UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Osnove telekomunikacija

Doc. dr Enis Kočan (enisk@ucg.ac.me)
Saradnici: Dr Uglješa Urošević (ugljesa@ucg.ac.me)
MSc Slavica Tomović (slavicat@ucg.ac.me)

SADRŽAJ KURSA

1. Uvod. Opšti model telekomunikacionog sistema. Vrste prenosa signala.
2. Medijumi za prenos. Pojam modulacije.
3. Multipleksiranje. Referentni model za povezivanje otvorenih sistema (OSI i TCP/IP)
4. Harmonijska analiza periodičnih signala
5. Analiza aperiodičnih signala i slučajnih signala
6. Prenos signala kroz linearne sisteme. Izobličenja pri prenosu signala
7. Ampllitudske modulacije
8. Demodulacija AM signala. Realizacija multipleksa sa frekvencijskom raspodjelom kanala
9. Ugaona modulacija. Spektar UM signala
10. **FM modulatori. Demodulacija FM signala**
11. Slučajni šum. Karakteristike uskopojasnog šuma
12. Uticaj šuma na prenos amplitudski modulisanih signala
13. Uticaj šuma na prenos ugaono modulisanih signala

Termin 10 - Sadržaj

- **Indirektna metoda generisanja FM signala**
- Direktna metoda generisanja FM signala
- Detekcija ugaono modulisanih signala
- Tradicionalni diskriminatori
- Moderni diskriminatori

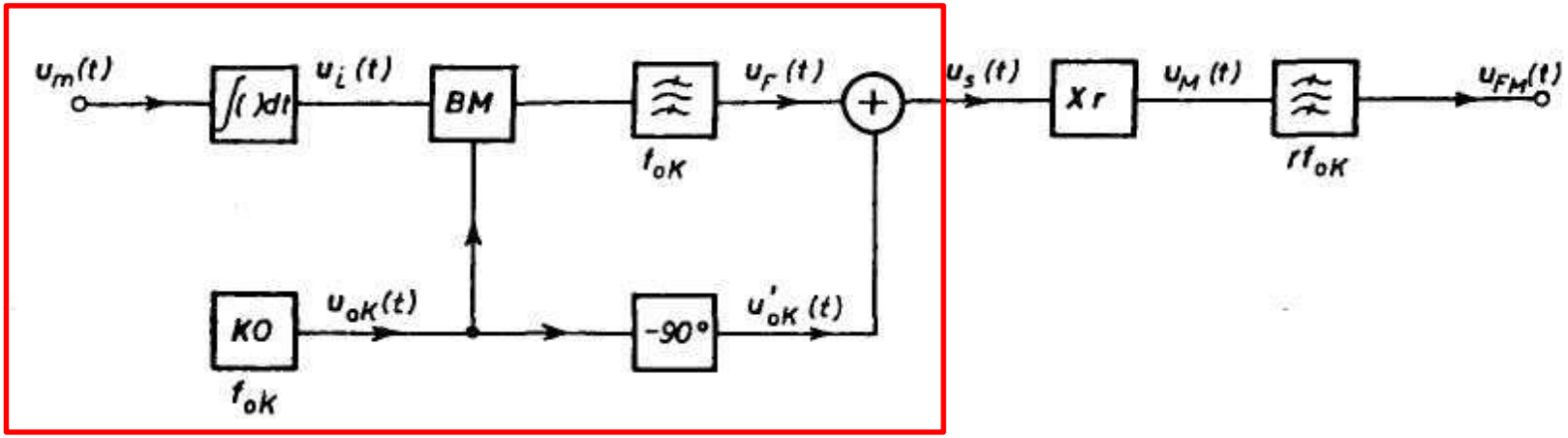
Principi izgradnje FM modulatora

- Metode generisanja FM signala mogu da se klasifikuju u dvije grupe:

1. **Indirektne** – postupci kojima se FM signali dobijaju pomoću integratora i ΦM modulatora
2. **Direktne** – nekim direktnim postupkom se obezbjeđuje da trenutna devijacija učestanosti bude direktno srazmjerna modulišućem signalu.

