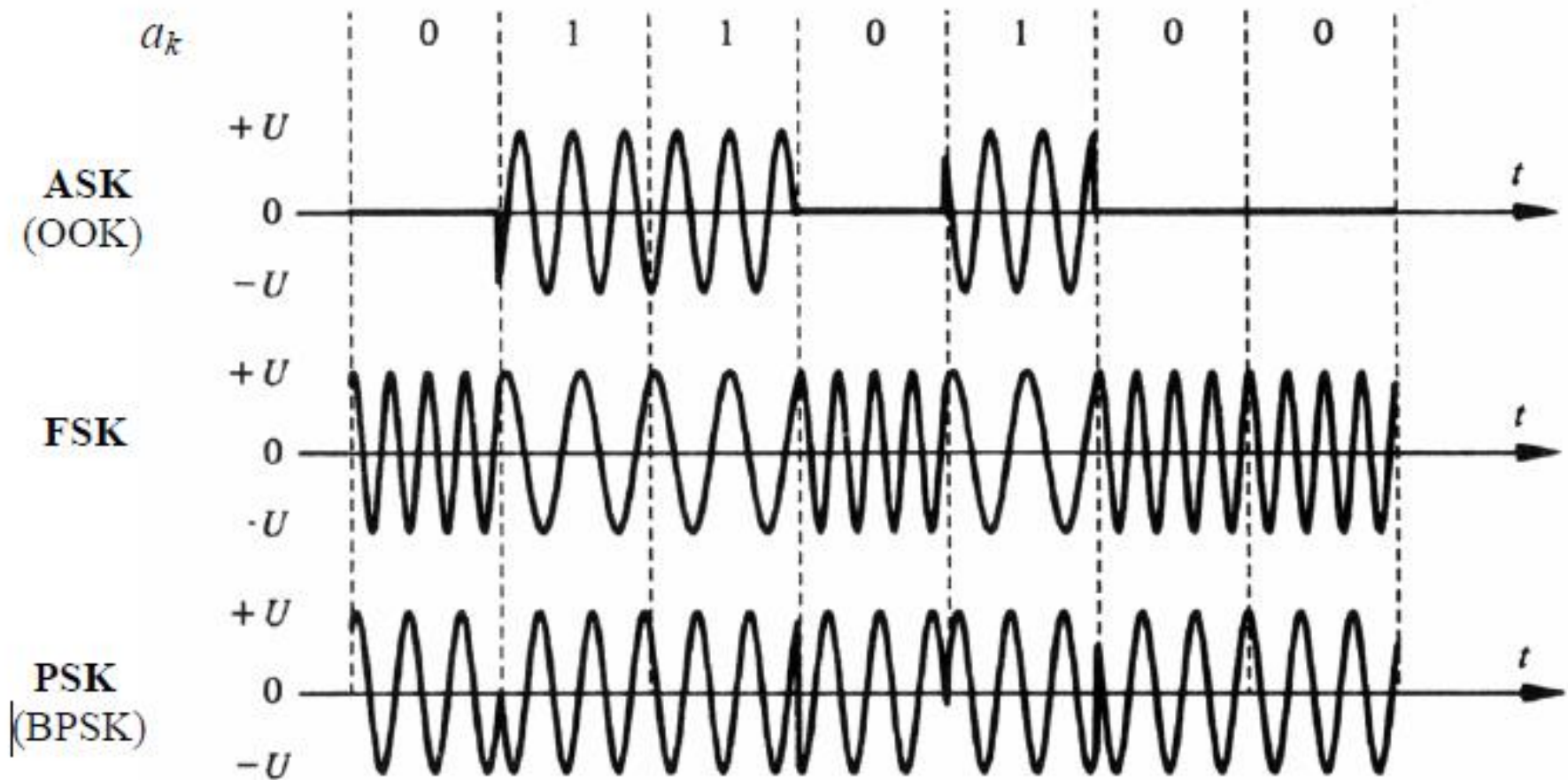
a) Modulišući signal, b) Nosilac, c) AM signal, d) PM signal, e) FM signal

Digitalne modulacije

- Ako je modulišuci signal (poruka) digitalni, onda govorimo o digitalnim modulacijama .
- Postoje različite vrste digitalnih modulacija, a osnovni tipovi su:
 - ASK – Amplitude Shift Keying
 - FSK – Frequency Shift Keying
 - PSK – Phase Shift Keying
- U praksi, poseban značaj danas imaju **višenivoovske amplitudsko-fazne** digitalne modulacije (M-QAM – *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*)

Digitalne modulacije

- Najprostiji slučajevi su kada je modulišući signal povorka binarnih signala



Sadržaj

- Pojam modulacije
- **Amplitudske modulacije**
- Demodulacija amplitudski modulisanih signala
- Ugaone modulacije
- Demodulacija ugaonih modulacija

Amplitudska modulacija

- Spada u grupu **linearnih modulacionih postupaka** u kojima se koristi kontinualni nosilac sinusoidalnog talasnog oblika.
- Kod linearnih modulacionih postupaka modulacija se obavlja translacijom spektra modulišućeg signala bez generisanja novih spektralnih komponenti.
- U procesu ove modulacije amplituda nosioca modifikuje se tako da ona postane vremenska funkcija direktno srazmjerna modulišućem signalu.

- Postoji nekoliko vrsta amplitudski moduliranih signala. Oni se međusobno razlikuju po tome koji se karakteristični dio spektra moduliranog signala prenosi, pa razlikujemo:
 1. AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO)
 2. AM signal sa dva bočna opsega i nosiocem – konvencionalni AM signal (KAM)
 3. AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO)
 4. AM signal sa nesimetričnim bočnim opsezima (AM-NBO).
- Inverzan proces - demodulacija AM signala je takođe linearan i predstavlja translaciju spektra iz domena viših u domen nižih učestanosti.

Produktna modulacija – princip dobijanja AM signala

Kod AM nosilac je kontinualan, oblika: $u_0(t) = U_0 \cos \omega_0 t$

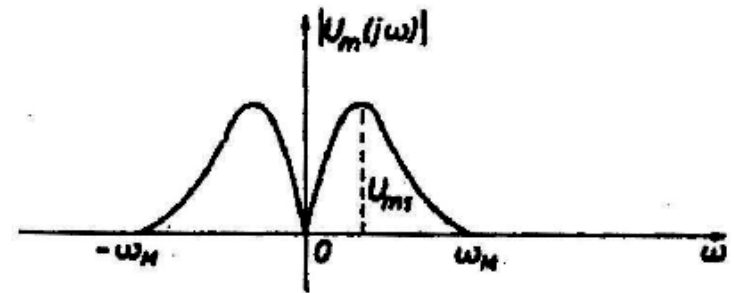
$U_0 = \text{const.}$ je amplituda napona nosioca, $\omega_0 = 2\pi f_0$ njegova kružna učestanost.

Neka je sa $u_m(t)$ označen električni ekvivalent poruke (modulišući signal).

Pretpostavimo da modulišući signal ima sledeće osobine:

- da je njegova srednja vrijednost jednaka nuli;
- da je njegov spektar ograničen učestanošću ω_M

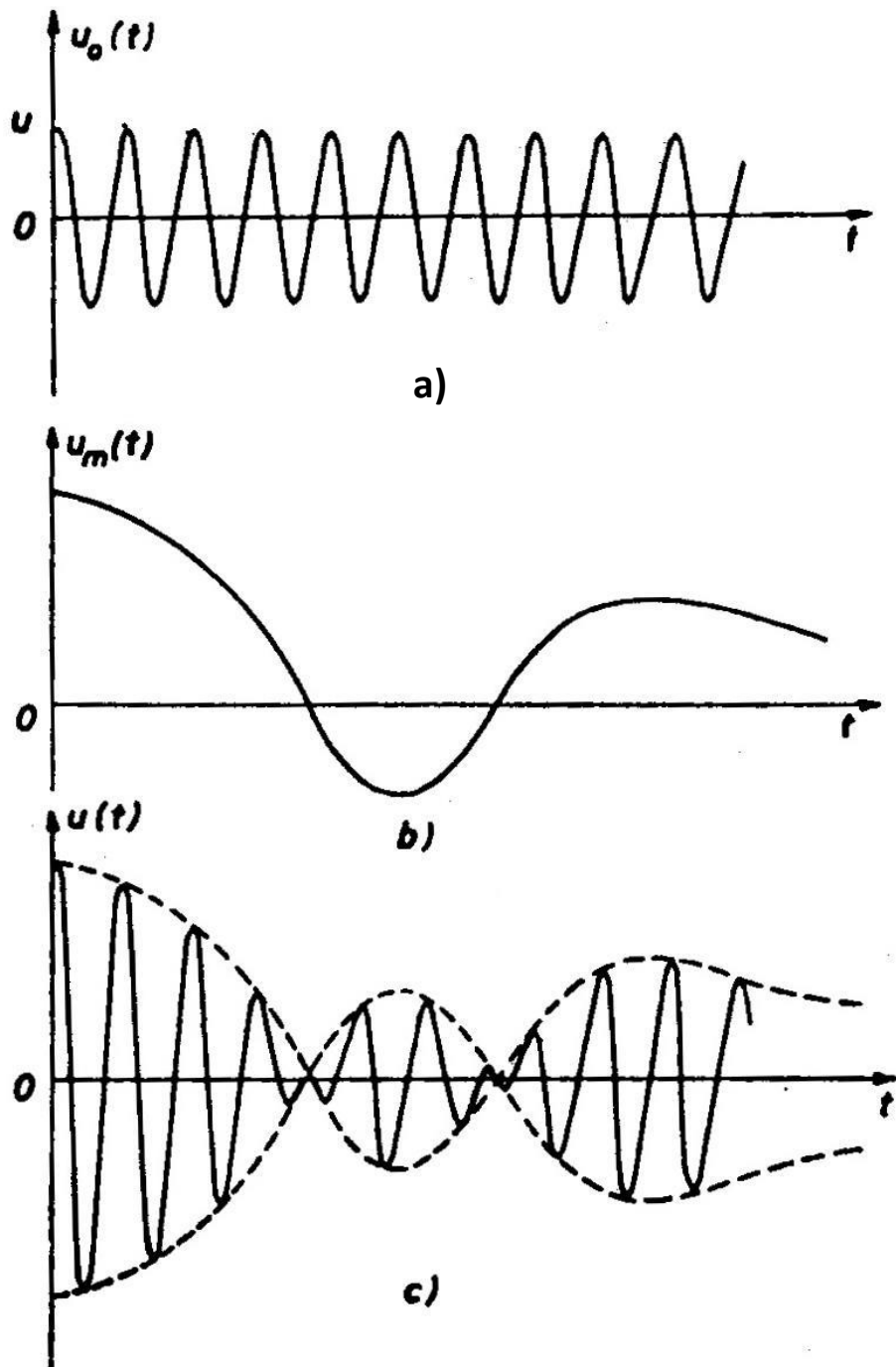
$$U_m(j\omega) = \begin{cases} U_m(j\omega) & |\omega| < \omega_M \\ 0 & |\omega| > \omega_M \end{cases}$$



Izraz za amplitudski modulirani signal je oblika:

$$u_{AM}(t) = k_U u_m(t) \cos \omega_0 t$$

k_U predstavlja neku konstantu proporcionalnosti. Veličina $k_U u_m(t)$ može da se shvati kao promjenljiva amplituda koja nosi poruku.



