

IMPULSNA MODULACIJA

- Impulsna modulacija pripada grupi modulacija kod kojih je modulirani signal diskretan. 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 neko konačno vrijeme. Aktivni i pasivni intervali se smjenjuju naizmjenično jedan za drugim u toku vremena.
- Primjena impulsne modulacije zasniva se na teoremi o odabiranju koja kaže da se svaki signal, čiji je spektar ograničen učestanošću f_m , može jednoznačno opisati odbircima. Interval između dva susjedna odbirka definiše u vremenu periodu odabiranja T koja **mora** imati vrijednost:

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

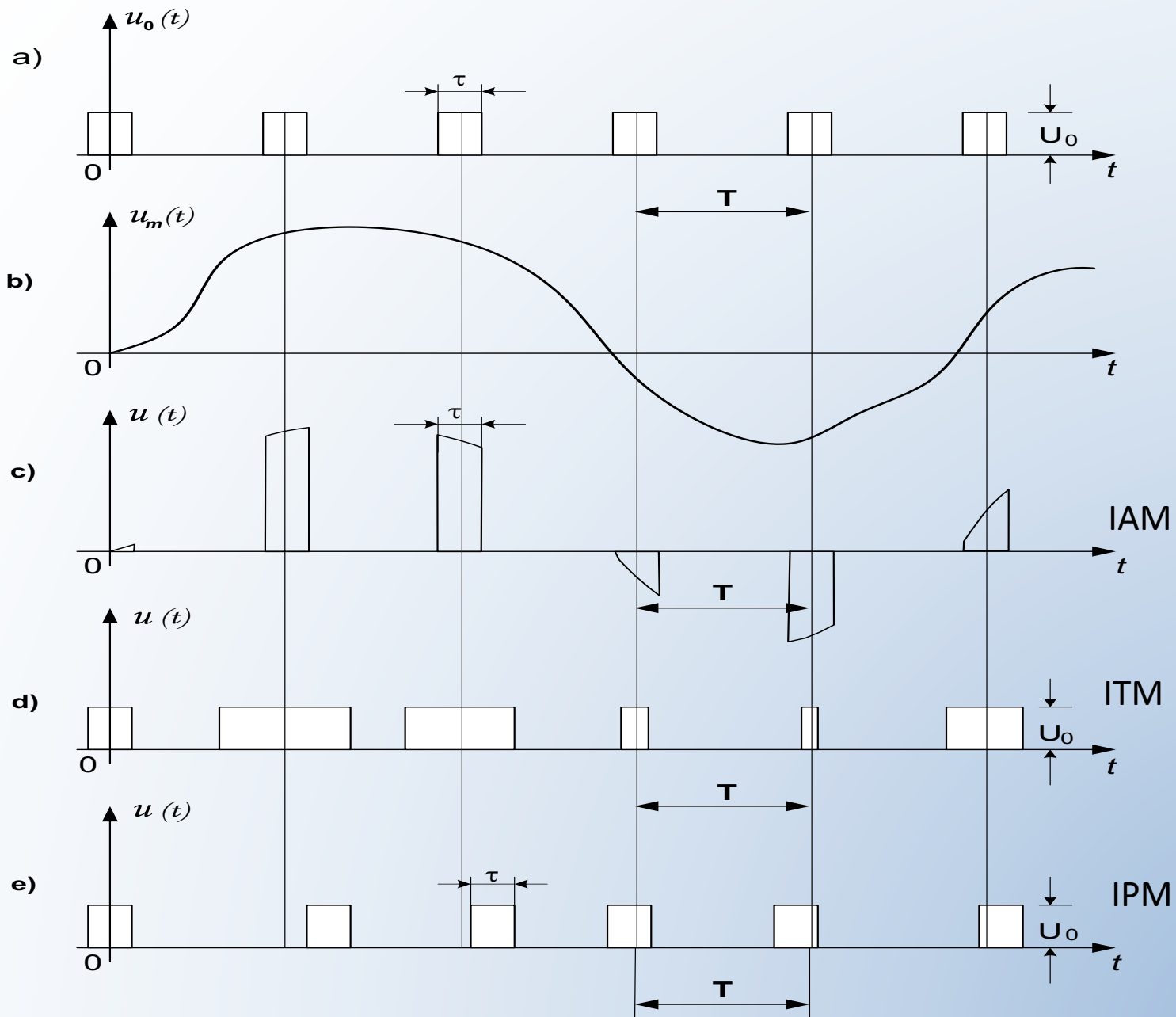
Na osnovu ovako uzetih odbiraka uvijek je moguće rekonstruisati originalan signal, propuštanjem odbiraka kroz niskofrekventni filter granične učestanosti f_m .

Ulogu nosioca u procesu impulsne modulacije, gotovo po pravilu, ima periodična povorka pravougaonih impulsa $U_o(t)$. Tri parametra karakterišu ovu funkciju:

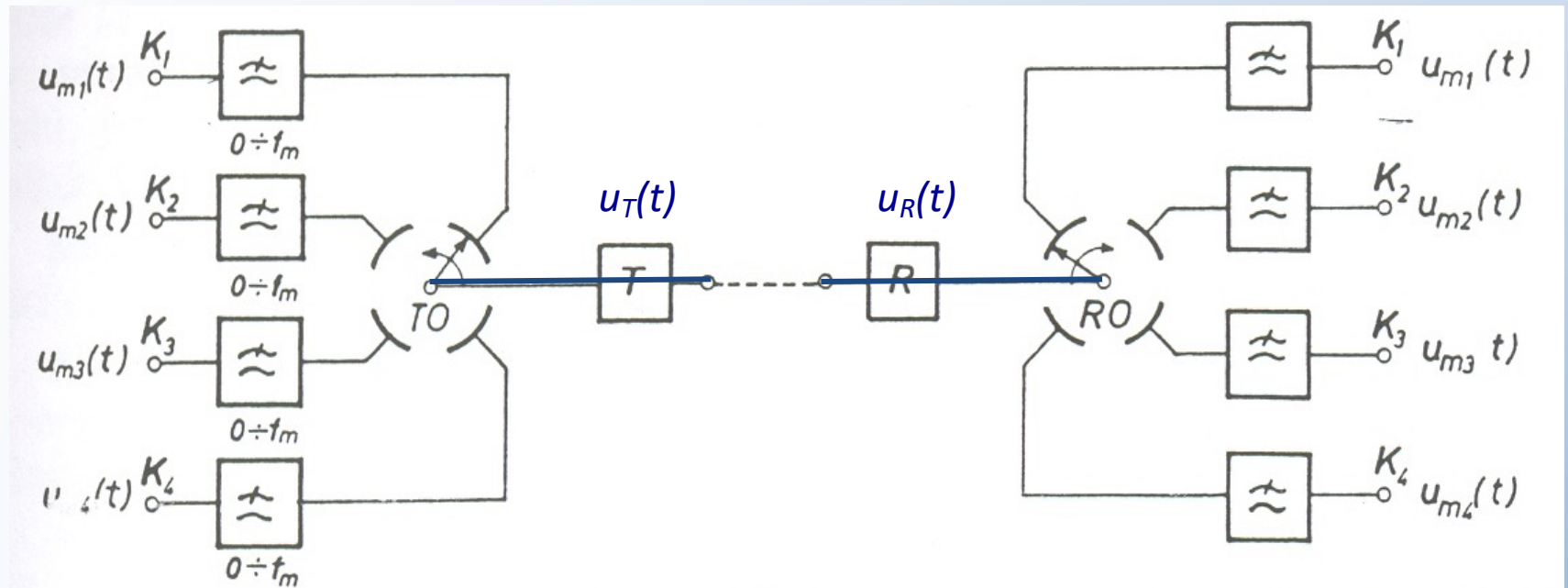
- amplituda impulsa U_o ,
- trajanje impulsa τ i
- perioda ponavljanja T .

Svaka od ovih veličina se može učiniti zavisnom od modulišućeg signala, na čemu se i zasnivaju postupci impulsne modulacije.