Indirektna metoda generisanja FM signala

- **Armstrongov modulator**



Slika: Blok-šema Armstrongovog modulatora

- KO je kvarcni oscilator fiksne učestanosti f_{0K}. Napon na njegovom izlazu je:

$$u_{0K}(t) = U_{0K}\cos\omega_{0K}t$$

- BM je balansni modulator. Neka je modulišući signal oblika:

$$u_m(t) = U_{m1}\cos\omega_m t$$

Kako modulišući signal napaja integrator, na njegovom izlazu (ulazu u BM) je:

$$u_i(t) \cong \frac{1}{RC} \int U_{m1} \cos \omega_m t \cdot dt = \frac{U_m}{\omega_m} \sin \omega_m t$$

Na izlazu balansnog modulatora, filtrom propusnikom opsega učestanosti izdvaja se signal:

$$u_F(t) = k_U u_i(t) \cdot u_{0K}(t) = k_U \frac{U_m U_{0K}}{\omega_m} \sin \omega_m t \cdot \cos \omega_{0K} t$$

Napon iz KO istovremeno napaja sklop koji unosi fazni pomeraj od -90°, pa se na njegovom izlazu dobija:

$$u'_{0K}(t) = U_{0K} \cos\left(\omega_{0K} t - \frac{\pi}{2}\right) = U_{0K} \sin \omega_{0K} t$$

Na izlazu iz kola za sumiranje dobija se napon:

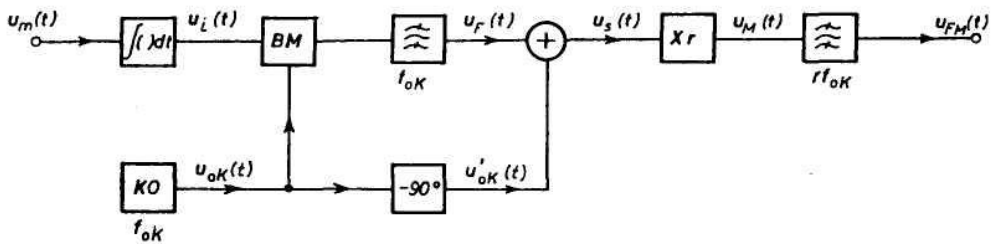
$$u_S(t) = u'_{0K}(t) + u_F(t) = U_{0K} \sin \omega_{0K} t + k_U \frac{U_m U_{0K}}{\omega_-} \sin \omega_m t \cdot \cos \omega_{0K} t$$

Ovaj izraz može da se napiše u obliku:

$$u_S(t) = U_{0K}\left(\sin \omega_{0K} t + \frac{k_U U_m}{\omega_m} \sin \omega_m t \cdot \cos \omega_{0K} t\right) = U_{0K} \sqrt{1 + \left(\frac{k_U U_m}{\omega_m}\right)^2 \sin^2 \omega_m t} \sin(\omega_{0K} t + \varphi)$$

Uz: $\tan\varphi = \frac{k_U U_m}{\omega_m}\sin\omega_m t$

I pretpostavku da je: $\frac{k_U U_m}{\omega_m} \ll 1$



Može se smatrati:

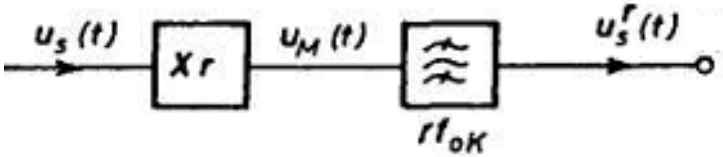
$\tan\varphi \cong \varphi$ i $\left(\frac{k_U U_m}{\omega_m}\right)^2 \to 0$

Pa je:

$$u_S(t) \cong U_{0K}\sin\left(\omega_{0K}t + \frac{k_U U_m}{\omega_m}\sin\omega_m t\right)$$

$$u_S(t) = U_{0K}\sin\left(\omega_{0K}t + k_U\int U_m\cos\omega_m t\,dt\right)$$

- Ovaj izraz predstavlja frekvencijski modulisan signal. Pretpostavljeni sklop vrši funkciju FM modulatora samo ako je indeks modulacije mali (m<<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 (*X r*) i odgovarajući filtar.



Umnožavač je nelinearan sklop čija je karakteristika „izlaz — ulaz”:

$$u_M(t) = a_0 + a_1 u_S(t) + a_2 u_S^2(t) + \cdots + a_r u_S^r(t) + \cdots$$

Izlaznim filtrom propusnikom opsega učestanosti čija je centralna učestanost rf_{0K}, r je cio broj, se izdvaja r-ti harmonik signala u_s(t), pa je:

$$u_{FM}(t) = U_0 \sin\left(r\,\omega_{0K}\,t + \frac{rk_U U_m}{\omega_m}\sin\omega_m t\right) = U_0 \sin\left(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega_0}{\omega_m}\sin\omega_m t\right)$$

Dobili smo FM signal čija je učestanost nosioca:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{r\,\omega_{0K}}{2\pi} = rf_{0K}$$

a devijacija učestanosti:

$$\Delta f_0 = \frac{1}{2\pi}\Delta\omega_0 = \frac{1}{2\pi} rk_U U_m = \frac{1}{2\pi} r\Delta\omega_{0K} = r\,\Delta f_{0K}$$

Na ovaj način smo povećali maksimalnu devijaciju učestanosti i indeks modulacije ***r*** puta.