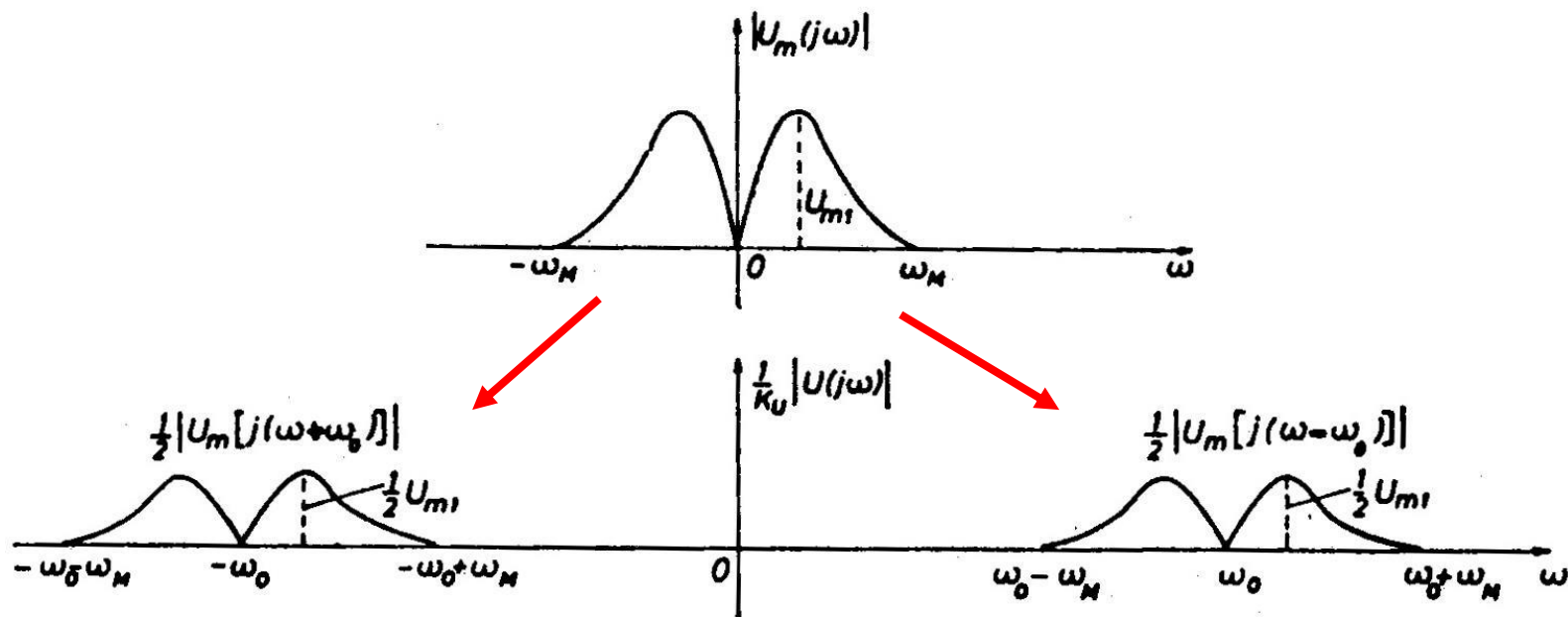
- Na slici su prikazane funkcije koje predstavljaju nosilac, modulišući i modulisani signal.
- Uočava se da je anvelopa modulisanog signala direktno srazmjerna modulišućem signalu.
- Iz izraza za **AM signal** vidi se da se on dobija **kao proizvod dvije funkcije**: $k_u u_m(t)$ i $\cos \omega_0 t$. Stoga se modulacija zasnovana na ovom principu naziva **produktna modulacija**, a sklopovi pomoću kojih se ona realizuje nazivaju se **produktivnim modulatorima**.

Slika: a) Nosilac b) modulišući signal
c) modulisani signal

- Spektar dobijenog AM signala (primjenom Fourierove transformacije):

$$U(j\omega) = \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega - \omega_0)] + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega + \omega_0)]$$

- Zaključujemo da se množenjem signala i nosioca u vremenskom domenu vrše dvije translacije u frekvencijskom domenu, jedna za vrijednost učestanosti nosioca ω_0 i druga za $-\omega_0$.



Slika: Na gornjoj slici je spektralna gustina amplituda modulišućeg signala $u_m(t)$, a na donjoj spektralna gustina amplituda modulisanog signala $u(t)/k_U = u_m(t)\cos \omega_0 t$

Realizacija produktne modulacije

- Produktna modulacija predstavlja osnov za dobijanje amplitudski moduliranih signala. Produktna modulacija se može realizovati na tri načina:
 1. Pomoću nelinearnih sklopova
 2. Pomoću prekidačkih sklopova
 3. Metodom varijacije parametara (zasniva na mogućnosti da se neki od parametara linearnog kola (R, L ili C) mijenja srazmerno modulišućem signalu)

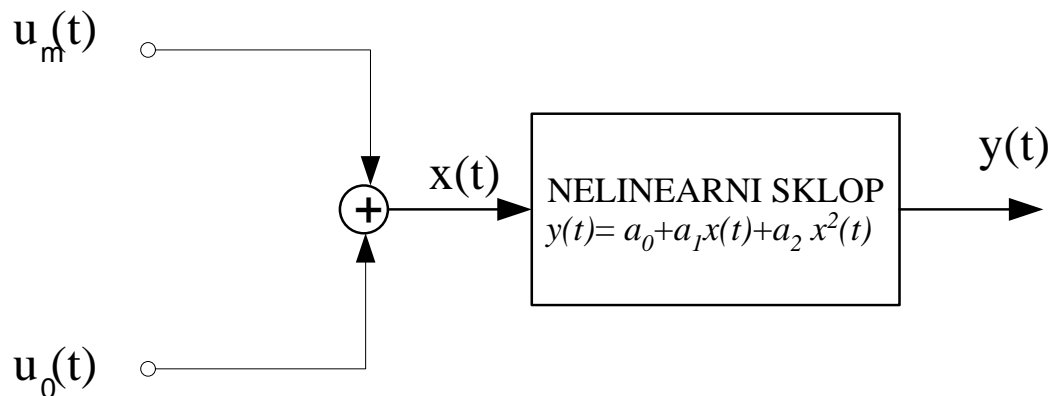
1. Realizacija produktne modulacije pomoću nelinearnih sklopova

- Svaki električni sklop koji posjeduje nelinearnu karakteristiku "izlaz-ulaz" može da posluži kao produktni modulator.
- Pretpostavimo zato da imamo neki nelinearan sklop čija je karakteristika "izlaz - ulaz " data polinomom oblika:

$$y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + \dots$$

U ovoj relaciji $x(t)$ predstavlja ulazni, a $y(t)$ izlazni signal, dok su $a_0, a_1, a_2 \dots$ konstante.

- Da bi razmatranje bilo lakše, pretpostavimo kvadratnu nelinearnu karakteristiku.

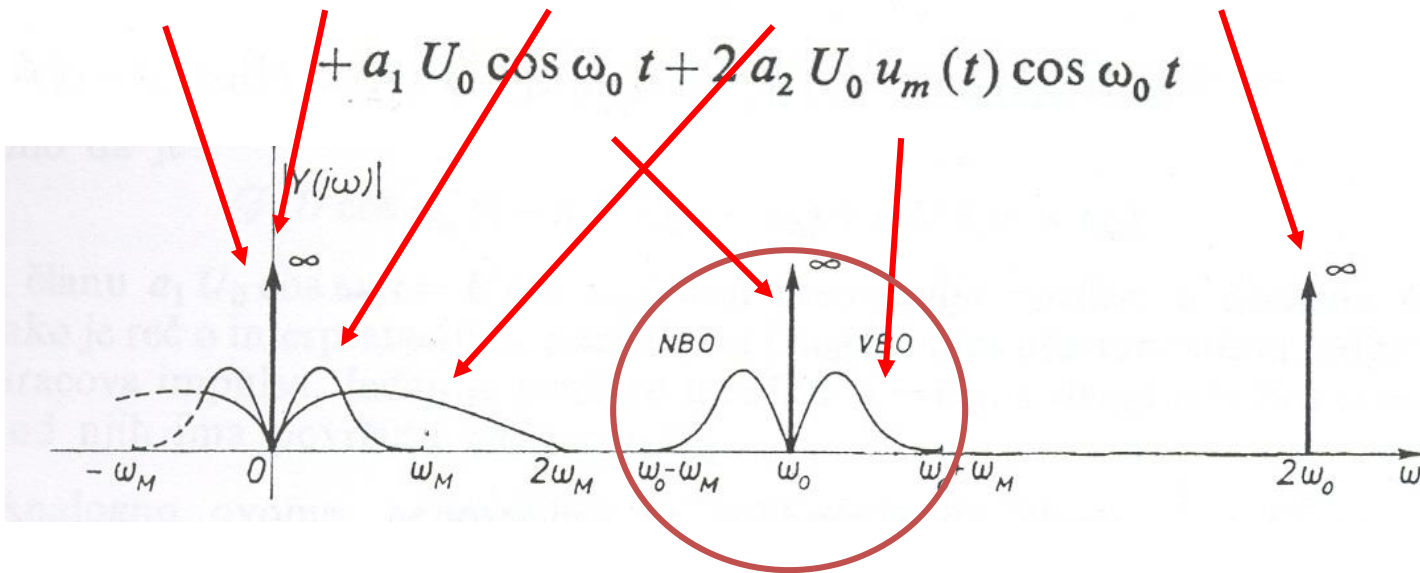


Slika: Blok-šema za dobijanje AM pomoću nelinearnog sklopa

- Neka na ulaz nelinearnog sklopa dolazi zbir modulišućeg signala i prostoperiodičnog nosioca. Tada se na izlazu ovog sklopa dobija signal:

$$\begin{aligned}
 y = y(t) &= a_0 + a_1 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)] + a_2 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)]^2 = \\
 &= a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 + a_1 u_m(t) + a_2 u_m^2(t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos 2 \omega_0 t + \\
 &\quad + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + 2 a_2 U_0 u_m(t) \cos \omega_0 t
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y = y(t) &= a_0 + a_1 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)] + a_2 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)]^2 = \\
 &= a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 + a_1 u_m(t) + a_2 u_m^2(t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos 2\omega_0 t + \\
 &\quad + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + 2a_2 U_0 u_m(t) \cos \omega_0 t
 \end{aligned}$$



- Prva dva člana predstavljaju jednosmjernu komponentu (u spektru Diracov impuls na učestanosti 0);
- Treći član predstavlja modulišući signal;
- Četvrti član je kvadrat modulišućeg signala koji ima dva puta širi spektar;
- Peti član je drugi harmonik nosioca (Diracov impuls na učestanosti $2\omega_0$);
- Šesti član predstavlja nosilac;
- **Poslednji član je korisni produkt modulacije (AM signal);**
- **Znači, svi članovi sem poslednjeg predstavljaju parazite u slučaju koji posmatramo.**

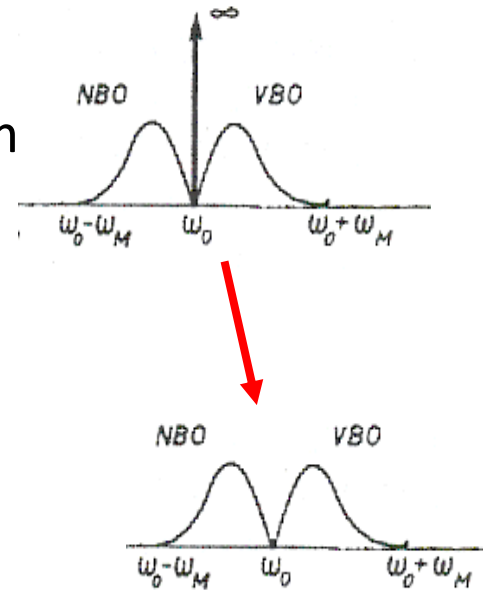
- Da bi se dobio amplitudski modulisan signal potrebno je iz spektra izlaznog signala izdvojiti korisni član. To se jednostavno može ostvariti pomoću filtra propusnika opsega učestanosti u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0 + \omega_M)$, uz uslov da ne postoji preklapanje ove komponente sa ostalim, tj.:

$$\omega_0 - \omega_M \geq 2\omega_M \quad \text{tj.} \quad \omega_0 \geq 3\omega_M$$

- U sredini opsega postoji nosilac, tj. filter propušta dva bočna opsega i nosilac. Nemoguće je napraviti filter koji bi izdvojio samo dva bočna opsega, a ne i nosilac.
- Prisustvo nosioca ne utiče na poruku, ali je višak sa stanovišta snage. Ova kombinacija: **nosilac, niži i viši bočni opseg naziva se konvencionalni amplitudski modulisani signal (KAM)**.
- Za nelinearni sklop reda 3 povećava se broj komponenti (pored ovih navedenih za 2, još 6 novih), ali ni jedna od njih ne predstavlja korisnu komponentu.
- ✓ Zaključak: Za dobijanje AM signala pomoću nelinearnih sklopova dovoljna je nelinearnost reda 2.