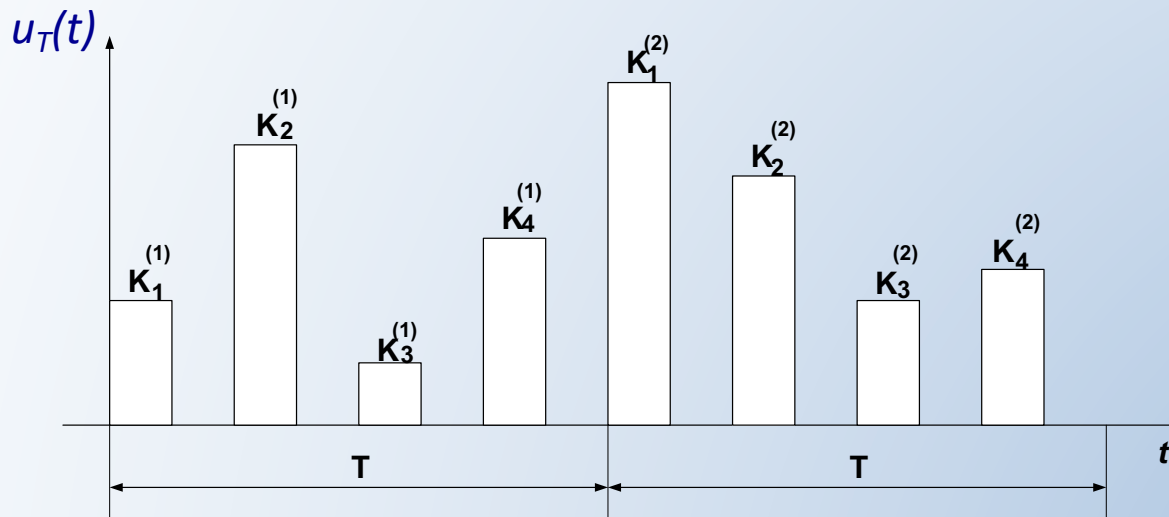
- Tako, ako se amplituda impulsa U_o mijenja direktno proporcionalno odbircima modulišućeg signala $u_m(t)$ dok ostali parametri povorke ostaju konstantni, radi se **impulsno amplitudskoj modulaciji (IAM)**.
- Mijenja li se samo trajanje impulsa τ tako da je ono direktno srazmjerno odgovarajućim odbircima modulišućeg signala, dobiće se **impulsna modulacija po trajanju (ITM)** ili impulsno širinska modulacija.
- Ako se mijenja samo treći preostali parametar (period ponavljanja T) direktno srazmjerno odbircima modulišućeg signala, što u suštini znači da se položaj impulsa mijenja u odnosu na njegov referentni položaj u odsustvu modulišućeg signala, dobija se **impulsno položajna modulacija (IPM)**.



- Glavnu primjenu impulsnja modulacija ima u izgradnji sistema multipleksa, odnosno sistema za višestruki pristup. U tome ona ima određene prednosti nad ostalim vrstama modulacije. Ovakvi sistemi se nazivaju **multipleksom sa vremenskom raspodjelom kanala (VRK) ili vremenskim multipleksom**.
- U svakoj periodi odabiranja u njenom aktivnom dijelu postoji po jedan impuls, dok preostali, pasivni dio ostaje neiskorišćen. Kako je trajanje ovog dijela znatno duže od trajanja aktivnog intervala, on može da se iskoristi za postavljanje niza novih odbiraka od kojih svaki pripada drugom izvoru. Razmatra se više različitih i nezavisnih izvora signala. Jedan takav sistem multipleksa sa VRK prikazan je svojom principskom šemom na slici.



Neka se postupkom impulsne amplitudske modulacije prenose četiri nezavisna signala. U svakom kanalu na ulazu postoji po jedan filter propusnik niskih učestanosti. Na taj način svaki od signala $u_{mi}(t)$ ima spektar ograničen učestanošću f_m . Sa TO šematski je prikazan predajni odabirač. Njegov klizač se obrće konstantnom ugaonom brzinom. Na taj način na izlaz predajnika u sukcesivnim vremenskim intervalima dolaze odbirci pojedinih signala $u_{mi}(t)$. Saglasno ovom, signal na ulazu u predajnik izgledaće kao na slici:



- U toku jedne periode odabiranja, $T = 1/2f_m$, klizač napravi jedan obrt i od svakog signala uzme po jedan odbirak. Dobijeni multipleksni signal prenosi se linijom veze i prima u prijemuiku. Na ulazu prijemnika nalazi se prijemni odabirač RO, čiji klizač mora da se okreće sinhrono sa klizačem predajnog odabirača TO. Na taj način, on u toku jedne periode odabiranja, sukcesivno, u odgovarajućim trenucima, uključuje svaki od kanalnih filtara na izlazu prijemnika R. Na taj način se svaki od ulaza izlaznih filtara pobuđuje odbircima koji pripadaju tom kanalu (odbirci odgovarajućeg signala $u_{mi}(t)$). Na izlazu filtra ovi odbirci daju originalan signal.
- Osnovna ideja u izgradnji sistema multipleksa sa vremenskom raspodjelom kanala je da se **cio sistem prenosa u određenim vremenskim intervalima stavlja na raspolaganje samo jednom kanalu.** Znači, nije moguće, bar u principu, da signali iz dva ili više kanala budu istovremeno prisutni u sistemu za prenos. Iz ovoga proističu određene prednosti sistema sa vremenskom raspodjelom kanala u odnosu na sisteme sa frekvencijskom raspodjelom kanala (FRK).

- Dobra strana ovakvog sistema je što pitanje linearnosti karakteristike ulaz-izlaz za pojedine sklopove nije ni izdaleka tako kritično kao u sistemu sa FRK. U sistemima sa FRK istovremeno prisutni različiti signali uslijed nelinearnosti sklopova prouzrokuju preslušavanje nastalo intermodulacijom. Ovo u sistemima sa VRK nije moguće.
- Sva kola i sklopovi u sistemima sa VRK su jednostavniji. Nema velikog broja različitih kvalitetnih filtara, modulatora, generatora nosilaca i drugih sklopova. Isto tako degradacija kvaliteta izazvana šumom znatno je manja za određene vrste sistema sa impulsnom modulacijom nego što je to u sistemima sa FRK.
- Najveći nedostatak predstavlja potreba za relativno vrlo širokim propusnim opsegom učestanosti koji mora da ima sistem za prenos. Ukoliko se želi da multipleks sadrži veći broj kanala, utoliko je manji interval vremena u jednoj periodi odabiranja T koji se stavlja na raspolaganje svakom od kanala, a to znači i širi propusni opseg. Takođe je potrebno da linearna amplitudska i fazna izobličenja u sistemima sa VRK budu mala. U protivnom, može da dođe do takve deformacije impulsa da oni budu pomjereni sa mjesta u intervalu odabiranja koje im pripada. Na taj način nastaje preslušavanje. Još jedna specifičnost sistema sa VRK je problem sinhronizacije. On se obično rješava slanjem sinhronizacionih signala kojima se najčešće stavlja na raspolaganje jedan poseban kanal.

SPEKTAR IAM SIGNALA

Neka je $u_0(t)$ funkcija koja opisuje nosilac. Kako je to periodična povorka pravougaonih impulsa amplitude U_0 , trajanja τ i periode ponavljanja $T = 1/2f_m$, gdje je f_m maksimalna učestanost u spektru signala $u_m(t)$, $u_0(t)$ će biti:

$$u_0(t) = U_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t - nT)$$

U ovom izrazu funkcija $s(t - nT)$ definisana je na sljedeći način:

$$s(t - nT) = \begin{cases} 1 & , \text{ za } nT - \tau/2 < t < nT + \tau/2 \\ 0 & , \text{ za ostale vrijednosti} \end{cases}$$

Kako funkcija $u_o(t)$ predstavlja periodičnu povorku pravougaonih impulsa možemo je predstaviti Fourier-ovim redom:

$$u_o(t) = U_0 \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\omega_0\tau}{2}}{\frac{n\omega_0\tau}{2}} \cos n\omega_0 t \right] = U_0 \frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\omega_0\tau}{2}}{\frac{n\omega_0\tau}{2}} e^{jn\omega_0 t}$$

Množenjem modulišućeg signala $u_m(t)$ funkcijom $u_o(t)$ dobija se IAM signal:

$$u(t) = k_A u_m(t) u_o(t) = k_A U_0 \frac{\tau}{T} u_m(t) \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\omega_0\tau}{2}}{\frac{n\omega_0\tau}{2}} \cos n\omega_0 t \right]$$

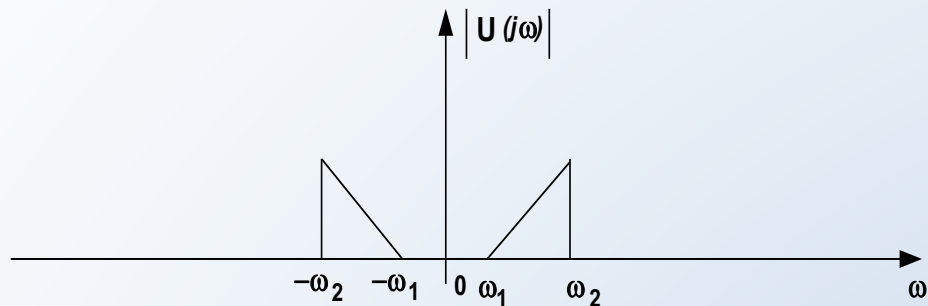
Ako se izračuna Fourier-ova transformacija ovog izraza dobija se spektar IAM signala u obliku:

$$U(j\omega) = k_A \frac{\tau}{T} U_0 U_m(j\omega) + k_A \frac{\tau}{T} U_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\omega_0 \tau}{2}}{\frac{n\omega_0 \tau}{2}} \times \{U_m[j(\omega - n\omega_0)] + U_m[j(\omega + n\omega_0)]\}$$