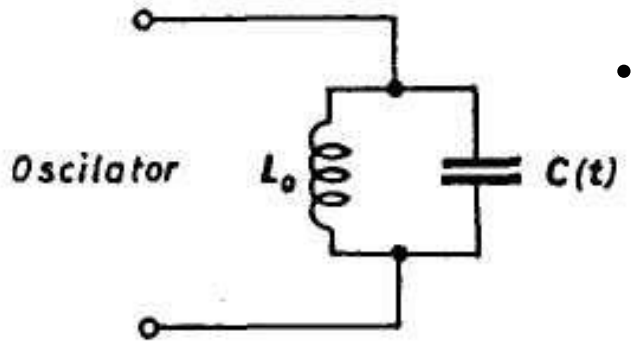
Termin 10 - Sadržaj

- Indirektna metoda generisanja FM signala
- **Direktna metoda generisanja FM signala**
- Detekcija ugaono modulisanih signala
- Tradicionalni diskriminatori
- Moderni diskriminatori

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



- Rezonantna učestanost oscilatora je:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

- Neka je u tom kolu induktivnost L_0=const, a neka se kapacitivnost kondenzatora mijenja ($C=C(t)$).

$$C = C(t) = C_0 + \delta C(t)$$

Trenutna učestanost generisanih oscilacija će biti:

$$\omega_i^2 = \omega^2(t) = \frac{1}{L_0 C(t)}$$

Uvrštavajući izraz za promjenjivu kapacitivnost, trenutna učestanost je:

$$\omega_i^2 = \omega^2(t) = \frac{1}{L_0 [C_0 + \delta C(t)]} = \frac{1}{L_0 C_0} \frac{1}{1 + \frac{\delta C(t)}{C_0}}$$

$$\omega_i = \omega(t) = \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\delta C(t)}{C_0}}}$$

Pretpostavimo da su promjene kapacitivnosti male:

$$\delta C(t) \ll C_0$$

Tada će za trenutnu učestanost važiti približno:

$$\omega_i = \omega(t) \cong \omega_0 \left[1 - \frac{\delta C(t)}{2 C_0} \right]$$

$$\omega_i = \omega(t) = \omega_0 + \delta\omega_i$$

Za trenutnu devijaciju učestanosti važi da je:

$$\frac{\delta\omega_i}{\omega_0} \cong -\frac{\delta C(t)}{2C_0}$$

Znak - znači da povećanju kapacitivnosti δC(t) odgovara smanjenje učestanosti.
Pretpostavimo da su promjene kapacitivnosti direktno srazmjerne modulišućem signalu $u_m(t)$:

$$\delta C(t) = k_C u_m(t) = k_C U_m m(t) = \Delta C_0 m(t)$$

$$\Delta C_0 = |\delta C(t)|_{max} = k_C U_m |m(t)|_{max} = k_C U_m$$

Trenutna devijacija učestanosti će biti:

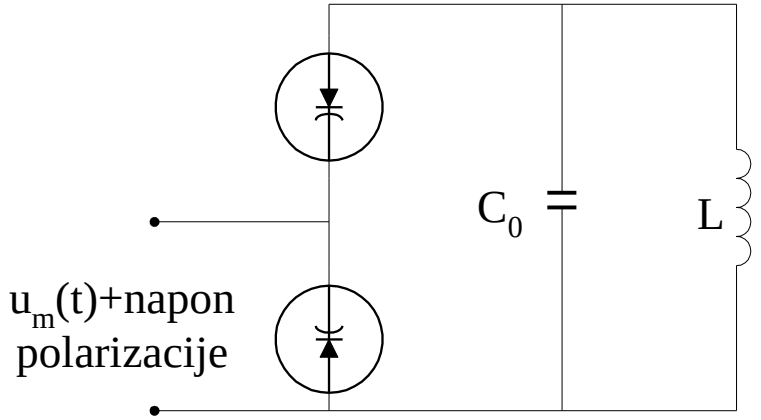
$$\delta\omega_i \cong -\frac{1}{2}\omega_0 \frac{\Delta C_0}{C_0} m(t) = -\Delta\omega_0 m(t)$$

Tj. učestanost izlaznog signala:

$$\omega_i = \omega(t) = \omega_0 - \Delta\omega_0 m(t)$$

Pri navedenim uslovima moguće je ostvariti da se trenutna učestanost oscilatora mijenja direktno srazmjerno modulišućem signalu.