AM signali sa dva bočna opsega

- AM-2BO signal se može dobiti pomoću sklopova sa nelinearnom karakteristikom, pomoću prekidačkih sklopova i kola sa varijacijom parametara.
- **Balansni modulatori** omogućavaju dobijanje AM-2BO signala koji ne sadrži nosilac.
- Dva tipa modulatora:
 1. **balansni nelinearni modulator**
 - Sadrži 2 identična nelinearna kola, u izbalansiranim šemama, koja omogućavaju da se potisne nosilac
 2. **balansni prekidački modulator**
 - Sastoje se od prekidačkih elemenata (dioda) u izbalansiranim električnim šemama, tako da se dobije signal sa dva bočna opsega, bez nosioca.



Konvencionalni AM (KAM) signal

- Signali koji u sebi sadrže dva bočna opsega i nosilac.
- KAM signal može da se predstavi izrazom:

$$u(t) = [U_0 + k_U u_m(t)] \cos \omega_0 t$$

- Izraz u uglastoj zagradi može se shvatiti kao **amplituda** prostoperiodične funkcije $\cos \omega_0 t$. Ona se sastoji od konstante U_0 i člana $k_U u_m(t)$ koji je direktno srazmjeran modulišućem signalu.
- KAM signal može da se dobije na **tri načina**:
 - modulator se realizuje pomoću nelinearnog sklopa kvadratne karakteristike na čiji ulaz se dovodi suma modulišućeg signala i nosioca
 - pomoću poluprovodničkih dioda na čiji ulaz se dovodi suma modulišućeg signala i nosioca
 - parametarskom modulacijom

$$u_{KAM}(t) = U_0 \cos \omega_0 t + k_U u_m(t) \cos \omega_0 t = [U_0 + k_U u_m(t)] \cos \omega_0 t$$

Modulišići signal se može napisati i u normalizovanoj formi:

$$u_m(t) = U_m m(t)$$

$$U_m = |u_m(t)|_{\max}$$

$$m(t) \leq 1$$

Pa se KAM signal može zapisati:

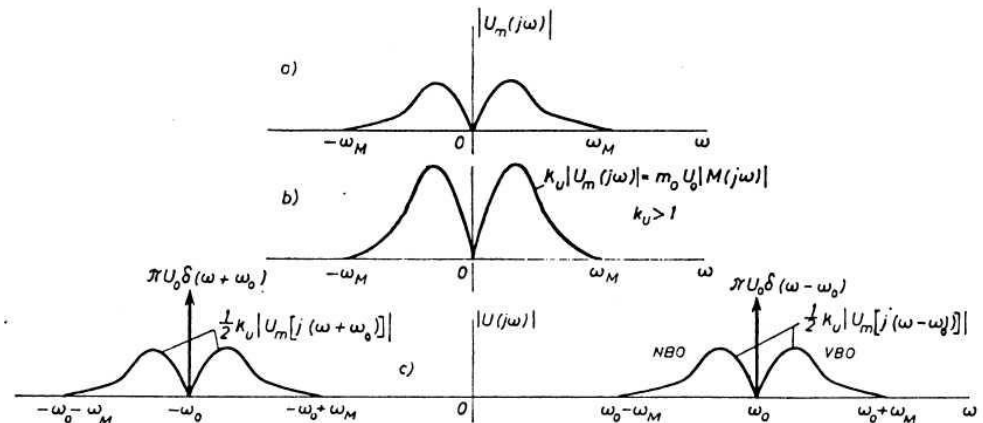
$$u_{KAM}(t) = U_0 \left[1 + \frac{k_U U_m}{U_0} m(t) \right] \cos \omega_0 t$$

$$k_U U_m = \Delta U_0$$

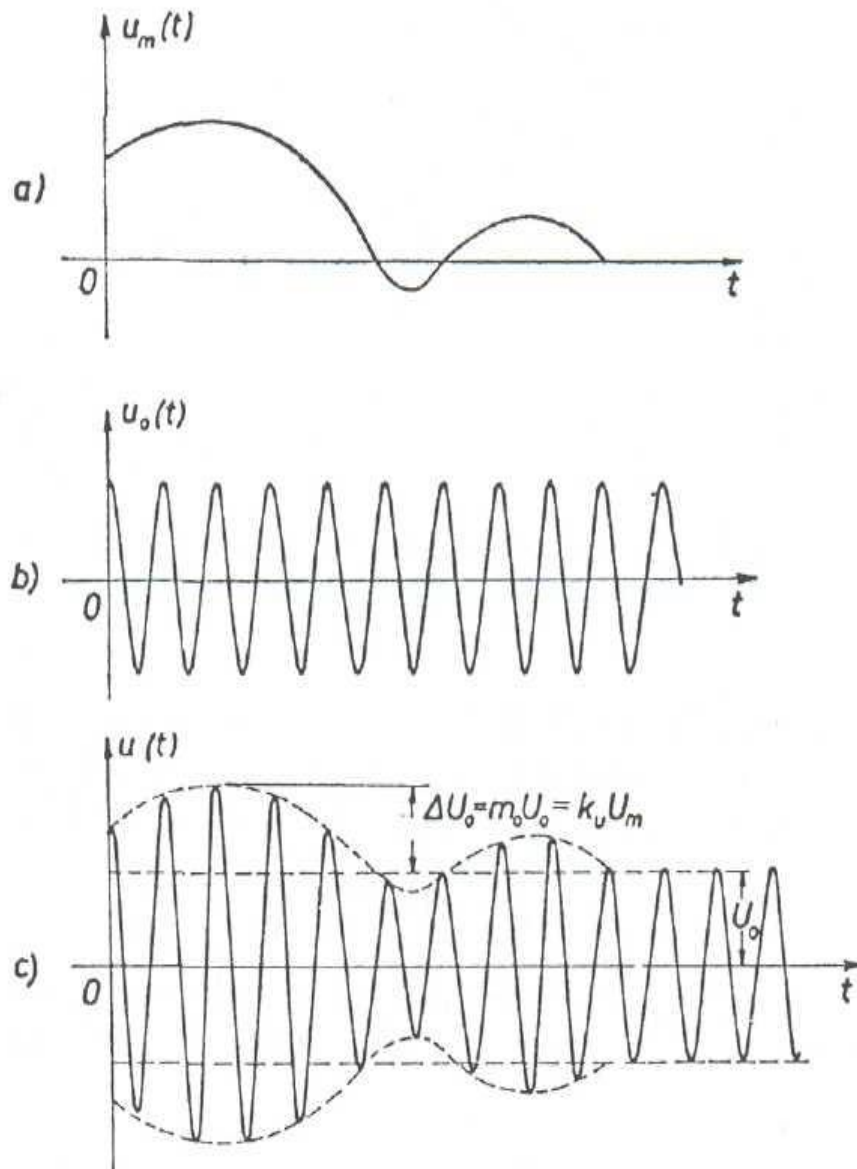
$$\frac{k_U U_m}{U_0} = \frac{\Delta U_0}{U_0} = m_0$$

Iz prethodnog se dobija da je:

$$u_{KAM}(t) = U_0 \left[1 + \frac{\Delta U_0}{U_0} m(t) \right] \cos \omega_0 t = U_0 [1 + m_0 m(t)] \cos \omega_0 t$$



- $u_m(t)$ je modulišuci signal
- nosilac je oblika $u_0(t)=U_0\cos\omega_0t$
- $u(t)$ je talasni oblik za KAM signal
- ΔU_0 je maksimalna promjena amplitude modulisanog signala koja je k_u puta veća od maksimalne vrijednosti modulišućeg signala
- m_0 izražava maksimalnu relativnu promjenu amplitude modulisanog signala i naziva se **stepen (indeks) modulacije** (m_0 se izražava i u procentima).



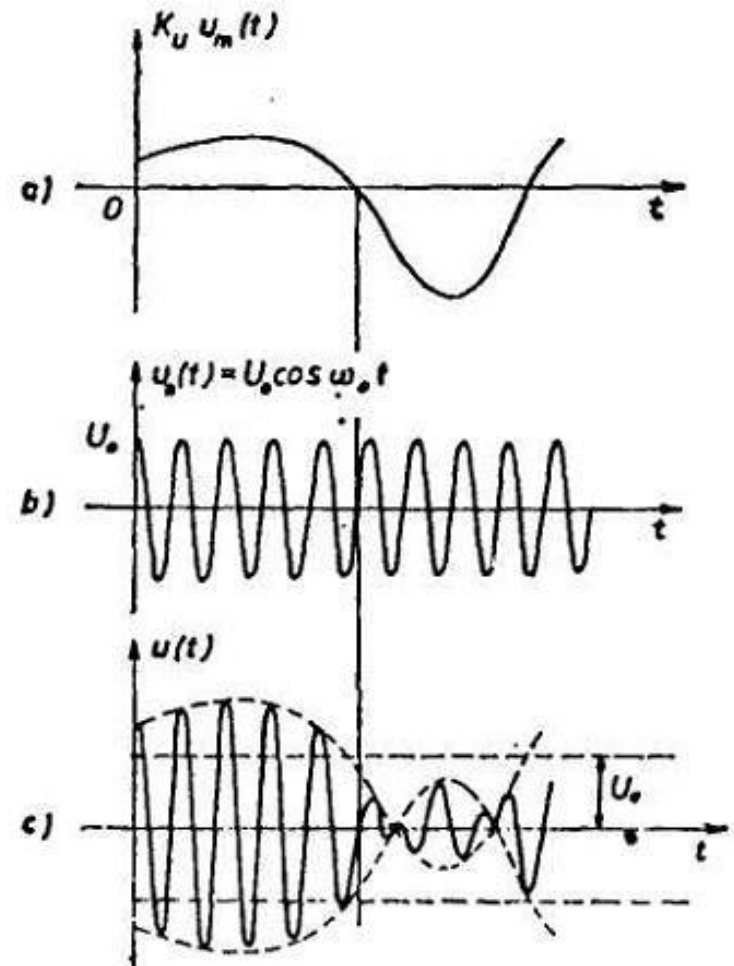
Slika: Talasni oblici: a) modulišuci signal; b) nosilac; c) amplitudski modulisani signal KAM tipa

- Stepen iskorišćenja KAM signala je najveći onda kada je indeks modulacije $m_0=1$, i on iznosi $1/6$. Znači, $5/6$ snage predajnika emituje se samo da bi demodulacija, odnosno prijemnik bili jednostavniji.