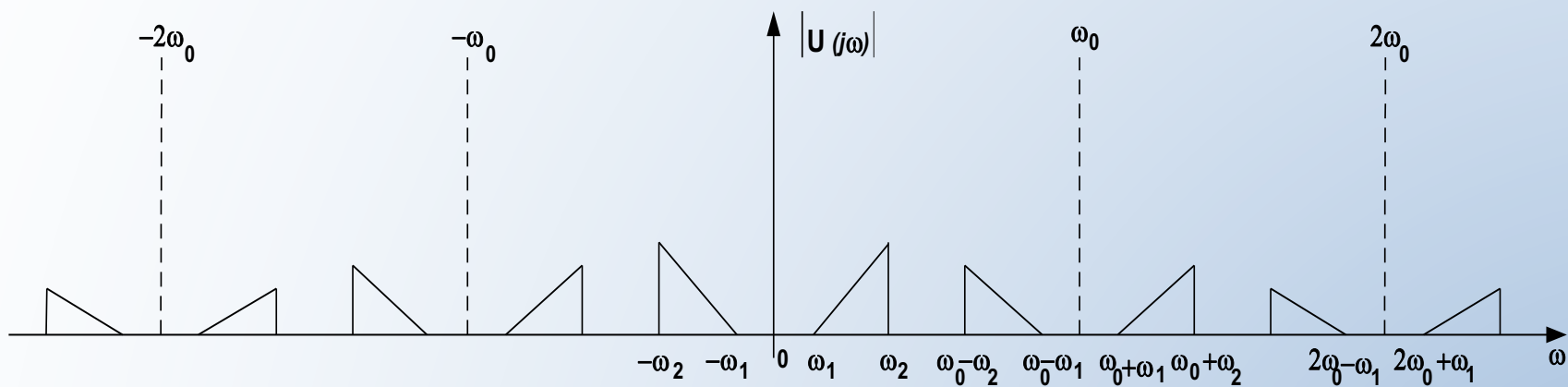
Prvi član u izrazu predstavlja spektar proporcionalan spektru modulišućeg signala. Svaki od članova pod znakom sume predstavlja spektar AM-2BO signala koji bi se dobio kad bi se modulišućim signalom $u_m(t)$ amplitudski modulisao nosilac $U_0 \cos n\omega_0 t$. Pri tome, spektralne gustine amplituda svakog AM-2BO signala u okolini učestanosti $n\omega_0$ su redukovane za faktor

$$\frac{\sin \frac{n\omega_0 \tau}{2}}{\frac{n\omega_0 \tau}{2}}$$

a)



b)



a) Spektralna gustina amplituda modulišućeg signala ; b) Spektralna gustina amplituda IAM signala

Dobijeni rezultat iz ove analize spektra neposredno ukazuje na način na koji je moguće demodulisati IAM signal. Vidi se da se na izlazu idealnog filtra propusnika niskih učestanosti dobija modulišući signal $u_m(t)$ pod uslovom da se na ulaz filtra dovede IAM signal. Ovo se može ostvariti pod uslovom da ne dođe do preklapanja gornjeg bočnog opsega modulišućeg signala i donjeg bočnog opsega AM-2BO signala na učestanosti ω_0 . Dakle, mora biti zadovoljen uslov:

$$\omega_2 \leq \omega_0 - \omega_2$$

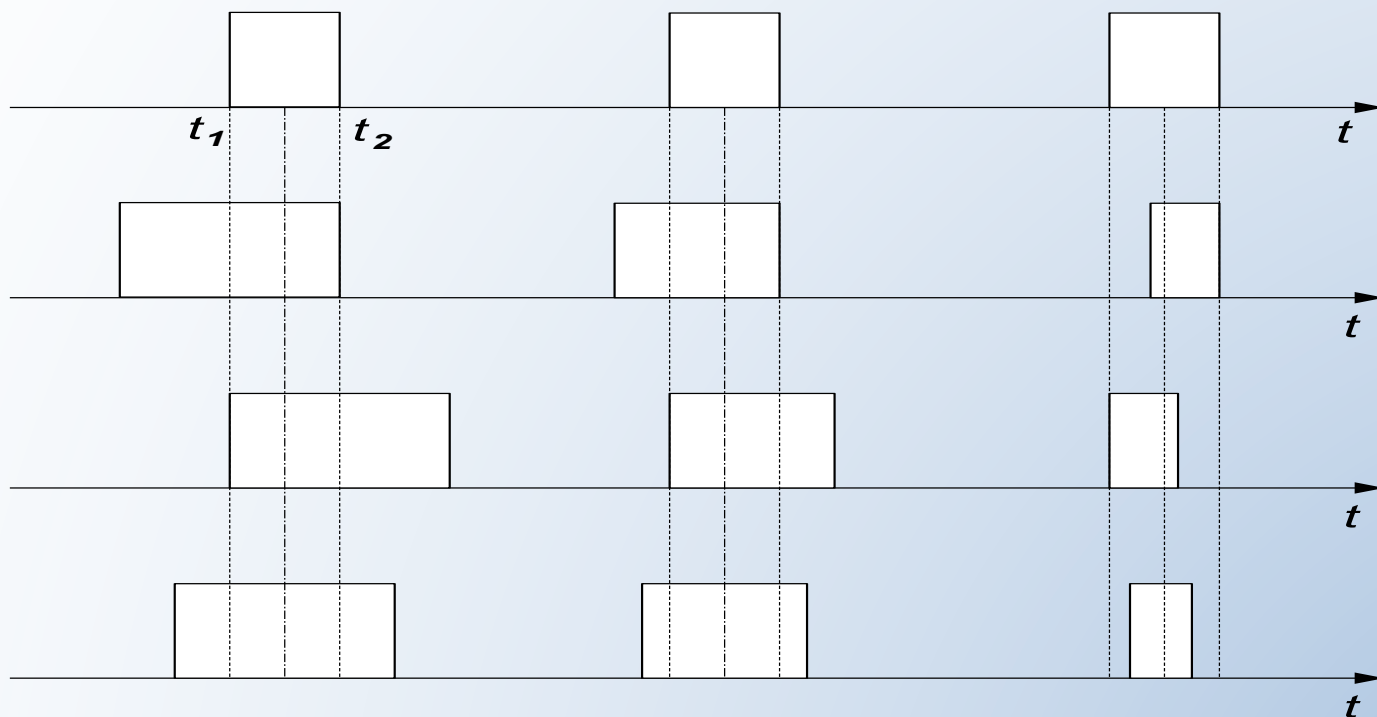
odnosno $\omega_0 \geq 2\omega_2$. Ovo, drugim riječima znači da perioda odabiranja

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad \text{mora biti} \quad T \leq \frac{1}{2f_2},$$

gdje je f_2 maksimalna učestanost u spektru modulišućeg signala.

IMPULSNA MODULACIJA PO TRAJANJU (ITM)