- Jedna mogućnost promjene kapacitivnosti je pločasti kondenzator čije se rastojanje između ploča, ili njihova površina mijenja u skladu sa modulišućim signalom.
- Druga mogućnost je upotreba varikap dioda koja je negativno polarisana, a kapacitivnost zavisi od napona polarizacije.



$$\delta C(t) << C_0$$

- FM signale generalno možemo podijeliti na:
  1. Uskopojasne – indeks modulacije je m<0.2
  2. Širokopojasne – indeks modulacije je m>0.2

  Oba navedena tipa modulatora su uskopojasna.

Termin 10 - Sadržaj

- Indirektna metoda generisanja FM signala
- Direktna metoda generisanja FM signala
- **Detekcija ugaono modulisanih signala**
- Tradicionalni diskriminatori
- Moderni diskriminatori

Detekcija ugaono modulisanih signala

- U prijemniku se mora obaviti operacija inverzna modulaciji: iz ugaono modulisanog signala potrebno je 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 ΦM signale:

ΦD = FD + 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:

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

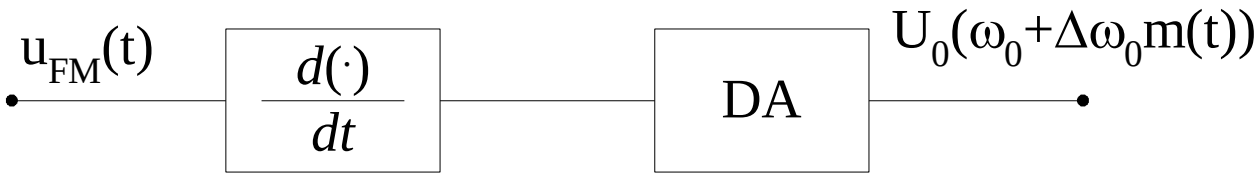
Diferenciranjem FM signala dobija se:

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

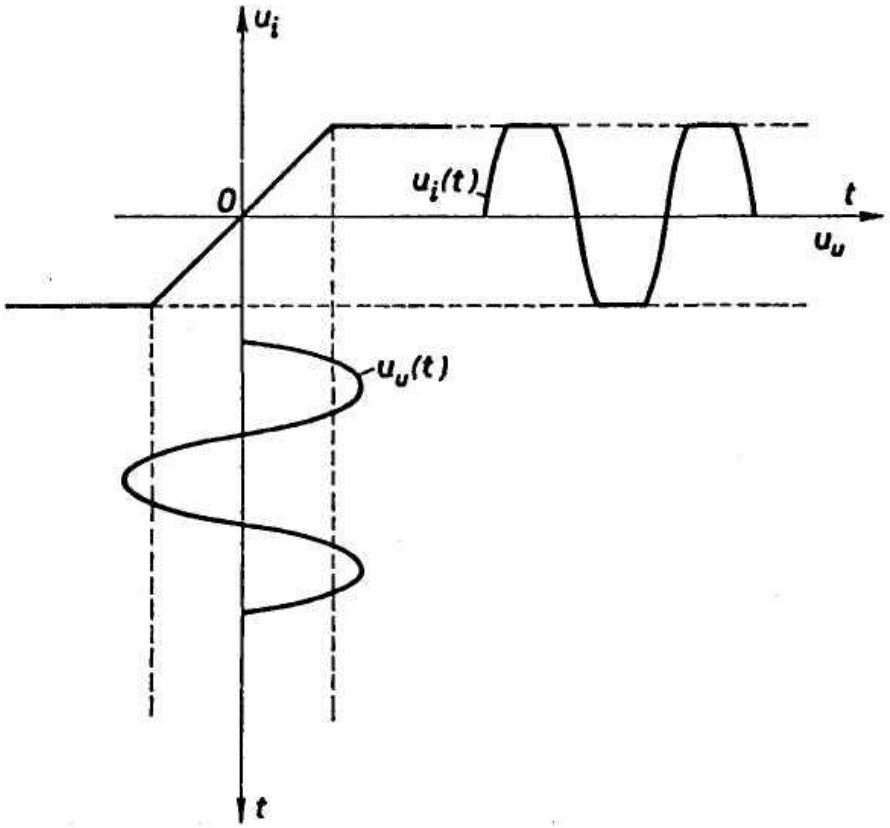
- Signal poruke je sadržan i u amplitudi i u fazi, pa je riječ o hibridno modulisanom signalu. Ako dobijeni signal propustimo kroz detektor anvelope, dobija se:

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

- Blok šema diskriminatora je:

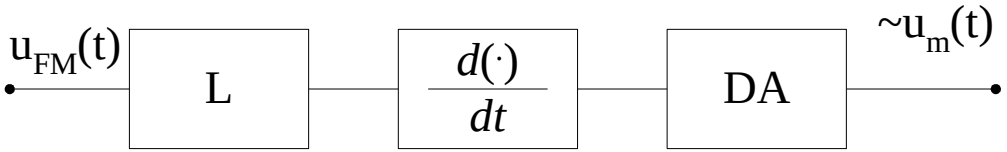


- Uslov da detekcija bude dobra jeste da amplituda ulaznog FM signala bude konstantna. Ako to nije ispunjeno, dobijeni signal na izlazu diskriminatora mijenjaće se sa promjenama te amplitude. Da bi se eliminisala ta parazitna amplitudska modulacija, ispred diskriminatora se uvijek postavlja sklop čiji je zadatak da štetne varijacije amplitude FM signala učini što manjim. Takav sklop naziva se ***limiter*** ili ***ograničavač*** amplituda.
- Limiter je nelinearan sklop čija je karakteristika na slici:

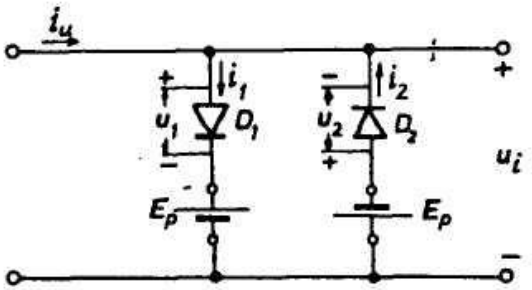


Slika: Idealna karakteristika limitera

Kompletna blok šema sklopa za detekciju će biti:



Sa L je označen limiter koji se može realizovati kao paralelna veza dvije obrnute poluprovodničke diode:



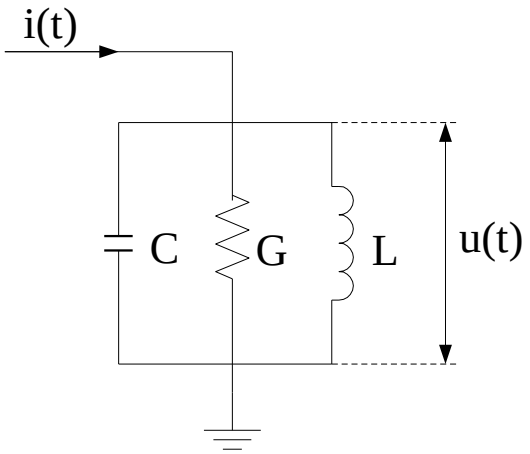
Slika: Šema limitera

Termin 10 - Sadržaj

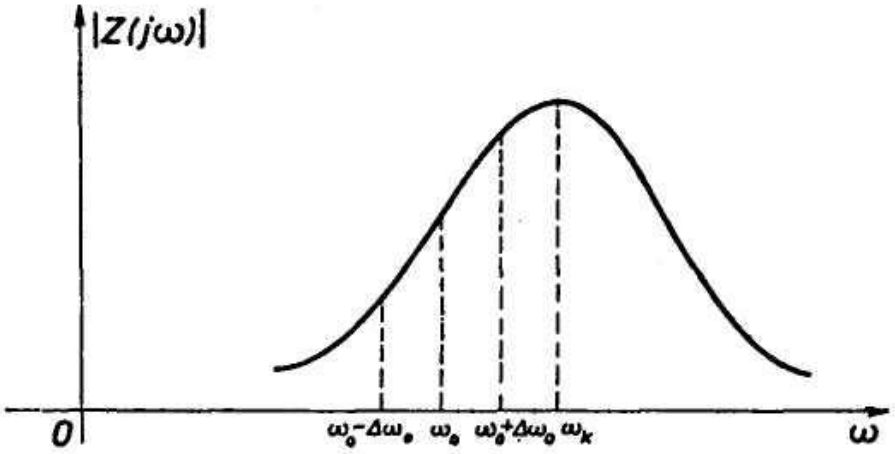
- Indirektna metoda generisanja FM signala
- Direktna metoda generisanja FM signala
- Detekcija ugaono modulisanih signala
- **Tradicionalni diskriminatori**
- Moderni diskriminatori

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.

$$|Z(j\omega)| = \frac{|U(j\omega)|}{|I(j\omega)|} = \frac{\frac{1}{G}}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{G}\right)^2}}$$

$$\omega = \omega_0 + \delta\omega$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \pm \delta$$

Da bi se ispunio uslov linearnosti, mora da je:

$$\delta\omega << \omega_0$$
$$\delta << \omega_0$$

Odnosno, rezonantna učestanost i učestanost nosioca su bliske. Tada je:

$$|Z(j\omega)| \approx \frac{\frac{1}{G}}{\sqrt{1+4\left(\frac{C}{G}\right)^2(\delta-\delta\omega)^2}}$$