- Za ispravnu demodulaciju KAM signala mora biti zadovoljen uslov da je:

$$U_0 + k_U u_m(t) \geq 0$$

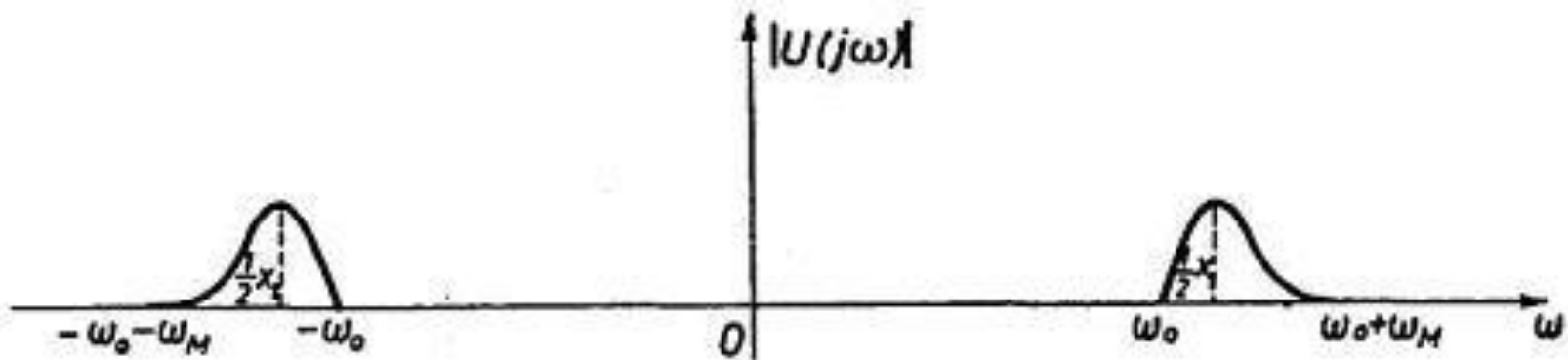
- U slučaju da nije ispunjen, talasni oblik modulisanog signala je kao na slici. Anvelopa modulisanog signala više nije srazmjerna modulišućem signalu. Za takav modulisani signal se kaže da je **premodulisan**.



Slika: a) modulišućí signal, b) nosilac, c) premodulisani KAM signal

AM signali sa jednim bočnim opsegom

- AM-2BO signali u svakom od dva dobijena bočna opsega sadrže prenošenu poruku. Stoga se za prenos poruka može koristiti samo jedan bočni opseg.
- Prednosti:
 - Sistem za prenos može da ima propusni opseg dva puta uži od opsega koji zahtijeva AM-2BO i KAM signal
 - Snaga izlaznog stepena predajnika se ne troši na pojačanje nosioca i drugog bočnog opsega.



Slika: Spektralna gustina amplituda signala koji ima samo viši bočni opseg

- Analitički izraz koji jednoznačno u vremenskom domenu predstavlja amplitudski modulirani signal kojim se prenosi **poruka** opisana funkcijom $x(t)$ i čiji spektar ima samo **viši bočni opseg**, je:

$$u(t) = \frac{1}{2} x(t) \cos \omega_0 t - \frac{1}{2} \hat{x}(t) \sin \omega_0 t$$

- Slično, izraz koji predstavlja **niži bočni opseg**, je:

$$u(t) = \frac{1}{2} x(t) \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \hat{x}(t) \sin \omega_0 t$$

- $\hat{x}(t)$ predstavlja **Hilbertovu transformaciju** signala $x(t)$. Dobija se kada se signal $x(t)$ propusti kroz sklop čija je funkcija prenosa:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\chi(\omega)} = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j & \text{za } \omega > 0 \\ e^{j\frac{\pi}{2}} = j & \text{za } \omega < 0 \end{cases}$$

$$H(j\omega) = -j \operatorname{sgn} \omega$$

- Impulsni odziv Hilbertovog transformatora je:

$$h(t) = \frac{1}{\pi t}$$

- Anvelopa AM-1BO signala nije proporcionalna modulišućem signalu $x(t)$
- AM-1BO je istovremeno modulisan i po amplitudi i po fazi, tj. riječ je o hibridnoj amplitudsko-faznoj modulaciji

AM-NBO signal

- Spektar KAM signala sastavljen je od dva bočna opsega i nosioca. Ovakav signal može da se obradi tako da sadrži **jedan bočni opseg, nosilac i dio drugog bočnog opsega**. Takav signal naziva se ***AM signal sa nesimetričnim bočnim opsezima*** ili ***AM signal sa djelimično potisnutim bočnim opsegom***. Pošto sadrži jedan bočni opseg, sadrži i prenošenu poruku.
- Prednosti ovakvog prenosa poruka:
 - širina propusnog opsega sistema za prenos je manja nego u slučaju kada se prenose oba bočna opsega (obično se uzima proširenje od 25%)
 - zahvaljujući ne tako velikom povećanju opsega, izgradnja filtra nije kritična.
 - prenos nosioca ima smisla ako je u pitanju veliki broj prijemnika, jer se demodulacija može izvesti na prost način.
 - ovakav sistem prenosa je zastupljen u radio-difuznim telekomunikacijama, pri analognom prenosu televizijskog signala.

Sadržaj

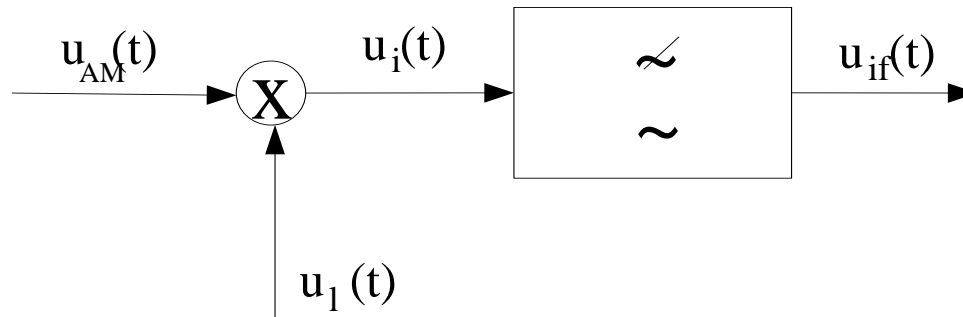
- Pojam modulacije
- Amplitudske modulacije
- **Demodulacija amplitudski moduliranih signala**
- Ugaone modulacije
- Demodulacija ugaonih modulacija

Demodulacija amplitudski modulisanih signala

- Demodulacija je proces inverzan modulaciji.
- Cilj demodulacije je da se amplitudski modulisani signal tako obradi da se iz njega dobije originalan modulišući signal.
- U zavisnosti od toga da li se na prijemu koristi pomoćni signal za proces demodulacije, razlikuje se:
 1. **Sinhrona (koherentna ili produktna) demodulacija** (primjenljivo za sve tipove amplitudskih modulacija i podrazumijeva korišćenje pomoćnog signala na prijemu)
 2. **Asinhrona demodulacija** (primjenljivo za KAM modulaciju, nije potreban pomoćni signal na prijemu).
- SINHRONA DEMODULACIJA:
- **Produktni modulator može da bude i produktni demodulator. Demodulisani signal će imati više neželjenih komponenti, ali se one mogu eliminisati filtrom.**

Sinhrona demodulacija

- Postupak demodulacije u kojoj se pomoćni signal generiše iz lokalnog oscilatora naziva se **sinhrona, koherentna, produktna** ili **homodinska** demodulacija.



- $u_1(t)$ je pomoćni signal koji aproksimira funkciju $1/\cos\omega_0 t$. Uloga NF filtra je da blokira komponente oko učestanosti nosioca $2\omega_0$, koje se javljaju nakon produktne demodulacije. Neka je $u_1(t)$ oblika:

$$u_1(t) = U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

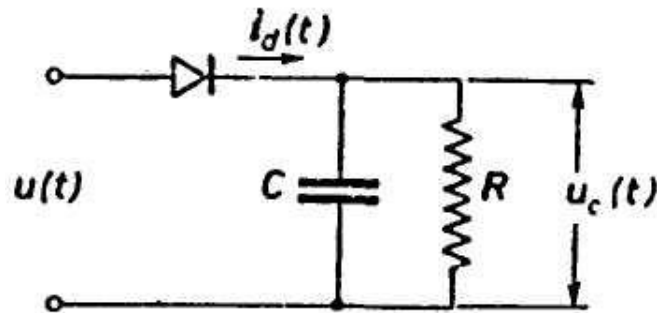
- Ako se na ulaz demodulatora dovodi AM signal, opšteg oblika, na izlazu će se dobiti signal oblika:

$$u_i(t) = u_{AM}(t) u_1(t)$$

- Pri sinhronoj demodulaciji **KAM** signala neophodno je da nosilac na strani predaje i lokalni pomoćni nosilac na strani prijema imaju iste učestanosti, i da njihova razlika faza bude različita od $\pi/2$. U idealnom slučaju nosioci su potpuno fazno sinhronizovani.
- Za demodulaciju signala **AM-2BO** potrebno je da nosilac na strani predaje i napon lokalnog oscilatora u prijemu imaju istu učestanost, i da njihova razlika faza bude različita od $\pi/2$. Najveća vrijednost izlaznog signala je kada su nosioci u fazi.
- Obavezan uslov za demodulaciju **AM-1BO** signala je potpuna frekvencijska i fazna sinhronizacija nosilaca na predaji i prijemu.
- Kao i za AM-1BO signale, i za AM-NBO signale, obavezan uslov za demodulaciju **AM-NBO** signala je potpuna frekvencijska i fazna sinhronizacija nosilaca na predaji i prijemu.

Asinhrona demodulacija

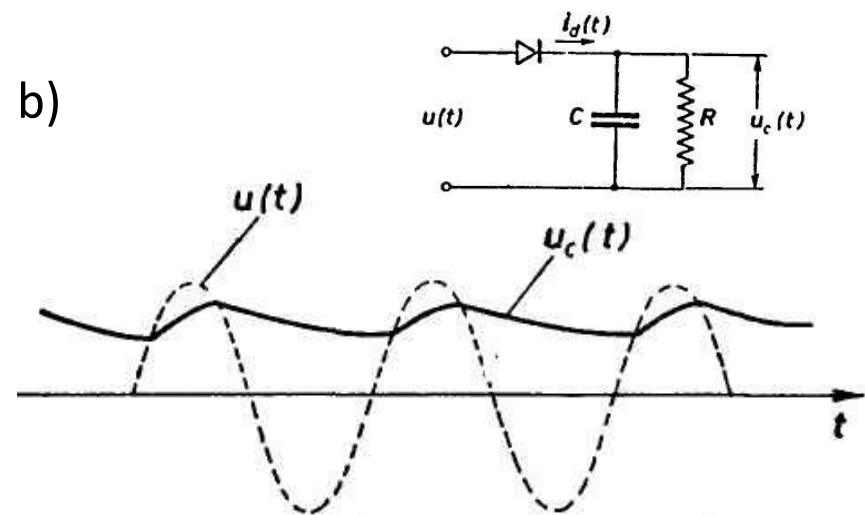
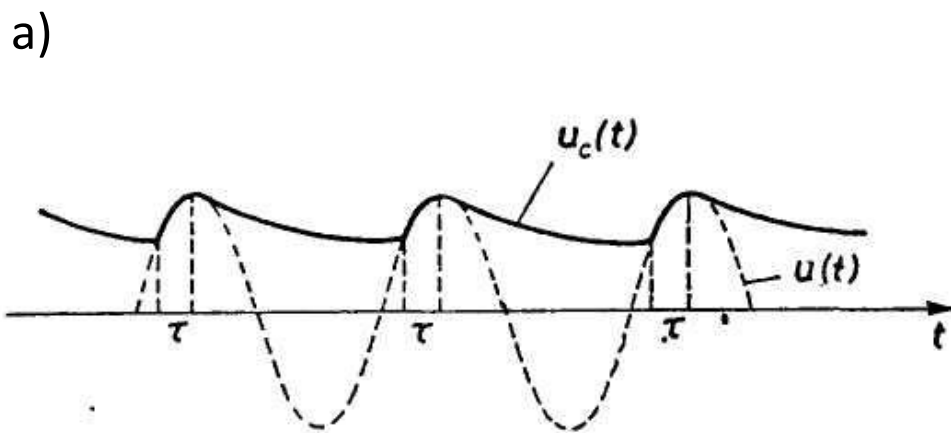
- **Demodulacija** - operacija obrnuta modulaciji u kojoj se iz *produkata modulacije* rekonstruiše modulišući signal.
- **Detekcija** - reprodukcija modulišućeg signala koja se ostvaruje pomoću asimetrično provodnog sklopa bez upotrebe lokalnog oscilatora.
- **Detektor anvelope** je sklop koji bez upotrebe lokalnog oscilatora na svom izlazu daje signal identičan anvelopi ulaznog signala.
- Koristi se za ekstrakciju modulišućeg signala iz KAM signala, za druge vrste AM signala ne može da se koristi.
- Detektor anvelope je vrlo jednostavan, realizuje se pomoću diode i RC kola.