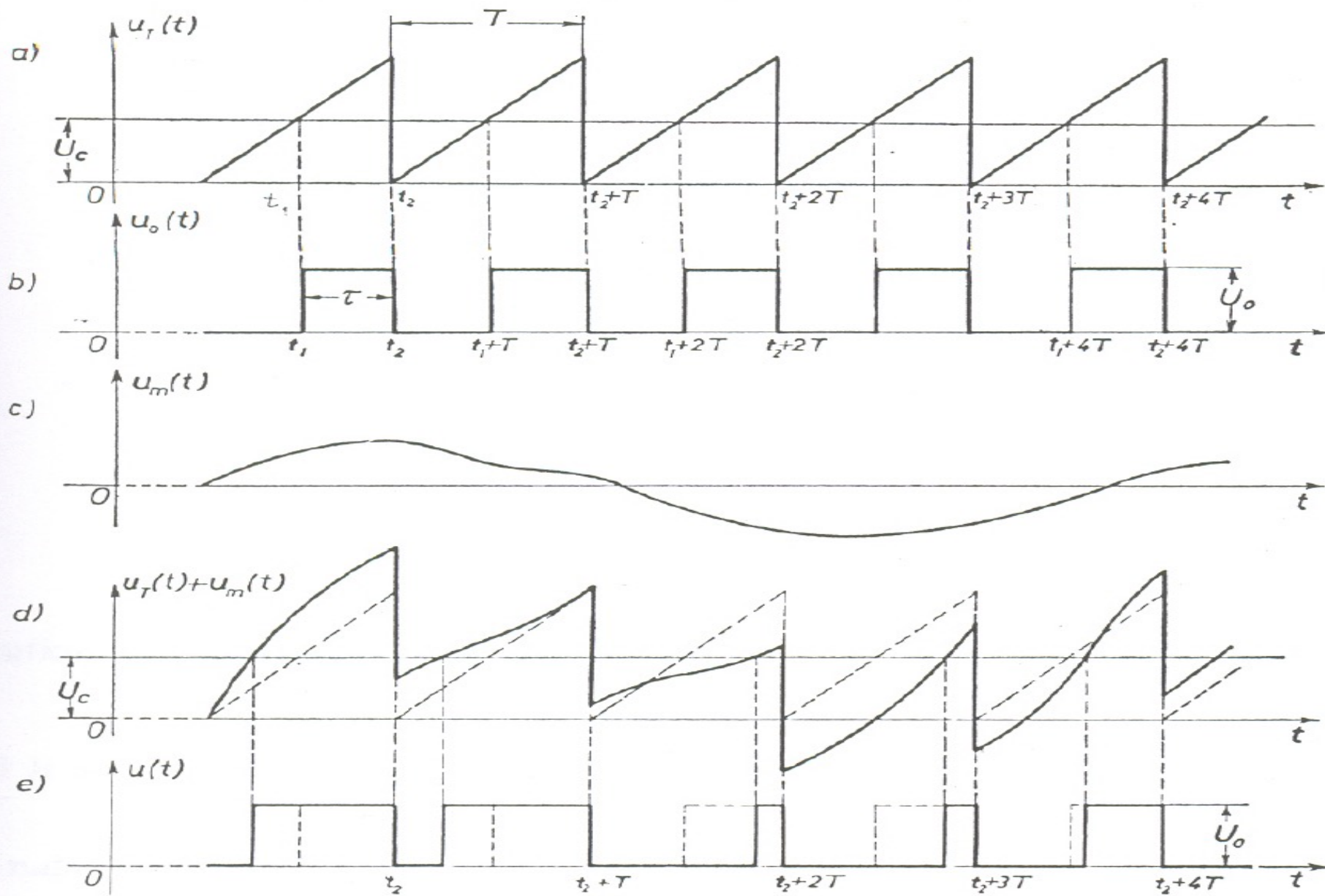
U postupku ITM trajanje impulsa nosioca postaje direktno proporcionalno modulišućem signalu $u_m(t)$.



a) Nemodulisani nosilac ; b) ITM sa promjenom prednje ivice ; c) ITM sa promjenom zadnje ivice ; d) ITM sa promjenom prednje i zadnje ivice impulsa

- Promjena dužine trajanja impulsa može da se ostvari na tri načina. Na prethodnoj slici pod a) je prikazan nemodulisani nosilac. Moguće je mijenjati dužinu trajanja impulsa u zavisnosti od modulišućeg signala,
 - bilo pomjeranjem samo prednje ivice impulsa (t_1),
 - bilo pomjeranjem samo zadnje ivice impulsa (t_2) ili
 - simetričnim pomjeranjem i prednje i zadnje ivice u odnosu na sredinu impulsa nemodulisanog nosioca.
- Impulsna modulacija po trajanju manje je osjetljiva na pojavu šuma u odnosu na IAM. Sem toga, ova modulacija se relativno lako ostvaruje i istovremeno iz nje može da se dobije određenim postupkom impulsna položajna, pa i frekvencijska modulacija.

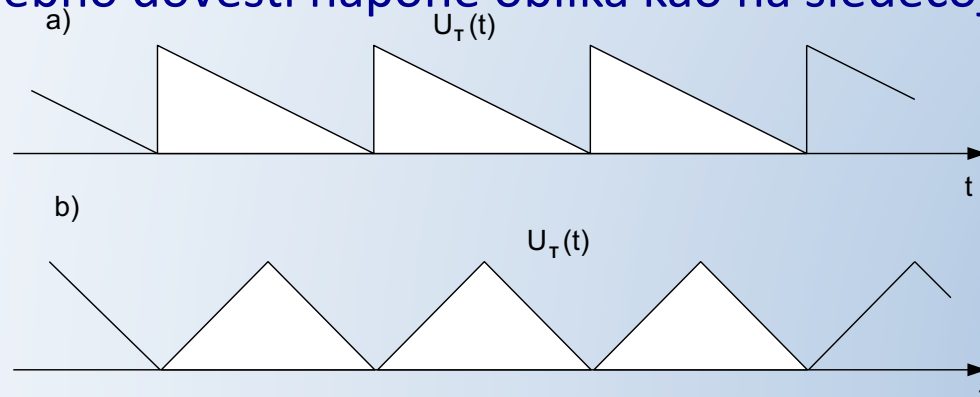
PRINCIP REALIZACIJE ITM



U ovom postupku koristi se jedan jednostavan elektronski sklop koji ima osobinu da na svom izlazu generiše pravougaoni impuls koji traje za sve vrijeme 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 prethodnoj slici i ako je za pobudu potrebno da ulazni napon bude veći od U_c , onda će se u svakom intervalu vremena u kojem je $u_T(t) > U_c$ generisati na izlazu po jedan pravougaoni impuls. Na taj način se od testerastog napona dobija povorka pravougaonih impulsa.

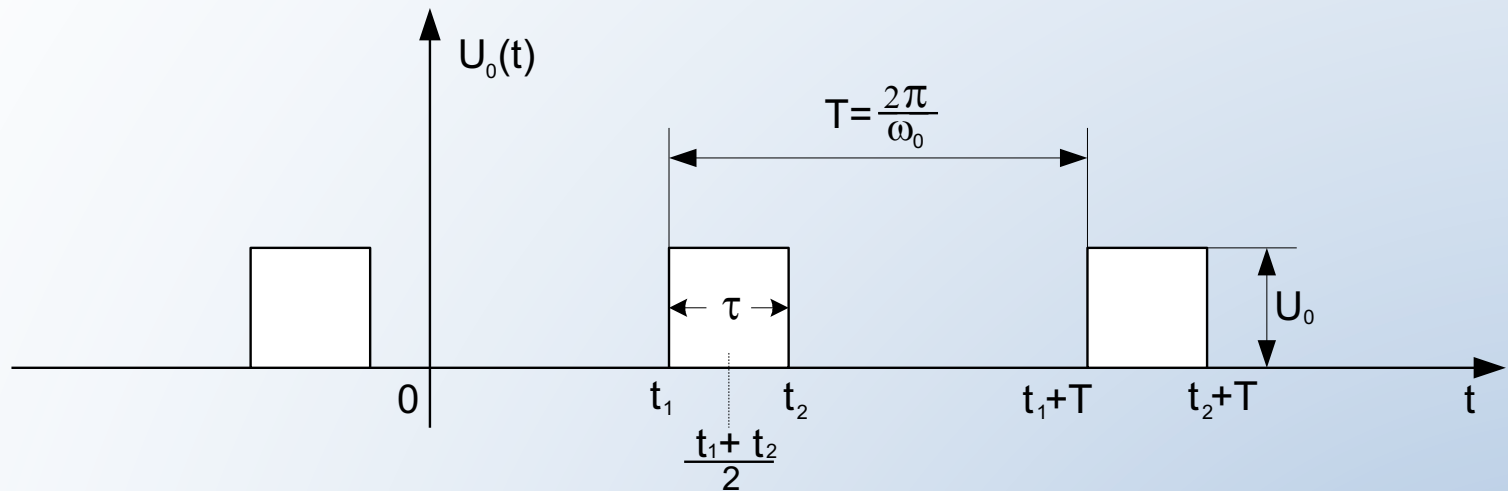
Ako se izvori testerastog i modulišućeg napona vežu na red, onda će pobudni napon sklopa biti dat njihovom sumom $u_T(t) + u_m(t)$. Na izlazu sklopa dobiće se impulsi modulisani po trajanju kod kojih se pomjera prednja ivica, a zadnja ostaje u fiksnom položaju. Vrijeme trajanja impulsa definisano je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

Za promjenu položaja zadnje, odnosno i prednje i zadnje, ivice na ulaz komparatora je potrebno dovesti napone oblika kao na sledećoj slici:



SPEKTAR ITM SIGNALA

Na slici je nacrtan nemodulisani nosilac. Trajanje svakog impulsa iznosi $\tau = t_2 - t_1$, perioda ponavljanja $T = 2\pi/\omega_0$, a amplituda U_0 .