- Pretpostavimo da je $\delta >> \delta\omega$, što je neophodno za rad na linearnom dijelu karakteristike.
- Označimo sa $\alpha = G/2C$, $\delta << \alpha$, tada je:

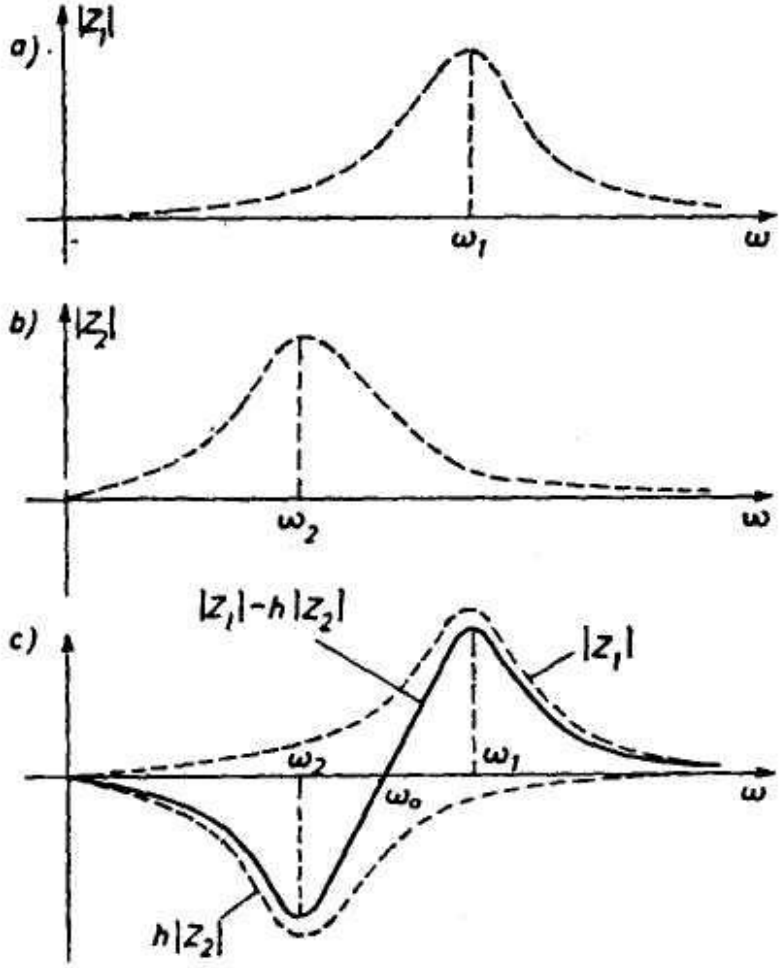
$$|Z(j\omega)| \approx \frac{1}{G}\left[\left(1-\frac{\delta^2}{2\alpha^2}\right)+\frac{\delta}{\alpha^2}\delta\omega\right]$$

$$|U(j\omega)| = |Z(j\omega)||I(j\omega)| \approx \frac{1}{G}|I(j\omega)|\left[\left(1-\frac{\delta^2}{2\alpha^2}\right)+\frac{\delta}{\alpha^2}\delta\omega\right]$$

- Na izlazu iz oscilatornog kola se dobija signal koji je direktno srazmjeran $\delta\omega$.
- Ako je amplituda ulaznog signala $|I(j\omega)|$ konstantna, obezbijeđen je **KAM signal** koji se dalje propušta kroz detektor anvelope.

Balansni diskriminator sa dva oscilatorna kola

- Dva oscilatorna kola su izbalansirana, podešena su tako da je rezonantna učestanost jednog $\omega_1=\omega_0+\delta$, a drugog $\omega_2=\omega_0-\delta$.
- Zbirna prenosna karakteristika je takva da je linearna oblast znatno veća nego u slučaju kada imamo samo jedno oscilatorno kolo.



$$|U_D(j\omega)| = |U(j\omega)||H(j\omega)| = |U(j\omega)|\left[|H(j\omega)|_{\omega_0+\delta} - |H(j\omega)|_{\omega_0-\delta}\right] =$$

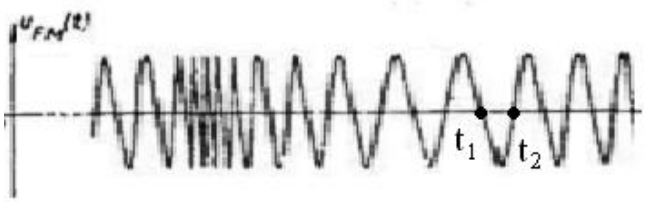
$$|U(j\omega)||H(j\omega)| = |U(j\omega)|\frac{2\delta}{G\alpha^2}\delta\omega \sim u_m(t)$$

Termin 10 - Sadržaj

- Indirektna metoda generisanja FM signala
- Direktna metoda generisanja FM signala
- Detekcija ugaono modulisanih signala
- Tradicionalni diskriminatori
- **Moderni diskriminatori**

Detektor presjeka sa nulom

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



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

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 $f_0 >> f_m$, to se u naznačenom intervalu $u_m(t)$ malo mijenja.

$$u_m(t) \approx const.$$

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

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

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

- 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.