Slika: Detektor anvelope

Princip rada:

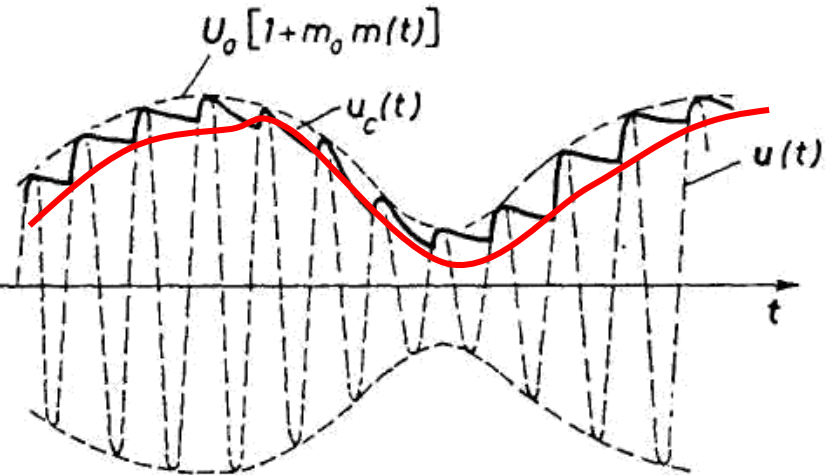
- Neka je ulaz detektora anvelope pobuđen **nemodulisanim nosiocem**. Neka je dioda idealna (otpornost u smjeru propuštanja je nula, a u obrnutom smjeru je beskonačno velika).
- Kada dioda provodi, kondenzator C se vrlo brzo napuni i napon na njegovim krajevima dostiže maksimalnu vrijednost ulaznog sinusoidalnog napona.
- Kada dioda ne provodi, kondenzator C se prazni preko otpornika R .
- Struja diode $i_d(t)$ postoji samo u vremenskim intervalima τ . Talasni oblik napona $u_c(t)$ zavisi od vremenske konstante RC . Što je ona veća, to je $u_c(t)$ bliži maksimalnoj vrijednosti U_0 napona $u(t)=U_0\cos\omega_0t$. Zato se ovaj sklop još naziva i **vršni detektor**.



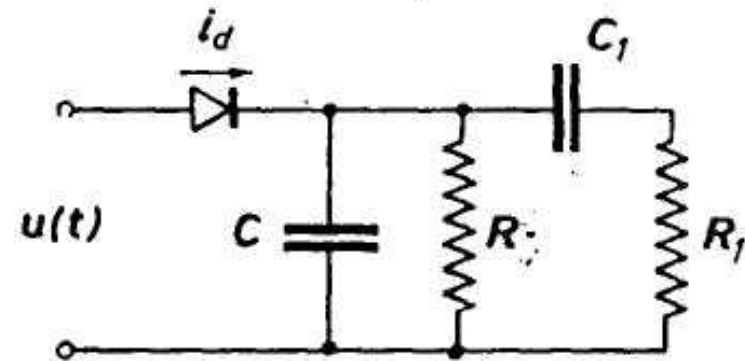
Slika: Sinusoidalan napon $u(t)$ na ulazu u detektor anvelope i napon $u_c(t)$ na krajevima kondenzatora C , a) uz uslov da je dioda idealna, b) u slučaju kad dioda nije idealna

- Kada se na ulaz detektora pobudi amplitudski modulisanim signalom tipa **KAM**, odvijaće se isti ovaj proces, samo se sada mijenja amplituda ulaznog signala. Uz uslov da je vremenska konstanta RC povoljno izabrana, napon $u_c(t)$ će se mijenjati tako da prati ove promjene.

Slika: Amplitudski modulisan signal tipa KAM (isprekidano izvučena kriva) i detektovani napon $u_c(t)$ (puno izvučena kriva)



- Izlazni napon prati anvelopu signala sa malim promjenama. Upotrebom jednostavnog $R_1 C_1$ filtra, nepoželjne komponente mogu da se odstrane, tako da se na krajevima otpornika R_1 dobija željeni detektovani napon.
- Uslov: učestanost nosioca ω_0 mora da bude mnogo veća od učestanosti ω_M kojom je ograničen spektar modulišućeg signala.



Slika: Detektor anvelope sa jednostavnim filtarskim kolom $R_1 C_1$

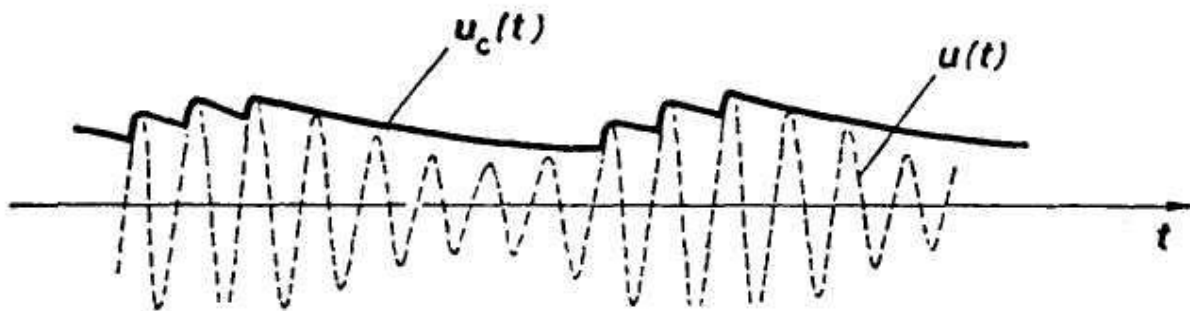
Odstupanja od idealnog slučaja:

1. Dijagonalno odsijecanje

2. Odsijecanje negativnih vrhova

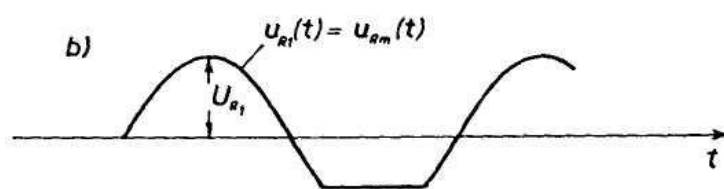
1. Javlja se u slučaju kada RC konstanta nije dobro izabrana. Ako je vrijednost ove konstante suviše velika, kondenzator ne može dovoljno brzo da se isprazni kroz otpornik R, pa napon na njemu ne slijedi tok anvelope ulaznog modulisanog signala, tj. izlazni detektovani signal postaje izobličen.

- Ova pojava se naziva **dijagonalno odsijecanje**.



2. Druga vrsta izobličenja do koje može da dođe u detektoru anvelope je **odsijecanje negativnih vrhova**.

Zavisi od odnosa jednosmjerne komponente struje koja protiče kroz diodu i vrijednosti od nazmjenične komponente struje



Sadržaj

- Pojam modulacije
- Amplitudske modulacije
- Demodulacija amplitudski moduliranih signala
- **Ugaone modulacije**
- Demodulacija ugaonih modulacija

Ugaona modulacija

- Ugaona modulacija spada u **nelinearne postupke modulacije**
- Dobijeni modulirani signal je kontinualan.
- Kao i u slučaju amplitudske modulacije, nosilac ima sinusoidalan talasni oblik.
- U postupku ugaone modulacije amplituda nosioca ostaje nepromijenjena, a njegov ugao se modifikuje modulišućim signalom i postaje karakterističan parametar u kome je sadržana prenošena poruka.
- Nosilac:

$$u_0(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$$

AM → U_0 FM → $\omega_0 t$ PM → $\varphi(t)$

- Opšti izraz za ugaono modulisan signal glasi:

$$u(t) = U_0 \cos \Phi(t) = U_0 \cos [\omega_0 t + \varphi(t)] = U_0 \cos \{\omega_0 t + \gamma [u_m(t)]\}$$

- Ugao

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \varphi(t) = \omega_0 t + \gamma [u_m(t)] = \Phi_0 + \gamma [u_m(t)] = \Phi_i$$

naziva se **trenutna faza**.

- Veličina:

$$\varphi(t) = \gamma [u_m(t)] = \delta \Phi_i$$

koja predstavlja odstupanje trenutne faze Φ_i od vrijednosti $\Phi_0 = \omega_0 t$ zove se **trenutna devijacija faze**.

- Izvod trenutne faze $\Phi_i = \Phi(t)$ po vremenu:

$$\omega_i = \frac{d\Phi_i}{dt} = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

naziva se **trenutna kružna učestanost** ugaono modulisanog signala.

- Odstupanje trenutne kružne učestanosti ω_i od kružne učestanosti nosioca ω_0 :

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_i - \omega_0 = \delta\omega_i$$

trenutna devijacija kružne učestanosti ugaono modulisanog signala.