Funkcija $u_0(t)$ koja predstavlja ovu povorku definisana je na sledeći način:

$$u_0(t) = \begin{cases} U_0 & , \text{ za } t_1 + pT \leq t \leq t_2 + pT; p = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \\ 0 & , \text{ izvan ovih intervala} \end{cases}$$

Funkcija $u_0(t)$ se može predstaviti u obliku Fourier-ovog reda:

$$u_0(t) = U_0 \frac{t_2 - t_1}{T} + 2U_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t_2 - t_1}{T} \frac{\sin n\omega_0 \frac{t_2 - t_1}{2}}{n\omega_0 \frac{t_2 - t_1}{2}} \cos n\omega_0 \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right)$$

odnosno:

$$u_0(t) = U_0 \left[\frac{t_2 - t_1}{T} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \sin n\omega_0 \frac{t_2 - t_1}{2} \cos n\omega_0 \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right]$$

Ako iskoristimo trigonometrijsku transformaciju:

$$2 \sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$$

izraz za $u_0(t)$ će glasiti:

$$u_0(t) = U_0 \left\{ \frac{t_2 - t_1}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} [\sin n\omega_0(t - t_1) - \sin n\omega_0(t - t_2)] \right\}$$

Da bi dobili izraz za impulsno modulisan signal po trajanju kome se mijenja položaj samo prednje ivice, potrebno je u prethodnom izrazu ostaviti da t_2 bude konstantno, a umjesto t_1 staviti $t_1 - k_T u_m(t)$. Poslije izvršene modulacije će biti $t_2 - t_1 = t_2 - t_1 + k_T u_m(t)$, pa možemo napisati analitički izraz za ITM signal:

$$u(t) = U_0 \left[\frac{\tau}{T} + \frac{k_T u_m(t)}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \left[\sin n\omega_0(t - t_1 + k_T u_m(t)) - \sin n\omega_0(t - t_2) \right] \right]$$

Na osnovu ovog izraza možemo izvršiti analizu spektra ITM signala.

- Prvi član, $U_0 \frac{\tau}{T}$, predstavlja konstantu kojoj u spektru odgovara komponenta na učestanosti $\omega=0$.
- Drugi član, $U_0 \frac{k_T}{T} u_m(t)$, direktno je srazmjeran modulišućem signalu.
- Treći član izraza predstavlja beskonačnu sumu fazno modulisanih signala čiji n -ti član ima oblik:

$$\frac{U_0}{n\pi} \sin n\omega_0 [t - t_1 + k_T u_m(t)]$$

pri čemu je maksimalna devijacija faze n -tog člana :

$$\Delta\Phi_{0n} = n\omega_0 k_T |u_m(t)|_{\max} = n\omega_0 k_T U_m$$

SPEKTAR ITM SIGNALA

Da bi dobili izraz za impulsno modulisan signal po trajanju kome se mijenja položaj samo prednje ivice, potrebno je u prethodnom izrazu ostaviti da t_2 bude konstantno, a umjesto t_1 staviti $t_1 - k_T u_m(t)$. Poslije izvršene modulacije će biti $t_2 - t_1 = t_2 - t_1 + k_T u_m(t)$, pa možemo napisati analitički izraz za ITM signal:

$$u(t) = U_0 \left[\frac{\tau}{T} + \frac{k_T u_m(t)}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} [\sin n\omega_0(t - t_1 + k_T u_m(t)) - \sin n\omega_0(t - t_2)] \right]$$

Na osnovu ovog izraza možemo izvršiti analizu spektra ITM signala.

- Prvi član, $U_0 \frac{\tau}{T}$, predstavlja konstantu kojoj u spektru odgovara komponenta na učestanosti $\omega=0$.
- Drugi član, $U_0 \frac{k_T}{T} u_m(t)$, direktno je srazmjeran modulišućem signalu.
- Treći član izraza predstavlja beskonačnu sumu fazno modulisanih signala čiji n -ti član ima oblik:

$$\frac{U_0}{n\pi} \sin n\omega_0 [t - t_1 + k_T u_m(t)]$$

pri čemu je maksimalna devijacija faze n -tog člana :

$$\Delta\Phi_{0n} = n\omega_0 k_T |u_m(t)|_{\max} = n\omega_0 k_T U_m$$

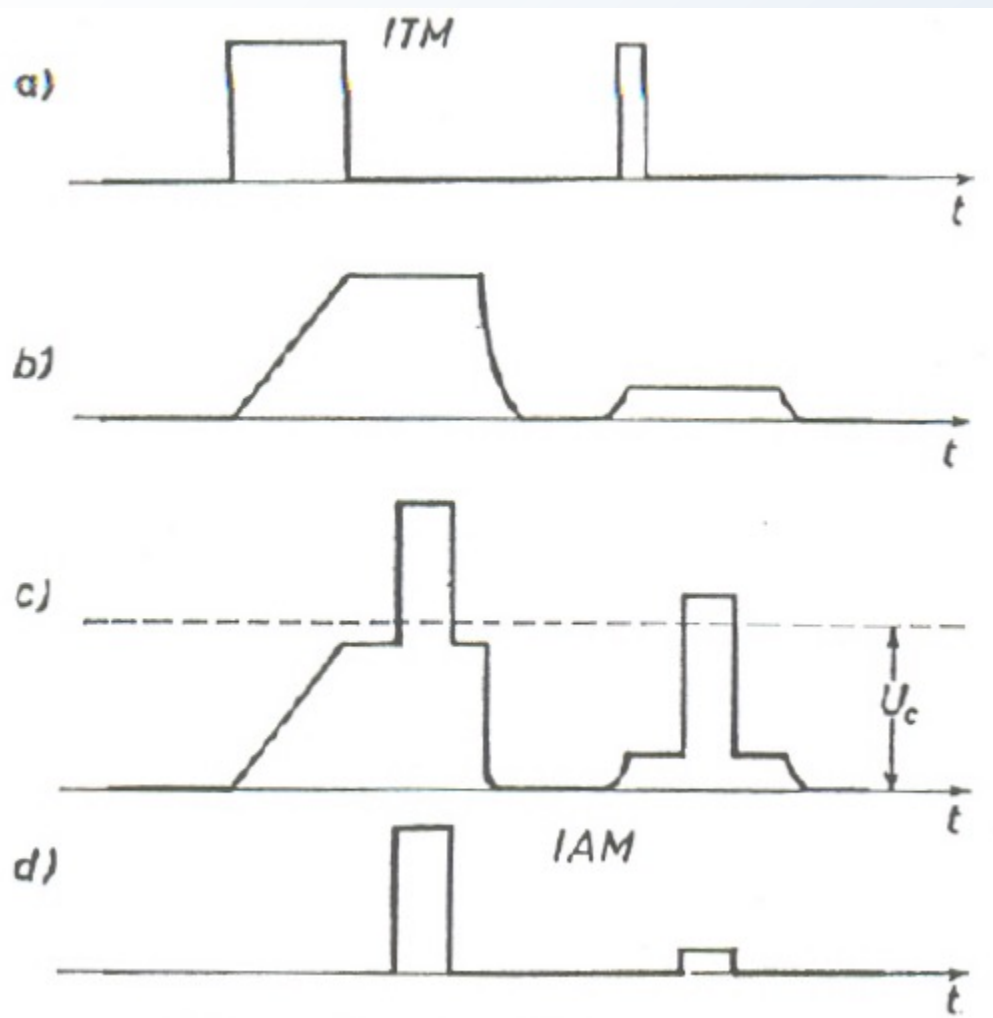
DEMODULACIJA ITM SIGNALA

Demodulacija ITM signala može da se obavi na dva načina:

1. **Direktno** – upotrebom filtra propusnika niskih učestanosti, jer spektar ITM signala sadrži u sebi spektar signala poruke u originalnoj formi. Pri tome, mora se obratiti pažnja da ne dođe do preklapanja dijela spektra koji predstavlja signal poruke sa fazno modulisanim komponentama, što se postiže smanjenjem devijacije faze, odnosno indeksa modulacije.
2. **Konverzijom ITM signala u IAM signal**, koji se zatim demoduliše upotrebom filtra propusnika niskih učestanosti.

Konverzija ITM signala u IAM signal najčešće se obavlja pomoću kola za pamćenje, odnosno za zadržavanje. To je elektronski sklop u kojem se jedan kondenzator puni tako da je napon na njegovim krajevima direktno srazmjeran trajanju impulsa koji ga pobuđuje i koji, po prestanku pobude, vrlo približno zadržava postignuti nivo napona sve do trenutka u kojem se, pražnjenjem kondenzatora kroz neku granu, ne generiše nov impuls čija je amplituda direktno srazmjerna naponu na kondenzatoru.

Na sledećoj slici su prikazani talasni oblici u postupku konverzije ITM signala u IAM signal.