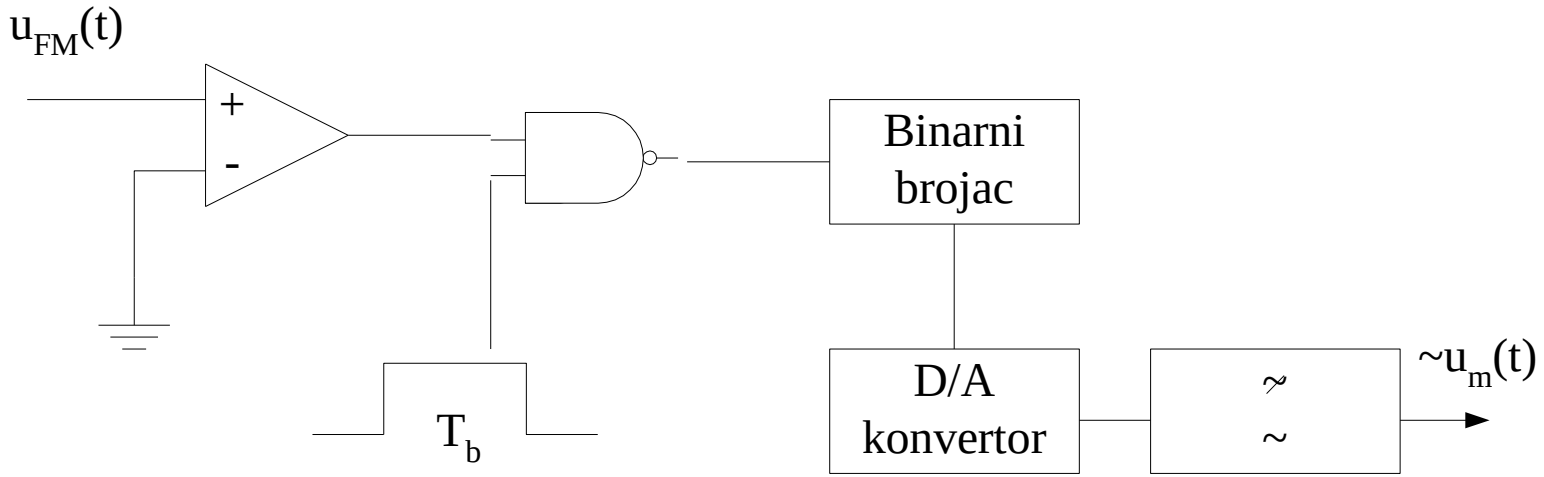
$$\frac{1}{f_0} < T_b << \frac{1}{f_m}$$

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

$$n = n_0 + Ku_m(t)$$

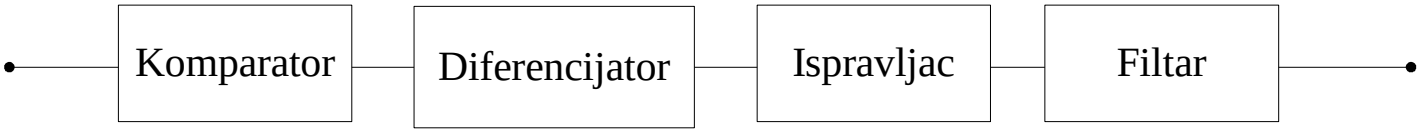
$$\delta n = n - n_0 = Ku_m(t)$$

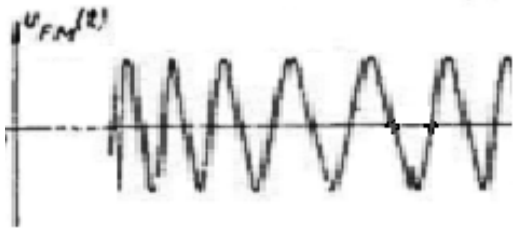
- Jedan način realizacije je na slici:



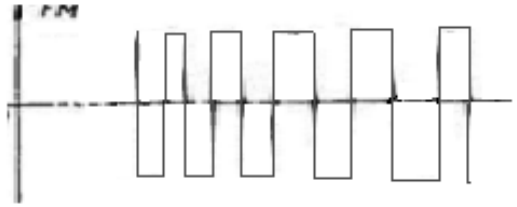
- Komparator na izlazu daje pravougaonu povorku koja mijenja polaritet svaki put kad signal prođe kroz nulu. Logička kapija se otvara u intervalu brojanja, pa binarni brojač daje broj presjeka sa nulom. U D/A konvertoru se vrši konverzija cifre u odgovarajuću analognu veličinu.