Fazna i frekvencijska modulacija

1. Fazno modulirani signal je onaj čija je trenutna devijacija faze proporcionalna modulišućem signalu.

$$\delta \Phi_i = \varphi(t) = k_\varphi u_m(t), \quad k_\varphi = \text{const.}$$

- Modulišuci signal $u_m(t)$ je:

$$u_m(t) = U_m m(t) \quad U_m = |u_m(t)|_{\max}$$

- Vremensku promjenu modulišućeg signala $u_m(t)$ karakteriše normalizovana funkcija $m(t)$ koja zadovoljava uslov da je $|m(t)| < 1$, $|m(t)|_{\max} = 1$. Stoga je:

$$|\delta \Phi_i|_{\max} = |\varphi(t)|_{\max} = k_\varphi |u_m(t)|_{\max} = k_\varphi |U_m m(t)|_{\max} = k_\varphi U_m = \Delta \Phi_0$$

- Veličina $\Delta \Phi_0$ naziva se **maksimalna devijacija faze** ili **devijacija faze**.

$$\Phi_i = \Phi(t) = \omega_0 t + k_\varphi u_m(t) = \omega_0 t + \Delta \Phi_0 m(t)$$

- Konačno, izraz za fazno modulirani signal glasi:

$$u(t) = U_0 \cos \Phi(t) = U_0 \cos [\omega_0 t + k_\varphi u_m(t)] = U_0 \cos [\omega_0 t + \Delta \Phi_0 m(t)]$$

2. Frekvencijski modulisan signal je onaj čija je trenutna devijacija učestanosti proporcionalna modulišućem signalu.

$$\delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = k_f u_m(t); \quad k_f = \text{const.}$$

Maksimalna devijacija učestanosti, ili često samo **devijacija učestanosti**

$$|\delta f_i|_{\max} = \frac{1}{2\pi} \left| \frac{d\varphi(t)}{dt} \right|_{\max} = k_f |u_m(t)|_{\max} = k_f |U_m m(t)|_{\max} = k_f U_m = \Delta f_0$$

- Ako je riječ o kružnoj učestanosti, trenutna devijacija kružne učestanosti

$$\delta\omega_i = \frac{d\varphi(t)}{dt} = k_\omega u_m(t); \quad k_\omega = 2\pi k_f = \text{const.}$$

- Veličina

$$|\delta\omega_i|_{\max} = \left| \frac{d\varphi(t)}{dt} \right|_{\max} = k_\omega |u_m(t)|_{\max} = k_\omega |U_m m(t)|_{\max} = k_\omega U_m = \Delta\omega_0$$

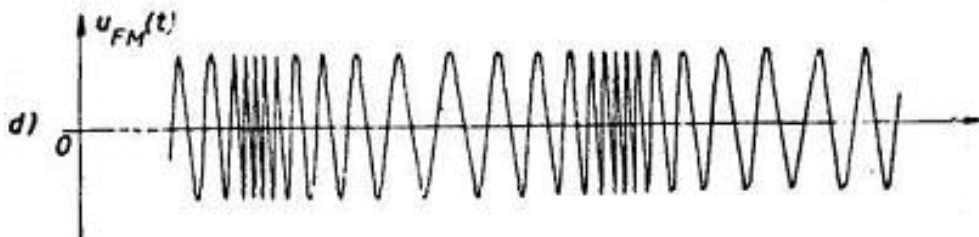
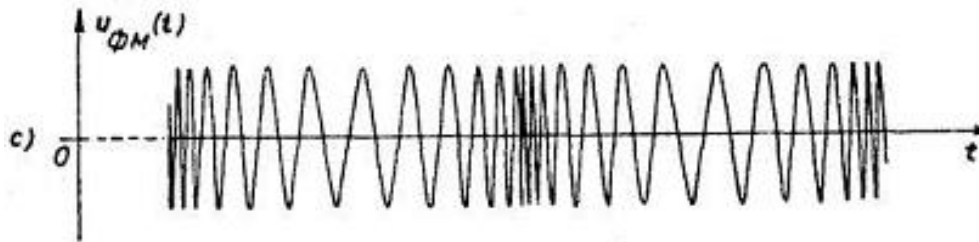
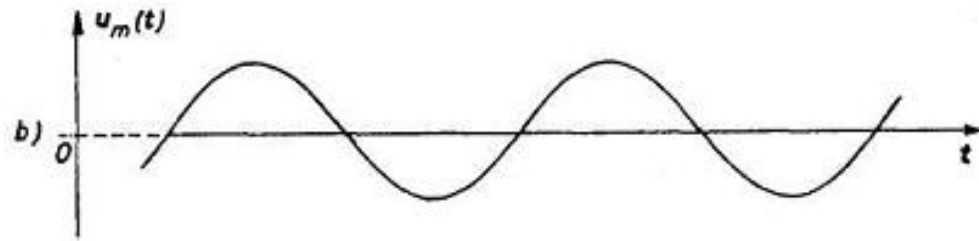
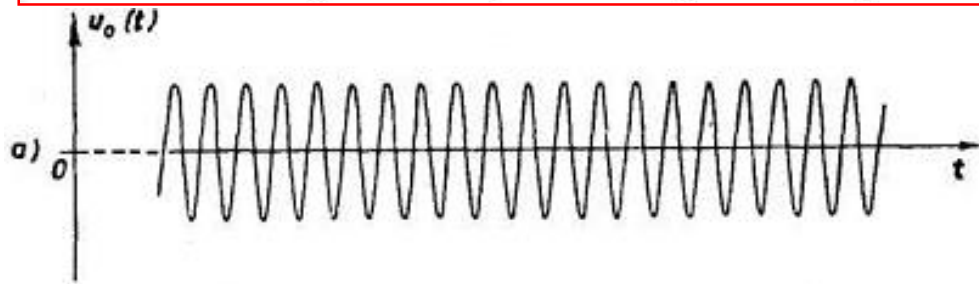
se naziva **maksimalna devijacija kružne učestanosti** ili **devijacija kružne učestanosti**.

- Trenutna kružna učestanost je:

$$\omega_i = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 + k_\omega u_m(t) = \omega_0 + k_\omega U_m m(t) = \omega_0 + \Delta\omega_0 m(t)$$

Sada je izraz za frekvencijski modulisani signal:

$$u(t) = U_0 \cos \left[\omega_0 t + k_\omega \int u_m(t) dt \right] = U_0 \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega_0 \int m(t) dt \right]$$



*Slika: a) Nosilac; b) modulišuci signal;
c) fazno modulisan signal;
d) frekvencijski modulisan signal*

Opšta veza između fazne i frekvencijske modulacije

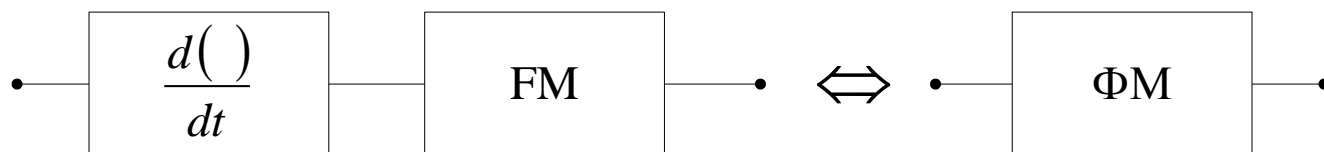
- Imajući u vidu odnose između trenutne devijacije faze nosioca i prenošenog signala u modulatoru i demodulatoru, koji karakterišu opštu vezu između fazne i frekvencijske modulacije, moguće je upotrebom posebnih sklopova od faznog modulatora/demodulatora napraviti frekvencijski i obrnuto.

- $\Phi M = \text{diferencijator} + FM$
- $\Phi D = FD + \text{integrator}$
- $FM = \text{integrator} + \Phi M$
- $FD = \Phi D + \text{diferencijator}$

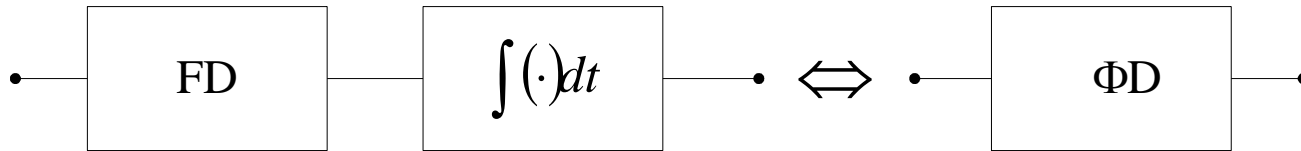
- Ako na ulaz FM modulatora dovedemo signal $du_m(t)/dt$ izlaz iz modulatora će biti:

$$u_{FM}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + k_\omega u_m(t)) = u_{\Phi M}(t)$$

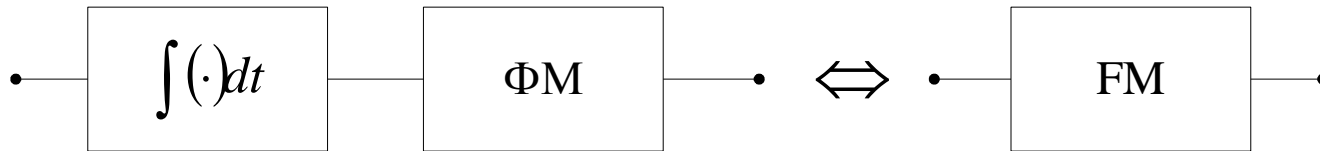
tj. ΦM modulator će biti kaskadna veza diferencijatora i FM modulatora.



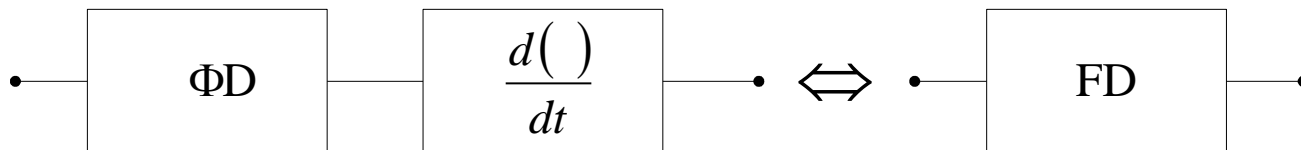
2. Demodulacija je obrnuti proces:



3. Ako signal prije ulaska u ΦM modulator prođe kroz kolo za integriranje, na izlazu sistema dobiće se modulisan signal čija je trenutna devijacija faze direktno srazmjerna integralu modulišućeg signala, a to je u stvari frekvencijski modulisani signal.



4. Demodulacija je obrnuti proces:



Spektar UM signala

- Pretpostavimo da je modulišući signal prostoperiodična funkcija

$$u_m(t) = U_m \cos \omega_m t$$

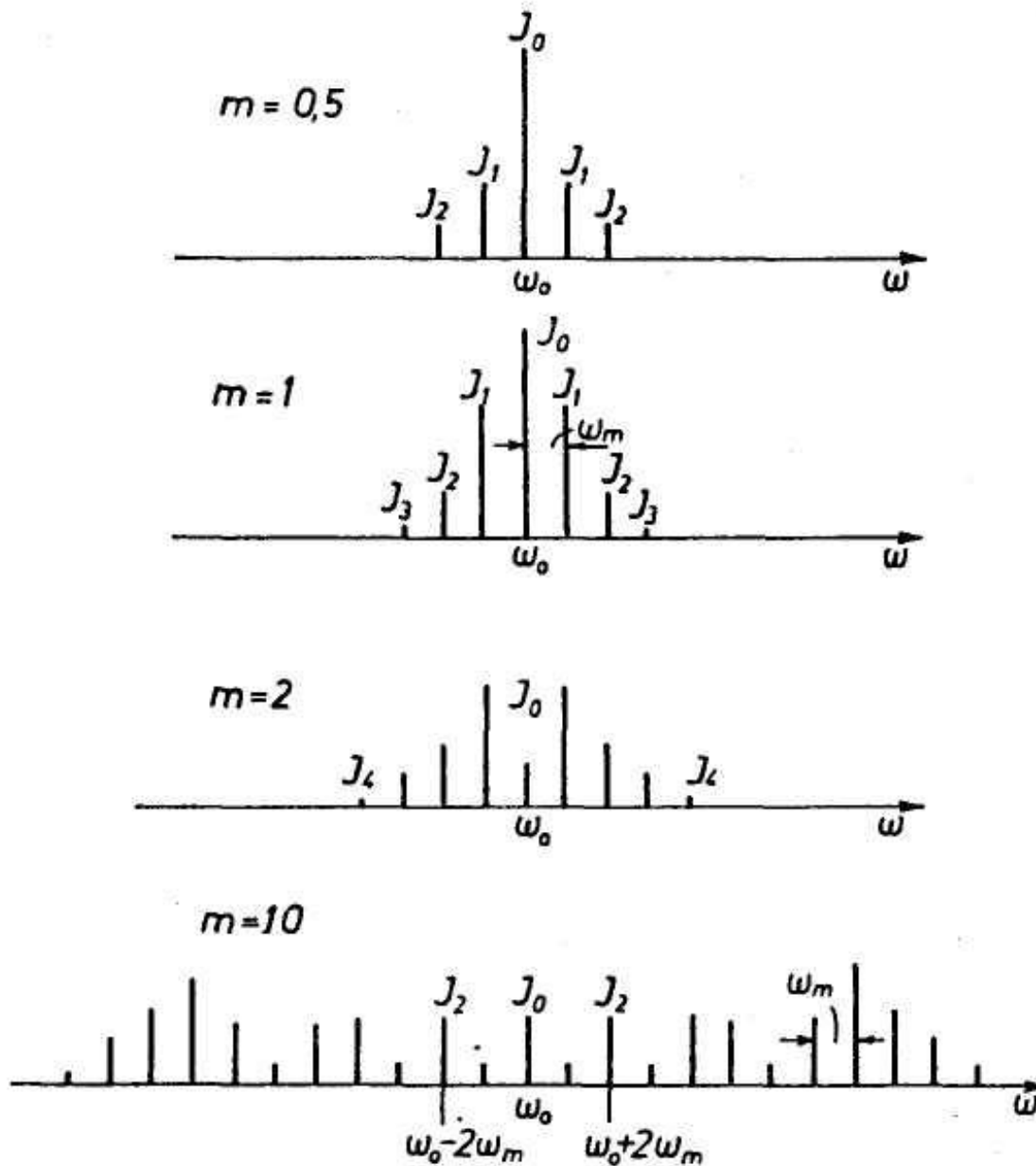
- Opšti oblik ugaono modulisanog signala je:

$$u_{UM}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + m \cos \omega_m t)$$

- Koristeći identitete iz teorije Besselovih funkcija, dobija se sledeći oblik:

$$u(t) = U_0 J_0(m) \cos \omega_0 t + U_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) \left\{ \cos \left[(\omega_0 - n \omega_m) t + \frac{n \pi}{2} \right] + \cos \left[(\omega_0 + n \omega_m) t + n \frac{\pi}{2} \right] \right\}$$

- $J_n(m)$ je Besselova funkcija prve vrste n -tog reda za argument m
- Za dati indeks modulacije m i za izabranu vrijednost $n=1, 2, 3, \dots$, Besselova funkcija $J_n(m)$ predstavlja konstantu. U izrazu koji predstavlja ugaono modulisan signal razlikujemo tri dijela:
 1. Nosilac čija je amplituda $U_0 J_0(m)$, a učestanost ω_0
 2. Beskonačno mnogo komponenti oblika $U_0 J_n(m) \cos(\omega_0 - n \omega_m) t$
 3. Beskonačno mnogo komponenti oblika $U_0 J_n(m) \cos(\omega_0 + n \omega_m) t$
- Vidimo da je spektar **neograničen** i **diskretan**, a razmak između dvije susjedne komponente u spektru ω_m .



Slika: Amplitudski spektri ugaono modulisanog signala sinusoidalnim test tonom za razne vrijednosti indeksa modulacije m .

- U slučaju kada je modulišući signal složeniji, npr. kada je suma 2 sinusoidalna signala, pokazuje se da:
 - zakon superpozicije u analizi spektra ne važi.
 - u opštem slučaju viši bočni opseg nije simetričan nižem. Znači, prenošena poruka nije sadržana u svakom od bočnih opsega, pa se ne može, kao kod AM signala, prenositi samo jedan bočni opseg.
- U slučaju kada je modulišući signal aperiodična funkcija, spektar ugaono modulisanog signala je kontinualan.

Širina propusnog opsega sistema za prenos UM signala

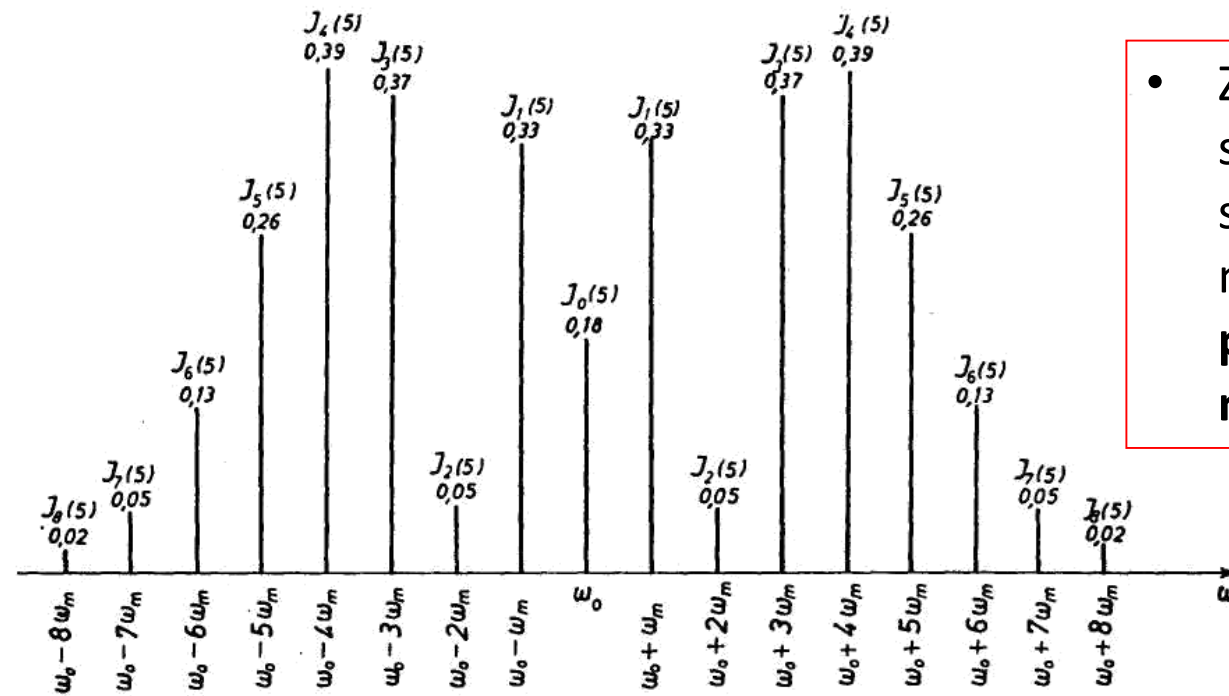
- Amplitude pojedinih spektralnih komponenata ugaono modulisanog signala zavise od Besselovih funkcija $J_n(m)$.
 - Za neke vrijednosti m i n , Besselove funkcije imaju relativno vrlo malu vrijednost, pa će se one u određenim uslovima moći i zanemariti.
- Zanemarivanjem pojedinih komponenata iz spektra UM signala, sistem za prenos se može dimenzionisati tako da ima ograničen propusni opseg, a da degradacija kvaliteta prenosa bude u dozvoljenim granicama.

Kriterijum o značajnim bočnim komponentama

- Značajnim bočnim komponentama se smatraju sve one **spektralne komponente koje nose više od $p\%$ snage nemodulisanog nosioca**. Najčešće se uzima da je ovaj procenat $p=1\%$.

- Na osnovu poznatih osobina Besseovih funkcija, za definisani kriterijum o značajnim komponentama u spektru UM signala, dolazi se do izraza za širinu spektra potrebnog za prenos UM signala.
- **Potrebna širina opsega za prenos UM signala je definisana Carsonovim obrascem:**

$$B = 2f_m(m + 1)$$



- Zbog odbacivanja pojedinih spektralnih komponenti UM signala, amplituda signala više nije konstanta, tj. javlja se **parazitna amplitudska modulacija**.

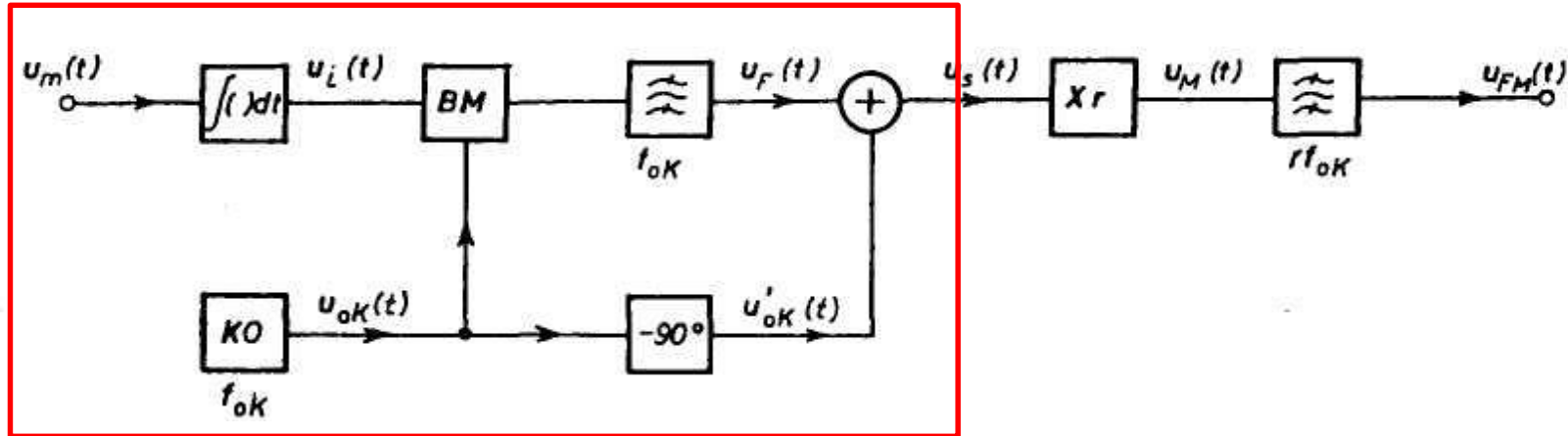
Slika: Dio amplitudskog spektra UM signala sinusoidalnim test tonom za $m=5$

Principi izgradnje FM modulatora

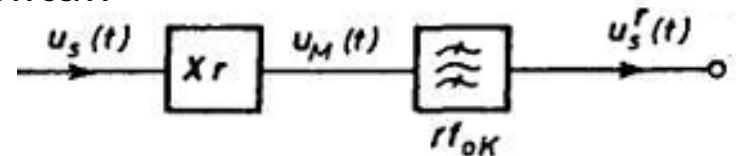
- Metode generisanja FM signala mogu da se klasifikuju u dvije grupe:
 1. **Indirektne** – postupci kojima se FM signali dobijaju pomoću integratora i Φ M modulatora
 2. **Direktne** – nekim direktnim postupkom se obezbjeđuje da trenutna devijacija učestanosti bude direktno srazmjerna modulišućem signalu.

Indirektna metoda generisanja FM signala

- Armstrongov modulator**

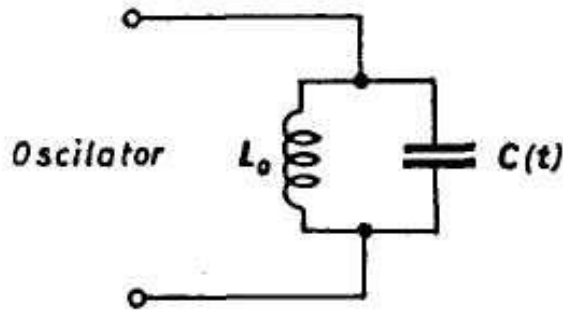


- KO je kvarcni oscilator fiksne učestanosti f_{0K} . BM je balansni modulator.
- Ovaj sklop **vrši funkciju FM modulatora samo ako je indeks modulacije mali ($m \ll 1$)**. Maksimalni indeks modulacije u ovom slučaju iznosi **0,2** (signal ima nosilac i 2 bočne komponente).
- Da bi se povećala devijacija učestanosti**, dobijeni signal se dovodi na umnožavač učestanosti (Xr) i odgovarajući filter.