Talasni oblici u postupku konverzije ITM signala u IAM signal: a) ITM signal; b) napon na kondenzatoru u kolu za zadržavanje; c) impulsi superponirani naponu iz tačke b); d) IAM signal

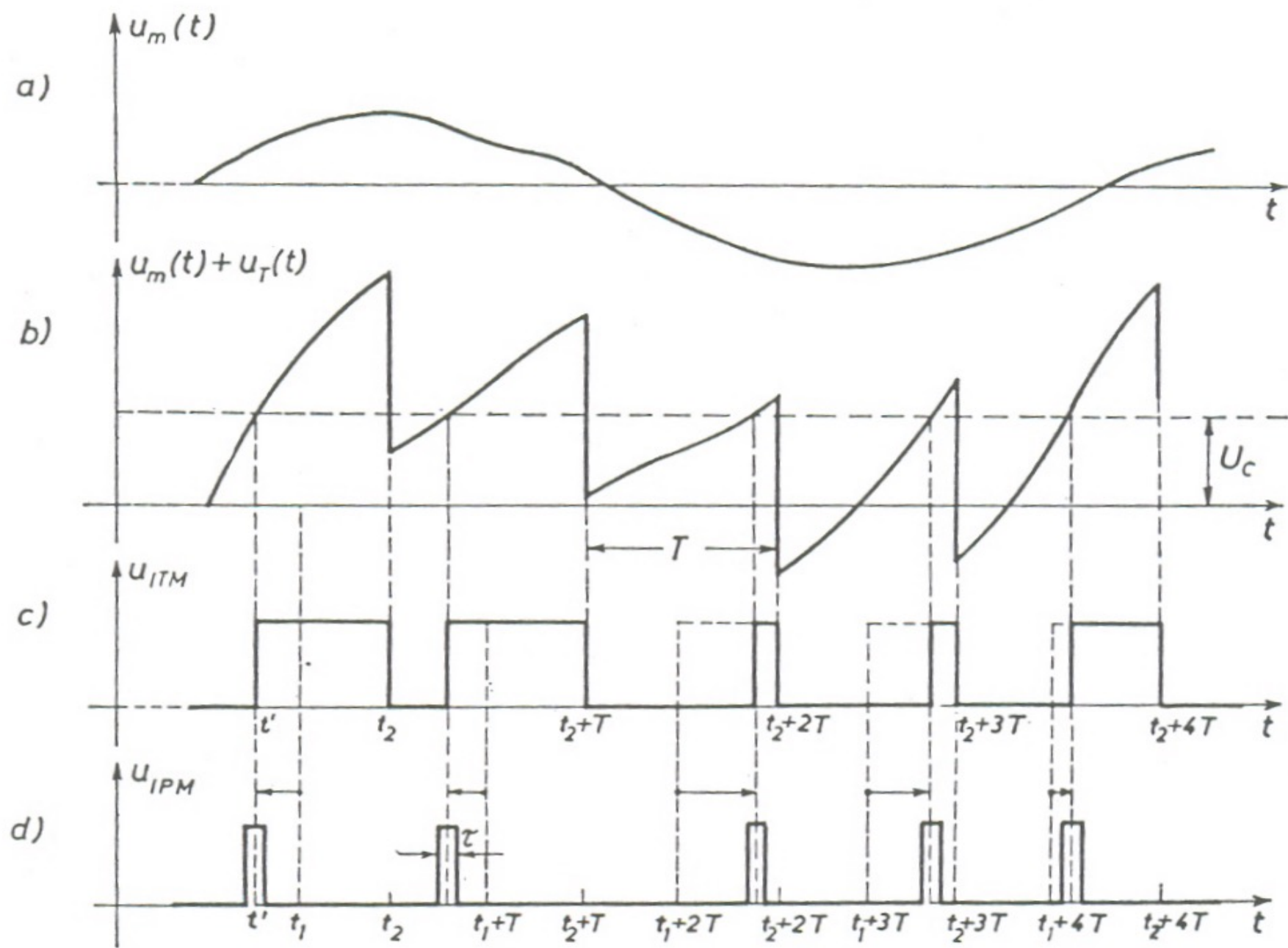
- Na slici pod a) prikazani su impulsi modulisani po trajanju, a pod b) napon koji se dobija na kondenzatoru iz kola za zadržavanje. Ako bi se ovim naponom pobudilo kolo za odabiranje, na njegovom izlazu bi se dobio IAM signal. Međutim, moguć je i jedan drugi postupak. Ako se naponu na krajevima kondenzatora iz sklopa za zadržavanje superponiraju u regularnim intervalima pravougaoni impulsi, onda se dobija napon kao na slici pod c). Pobudi li se ovim naponom neki pojačavač koji je tako polarisan da počinje da provodi pri ulaznim naponima većim od kontrolnog napona U_c , dobiće se na njegovom izlazu IAM signal prikazan na slici pod d). Na taj način se obavlja konverzija ITM signala u IAM signal. Ako se sada ovaj poslednji propusti kroz filter niskih učestanosti, na njegovom izlazu dobiće se modulišući signal.

ITM je od posebnog značaja za impulsnu položajnu modulaciju koja se iz nje lako izvodi. Inače, u direktnom prenosu ona se ne koristi, jer ova poslednja pruža znatne prednosti.

IMPULSNO POLOŽAJNA MODULACIJA (IPM)

- Kod ITM nepotrebno se troši energija signala koju sadrži cio impuls jer, sem promjenljivog položaja ivice, ostali njegov dio ne sadrži nikakvu informaciju. Na prevazilaženju ovog problema zasniva se ideja za realizaciju IPM.
- Ako je riječ o prednjoj ivici kao promjenljivom parametru, onda se umjesto cijelog impulsa, čije je trajanje promjenljivo i ravno $|t - t_2|$, može prenositi jedan uzak impuls trajanja τ koji svojim položajem u vremenu definiše položaj prednje ivice ITM signala. Prema tome, položaj impulsa u odnosu na referentne tačke $t_1, t_1 + T, t_1 + 2T \dots$ predstavlja promjenljivi parametar u kome je sadržana poruka.
- Impulsna položajna modulacija je manje osjetljiva na šum od IAM. S obzirom na prednosti koje ima nad ITM, ova vrsta modulacije primjenjuje se u sistemima multipleksa sa malim brojem kanala. Realizovani su sistemi za prenos govora sa 12, 24, 36 pa i 60 kanala.

Na sledećoj slici dati su talasni oblici karakteristični u realizaciji impulsne položajne modulacije.