- Drugi način je:

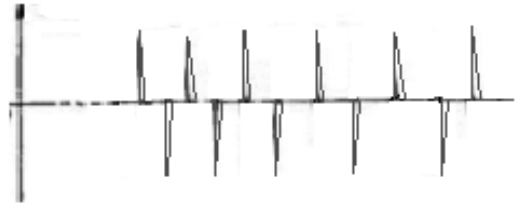




FM signal



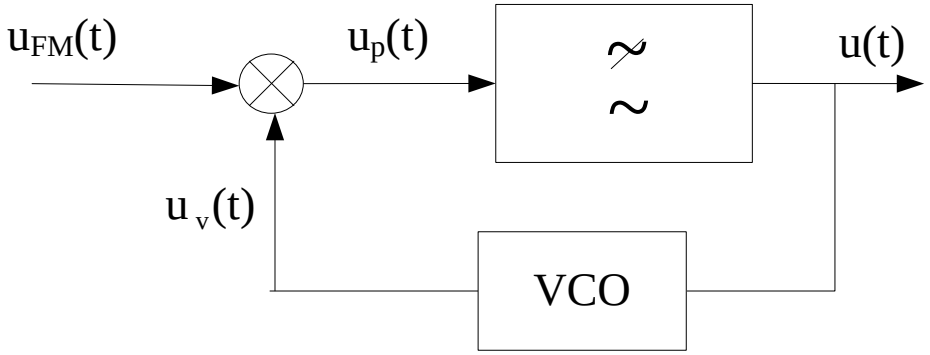
Signal na izlazu iz komparatora



Signal na izlazu iz diferencijatora

Signal na izlazu iz ispravljača

FM detektor sa sinfaznom petljom



- Ovo je sistem sa pozitivnom povratnom spregom, sa naponski kontrolisanim oscilatorom (VCO) u povratnoj grani.
- u_p(t) je signal proporcionalan faznoj razlici FM signala na ulazu i signala na izlazu iz VCO.
- Kada se trenutna faza u_{FM}(t) i u_v(t) izjednače, tada su ova dva signala ista:

$$u_{FM}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_1(t))$$

$$\varphi_1(t) = k_\omega \int u_m(t) dt$$

$$u_v(t) = U_v \sin(\omega_0 t + \varphi_2(t))$$

$$u_p(t) = K u_{FM}(t) u_v(t)$$

$$u_p(t)=\frac{1}{2}KU_0U_v\left[\sin\left(\varphi_2(t)-\varphi_1(t)\right)+\sin\left(2\omega_0 t+\varphi_1(t)+\varphi_2(t)\right)\right]$$

Prolaskom kroz NF filtar dobija se:

$$u(t)=\frac{1}{2}KU_0U_v\sin\left(\varphi_2(t)-\varphi_1(t)\right)$$

Kada su faze približno jednake:

$$\varphi_2(t)\approx\varphi_1(t)$$

$$u(t)=\frac{1}{2}KU_0U_v\left(\varphi_2(t)-\varphi_1(t)\right)$$

Ovaj signal dolazi na ulaz VCO.

$$\frac{d\varphi_1(t)}{dt}=k_\omega u_m(t)$$

$$\varphi_2(t)=k_0\int u(t)dt,\ \frac{d\varphi_2(t)}{dt}=k_0u(t)$$

$$u(t)=\frac{1}{2}KU_0U_v\left[k_0\int u(t)dt-\varphi_1(t)\right]\Big/\frac{d(\cdot)}{dt}$$

$$\frac{d\varphi_1(t)}{dt}=k_0\left[-\frac{2\frac{du(t)}{dt}}{k_0KU_0U_v}+u(t)\right.$$

Ako pretpostavimo da je učestanost signala *u*(t) znatno manja od k_0K:

$$\frac{\frac{du(t)}{dt}}{k_0K} << 1 \Rightarrow \frac{d\varphi_1(t)}{dt} \approx k_0 u(t)$$

S obzirom na relaciju:

$$\frac{d\varphi_1(t)}{dt} = k_\omega u_m(t)$$

$$\Rightarrow u(t) \cong \frac{k_\omega}{k_0} u_m(t)$$

- Izlazni signal je srazmjeran modulišućem signalu.