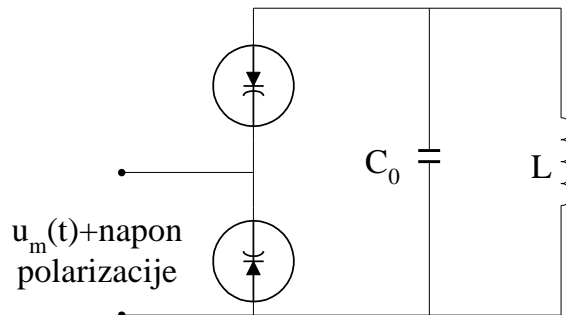
Direktna metoda generisanja FM signala

- **Direktan metod generisanja FM signala podrazumijeva da se učestanost oscilatora direktno mijenja pod uticajem modulišućeg signala. Ovaj princip se po pravilu ostvaruje tako što se neki od parametara oscilatora od koga zavisi učestanost oscilacija ω_0 mijenja u zavisnosti od modulišućeg signala. Najčešće su to kapacitivnost kondenzatora i induktivnost kalema.**
- Generisanje FM signala promjenom C ili L u rezonantnom oscilatornom kolu



- Jedna mogućnost promjene kapacitivnosti je pločasti kondenzator čije se rastojanje između ploča, ili njihova površina mijenja u skladu sa modulišućim signalom.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad \delta C(t) \ll C_0$$



- Druga mogućnost je upotreba **varikap dioda** koja je negativno polarisana, a kapacitivnost zavisi od napona polarizacije.

Sadržaj

- Pojam modulacije
- Amplitudske modulacije
- Demodulacija amplitudski modulisanih signala
- Ugaone modulacije
- **Demodulacija ugaono modulisanih signala**

Detekcija ugaono modulisanih signala

- U prijemniku iz ugaono modulisanog signala je potrebno izvući originalan signal koji predstavlja poslatu poruku. Ova operacija naziva se **detekcija ugaono modulisanih signala**.
- Pošto između frekvencijske i fazne modulacije postoji opšta veza, ono što važi za detekciju FM signala može da se primijeni i za Φ M signale:

$$\Phi D = FD + \text{integrator}$$

- **Detekcija FM signala obavlja se u sklopu koji se naziva **diskriminator****.
 - To je sklop čiji izlazni napon linearno zavisi od trenutne učestanosti ulaznog signala, pod uslovom da je amplituda ulaznog FM signala konstantna.
 - Zbog navedenog uslova, ispred diskriminatora se postavlja **limiter**. To je sklop koji odstranjuje promjene amplituda, i na taj način obezbjeđuje korektan rad diskriminatora.
- Diskriminatori se mogu svrstati u
 1. **Tradicionalne**
 2. **Moderne**, realizovane u integrisanoj tehnici (detektor presjeka sa nulom, FM detektor sa sinfaznom petljom)

- Proces detekcije FM signala kod tradicionalnih diskriminatora se obavlja u dvije faze:
 1. Konverzija frekvencijski modulisanog signala u KAM signal
 2. Demodulacija KAM signala pomoću detektora anvelope
- Pretpostavimo da imamo FM signal:

$$u(t) = U_0 \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega_0 \int m(t) dt \right]$$

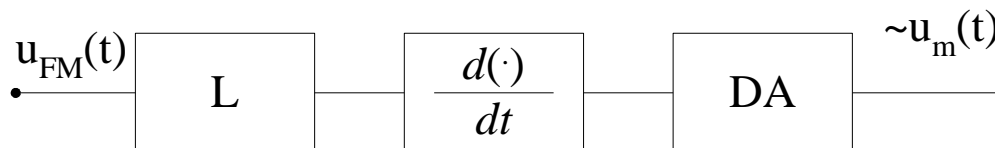
Diferenciranjem FM signala dobija se:

$$\frac{du(t)}{dt} = -U_0 (\omega_0 + \Delta\omega_0 m(t)) \sin(\omega_0 t + \Delta\omega_0 \int m(t) dt)$$

- Signal poruke je sadržan i u amplitudi i u fazi, pa je riječ o hibridno modulisanom signalu. Ako dobijeni signal propustimo kroz detektor anvelope, dobija se:

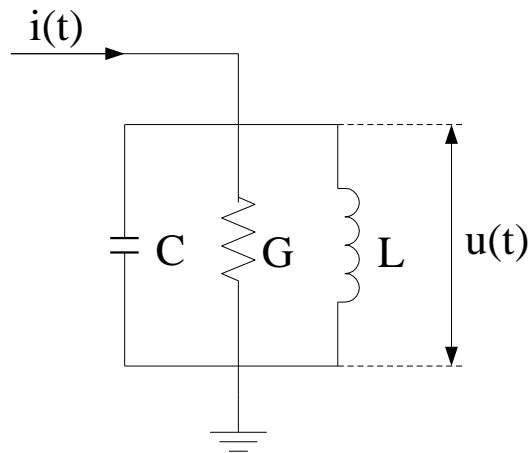
$$u_i(t) = U_0 (\omega_0 + \Delta\omega_0 m(t))$$

- Kompletna blok šema diskriminatora je:

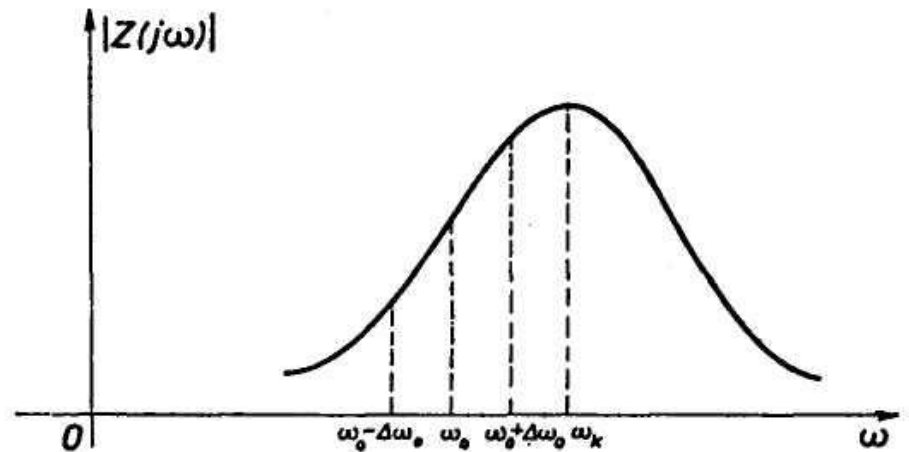


Tradicionalni diskriminatori

- Kod njih se konverzija FM signala u KAM signal obavlja pomoću oscilatornih kola. Primjer je FM diskriminator sa oscilatornim kolom



Slika: Oscilatorno kolo koje služi za konverziju FM signala u AM signale

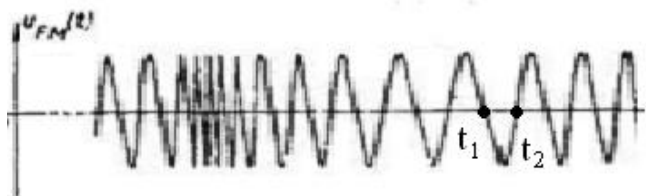


Slika: Zavisnost modula impedanse oscilatornog kola od učestanosti

- Amplitudsko-frekvencijska karakteristika sklopa sa slike je na jednom svom dijelu linearna.
- Parametre kola treba podesiti tako da je ona linearna u okolini učestanosti nosioca $\omega = \omega_0$, i da oblast linearnosti bude dovoljno velika kako bi se sve vrijednosti učestanosti nalazile unutar nje.**

Detektor presjeka sa nulom

$$u_{FM}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + k_\omega \int u_m(t) dt)$$



$$\omega_0(t_2 - t_1) + k_\omega \int_{t_1}^{t_2} u_m(t) dt = \pi$$

t_1 i t_2 su trenuci presjeka FM signala sa nulom. U tim trenucima faze su:

$$\varphi(t_1) = \omega_0 t_1 + k_\omega \int_{t_0}^{t_1} u_m(t) dt$$

$$\varphi(t_2) = \omega_0 t_2 + k_\omega \int_{t_0}^{t_2} u_m(t) dt$$

$$\varphi(t_2) - \varphi(t_1) = \pi$$

- Kako je uvijek $f_0 \gg f_m$, to se u naznačenom intervalu $u_m(t)$ malo mijenja.

$$u_m(t) \approx \text{const.}$$

$$\omega_0(t_2 - t_1) + k_\omega u_m(t_1)(t_2 - t_1) = \pi$$

$$(\omega_0 + k_\omega u_m(t_1))(t_2 - t_1) = \omega_i(t_2 - t_1) = \pi$$

$$\omega_i = \frac{\pi}{(t_2 - t_1)}, f_i \approx \frac{1}{2(t_2 - t_1)}$$

- Trenutna učestanost se može odrediti na osnovu poznavanja trenutaka kada funkcija ima vrijednost 0.
- Interval u kome brojimo nule mora da bude dovoljno veliki da obuhvati dovoljan broj nula (n), ali i dovoljno mali kako bi se $u_m(t)$ unutar njega sporo mijenjala.

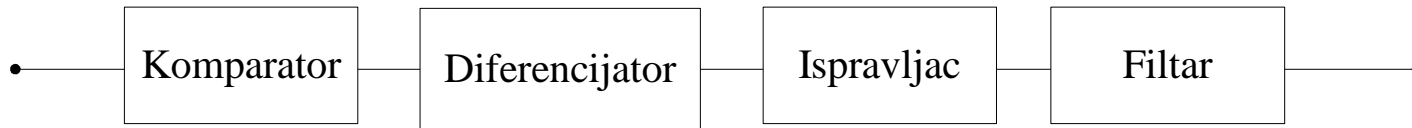
$$\frac{1}{f_0} < T_b \ll \frac{1}{f_m}$$

$$n \approx \frac{T_b}{t_2 - t_1} = \frac{T_b}{\frac{\pi}{\omega_i}} = \frac{T_b}{\pi} \omega_0 + \frac{T_b}{\pi} k_\omega u_m(t)$$

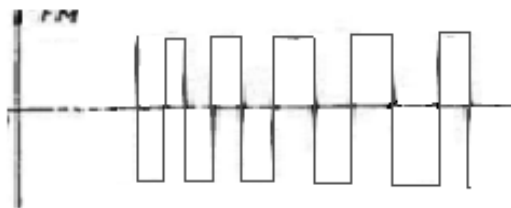
$$n = n_0 + K u_m(t)$$

$$\delta n = n - n_0 = K u_m(t)$$

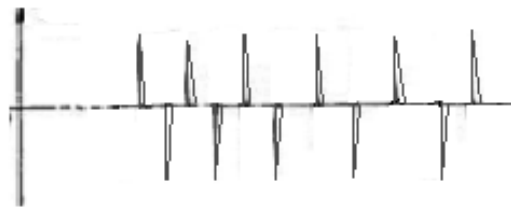
- Jedan način realizacije je:



FM signal



Signal na izlazu iz komparatora



Signal na izlazu iz diferencijatora



Signal na izlazu iz ispravljača