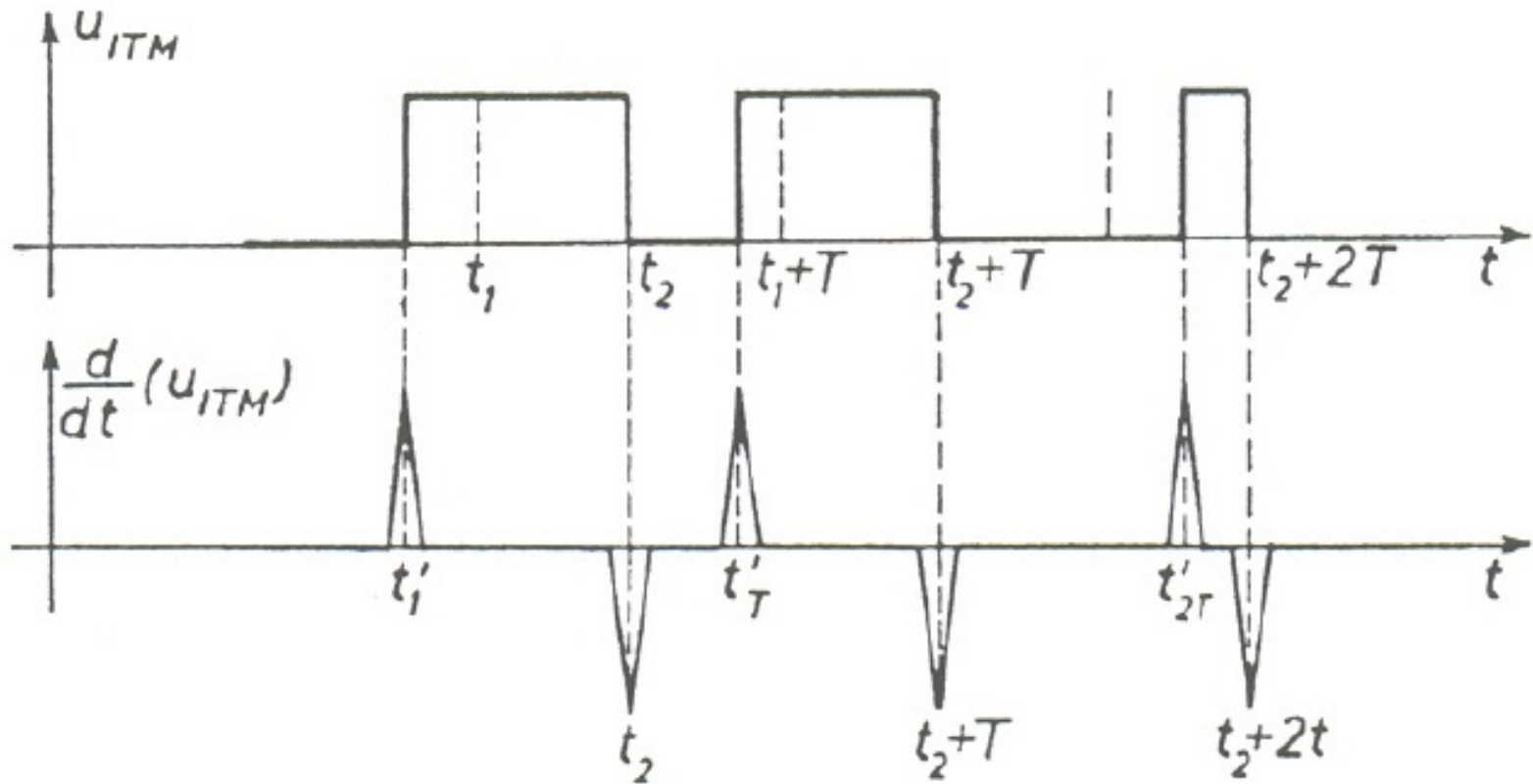


PRINCIPI REALIZACIJE IPM

Postoji više načina za realizaciju IPM, ali se najčešće koriste sledeća dva:

1. Najprije se proizvede ITM signal, a zatim ovako modulisani impulsi po trajanju pobuđuju jedan elektronski sklop koji na svom izlazu generiše impuls kratkog trajanja svaki put kada modulisana ivica ITM signala prođe kroz neku kontrolnu specificiranu vrijednost.
2. I u drugom načinu se polazi od ITM signala. Propuštajući ovakav signal kroz kolo za diferenciranje, pod uslovom da je njegova vremenska konstanta znatno manja od trajanja ITM signala, od svakog njegovog impulsa dobiće se dva kratka impulsa. Ta dva impulsa imaju suprotan polaritet. Svi ovi kratki impulsi, koji su izvedeni od ivice čiji se položaj mijenja, imaju isti polaritet. Naravno, isto tako i oni koji pripadaju fiksnim ivicama. Ako se ovi poslednji impulsi odstrane, što je moguće učiniti podesno polarisanim linearnim elektronskim sklopom, na njegovom izlazu dobiće se IPM signal.

Na sledećoj slici su prikazani talasni oblici pri realizaciji IPM signala drugom metodom.



Talasni oblici ITM signala u_{ITM} i diferenciranjem dobijeni signal $d(u_{ITM})/dt$

SPEKTAR IPM SIGNALA

Spektar IPM signala može se pronaći koristeći isti analitički pristup koji se koristio pri nalaženju spektra ITM signala. Pretpostavićemo da je $u_m(t)$ signal čiji je spektar ograničen učestanošću f_m . To znači da perioda ponavljanja u nemodulisanoj povorci impulsa treba da bude $T \leq \frac{1}{2f_m}$

Periodična povorka nemodulisanih impulsa data je formulom:

$$u_0(t) = U_0 \left\{ \frac{t_2 - t_1}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} [\sin n\omega_0(t - t_1) - \sin n\omega_0(t - t_2)] \right\}$$

U ovom izrazu za svako $t = t_1 + pT$, dobiće se prednja ivica impulsa, a za svako $t = t_2 + pT$, njegova zadnja ivica, pri čemu je $p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Položaj prednje ivice modulisanog impulsa u nekom trenutku t linearno zavisi od modulišućeg signala u tom istom trenutku u kojem se pojavljuje prednja ivica. Ti trenuci t , u kojima se pojavljuju prednje ivice modulisanih impulsa dati su relacijom: $t = t_1 + pT - k_T u_m(t), \quad k_T = \text{const.}$

To znači da ćemo umjesto t_1 u izrazu za periodičnu povorku nemoduliranih impulsa staviti $t_1 - k_T u_m(t)$.

Zadnja ivica impulsa u ovoj vrsti modulacije takođe se pomjera. Širina impulsa mora da ostane nepromijenjena i da iznosi τ , pa će trenuci u kojima se javlja zadnja ivica impulsa biti definisani izrazom:

$$t = t_2 + pT - k_T u_m(t - \tau)$$

To znači da ćemo umjesto t_2 u izrazu za periodičnu povorku nemoduliranih impulsa staviti $t_2 - k_T u_m(t - \tau)$

Konačan izraz za IPM signal postaje:

$$u(t) = U_0 \left\{ \frac{\tau}{T} + \frac{k_T}{T} [u_m(t) - u_m(t - \tau)] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} [\sin n\omega_0(t - t_1 + k_T u_m(t)) - \sin n\omega_0(t - t_2 + k_T u_m(t - \tau))] \right\}$$

- Prvi član izraza $\frac{\tau}{T} U_0$ predstavlja komponentu na učestanosti $\omega = 0$.

- Drugi član, $\frac{k_T}{T} U_0 [u_m(t) - u_m(t - \tau)]$ zavisi od modulišućeg signala. Međutim, on mu nije direktno srazmjeran kao što je to bilo kod ITM.

Njegova spektralna gustina amplituda biće data izrazom:

$$2 \frac{k_T}{T} U_0 |U_m(j\omega)| \sin \frac{\omega\tau}{2}$$

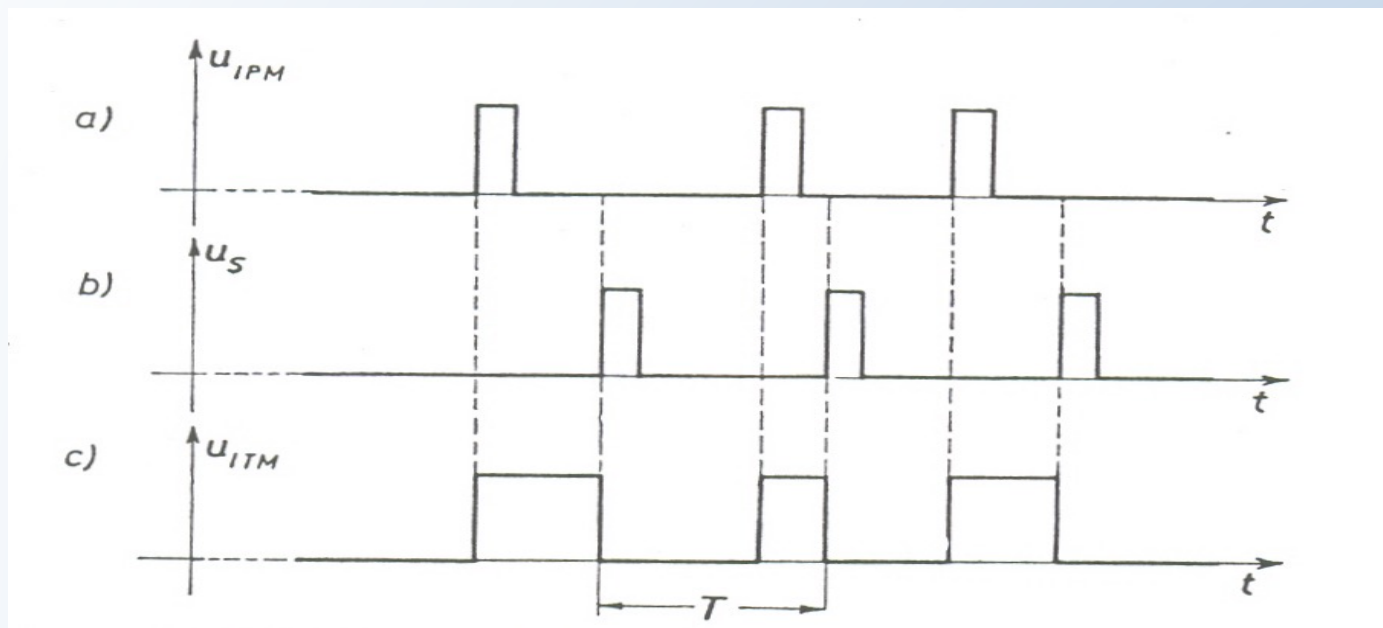
Ovaj član sadrži spekar modulišućeg signala, samo je on izobličen jer se množi faktorom $\sin \frac{\omega\tau}{2}$ koji zavisi od učestanosti.

- U trećem članu izraza za $u(t)$ svaki sabirak predstavlja fazno modulisan signal signalom $u_m(t)$. Ovakvih fazno modulisanih signala ima beskonačno mnogo. Kako svaki od ovih fazno modulisanih signala ima neograničen spektar, to se svi ti spektri međusobno preklapaju u cijelom opsegu učestanosti od 0 do ∞ .

- Isto ovo važi i za četvrti član izraza, s tom razlikom što je modulišući signal vremenski pomjeren za τ .

DEMODULACIJA IPM SIGNALA

Za demodulaciju IPM signala najčešće se primjenjuju dva metoda. U prvom, na prijemu se obavi konverzija IPM signala u ITM signal, a onda se ovaj demoduliše. Konverzija se obavlja pomoću elektronskog kola koje ima dva stabilna stanja. Jedno od njih se uspostavlja pod uticajem impulsa IPM signala, a drugo pod uticajem impulsa dobijenih iz generatora sinhronizacionih impulsa u prijemniku. To kolo funkcioniše na sledeći način:



a) IPM signal; b) impulsi iz sinhronizacionog generatora; c) ITM signal.

Kada se na jednom ulazu sklopa pojavi jedan impuls IPM signala, on na njegovom izlazu uspostavi konstantan napon. Trenutak uključenja se poklapa sa trenutkom u kojem se pojavi prednja ivica impulsa. Impuls iz sinhronizacionog generatora koji se dovodi na drugi ulaz sklopa uspostavlja prvobitno stanje: vraća izlazni napon na nulu. Pošto je povorka sinhronizacionih impulsa periodična, jasno je da će impulsi dobijeni na izlazu iz konvertora biti modulirani po trajanju.

U drugom metodu demodulacije koristi se filter niskih učestanosti kome je na izlaz vezan amplitudski korektor. Analizirajući spektar IPM signala vidjeli smo da spektralna gustina amplituda drugog člana glasi:

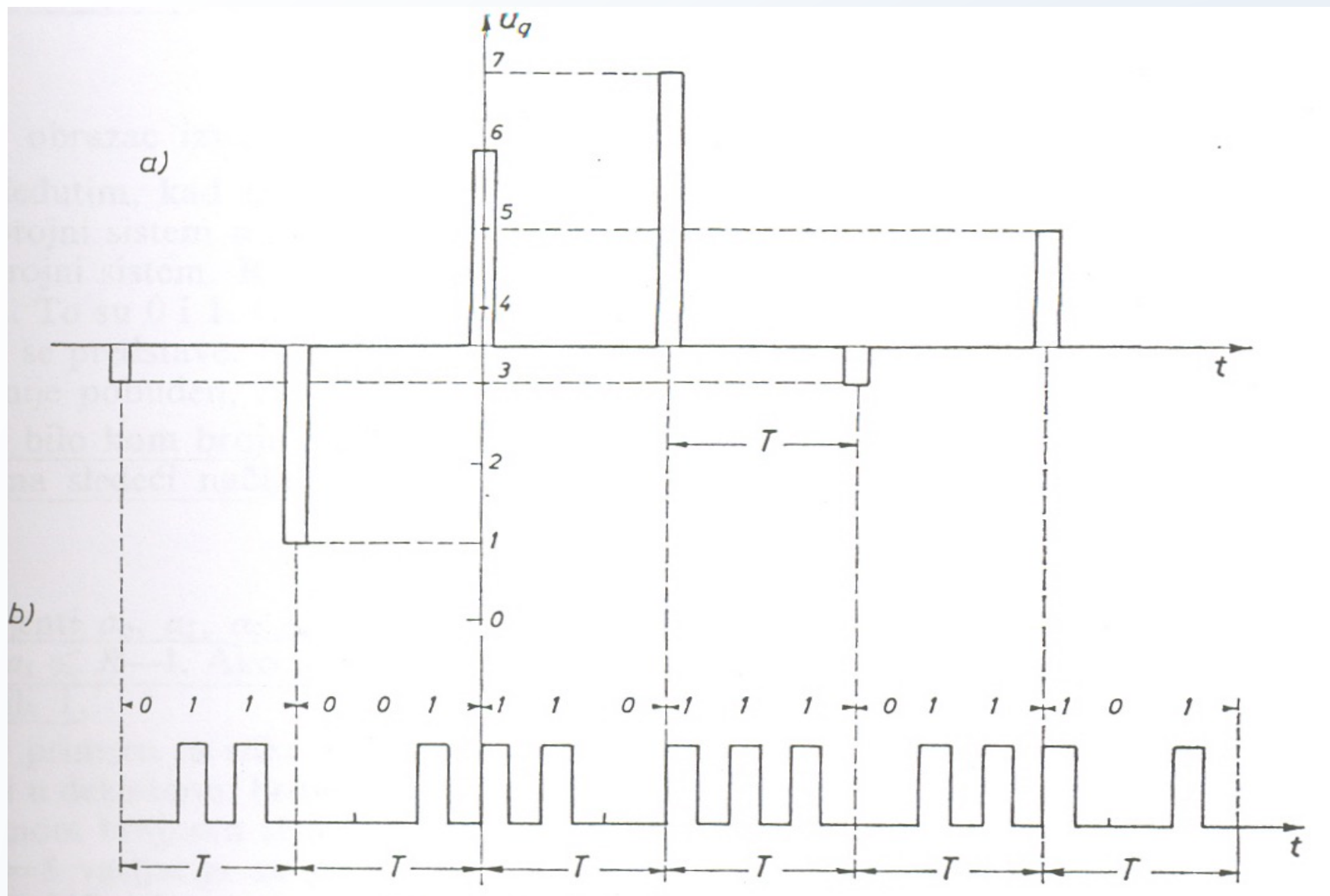
$$2 \frac{k_T}{T} U_0 |U_m(j\omega)| \sin \frac{\omega\tau}{2}$$

Ovaj član ima spektar u istom opsegu učestanosti kao i modulišući signal od 0 do f_m , pa on može da se izdvoji filtrom. Ali, spektar koji se dobije na izlazu iz filtra modifikovan je po amplitudi faktorom $\sin \frac{\omega\tau}{2}$. To znači da je signal izobličen. Napravi li se korektor koji je u stanju da otkloni ove varijacije, na njegovom izlazu dobiće se neizobličen signal.

IMPULSNA KODNA MODULACIJA (IKM)

Impulsna kodna modulacija spada u grupu impulsnih modulacija jer modulirani signal ima diskretan talasni oblik. Međutim, princip sistema za prenos signala IKM-om bitno se razlikuje od koncepcija usvojenih u realizaciji svih ostalih vrsta modulacije, uključujući i impulsne modulacije. Faktički, riječ je o postupku koji je predstavnik digitalnih modulacija. Osim oznake IKM mnogo češće se koristi oznaka **PCM** (*Pulse Code Modulation*). Prva ideja o prenosu signala impulsno kodnom modulacijom patentirana je 1938. god.

- Princip na kome počiva postupak IKM zasniva se na diskretizaciji kontinualnih poruka, odnosno njima odgovarajućih signala. **U osnovi IKM-a su teorema o odabiranju i kvantizacija.**
- Postupkom kvantizacije se već na samom početku pravi izvjesna greška. Veličina te greške zavisi od broja kvantizacionih nivoa, odnosno od “finoće zaokruživanja”



a) Kvantizirani odbirci signala $u(t)$; b) odgovarajući IKM signal

Sa slike se uočava da amplituda svakog od odbiraka ima jednu određenu vrijednost iz skupa mogućih vrijednosti. Pošto je taj skup konačan, znači da se mogu numerisati te moguće vrijednosti. U prethodnom primjeru ih ima 8, pa ćemo početnu vrijednost obilježiti sa 0, drugu sa 1, i tako redom do 7.

Sada možemo umjesto odbiraka prenositi cifre (2, 2, 5, 6, 7, 4, ...), ali se pokazuje nepraktično vršiti prenos cifara dekadnog brojnog sistema. U električnom smislu, mnogo je povoljnije numerisanje odbiraka ciframa binarnog brojnog sistema, jer on ima svega dva različita stanja: 0 i 1.

Ovakva dva simbola u nekom električnom sistemu mogu vrlo lako da se predstave (npr. 1 – ima “struje”, 0 - nema “struje”).

U bilo kom brojnom sistemu čija je osnova R , neki broj N uvijek može da se napiše u sledećem obliku:

$$N = \dots + a_2 R^2 + a_1 R^1 + a_0 R^0$$

Koeficijenti $a_0, a_1, a_2, \dots$, predstavljaju neki cio broj koji zadovoljava uslov

$0 \leq a_i \leq R - 1$. Ako je u pitanju binarni brojni sistem $R = 2$, koeficijenti a_i mogu biti 0 ili 1.

U našem primjeru smo imali $q = 8$ kvantizacionih nivoa, koje smo numerisali u dekadnom brojnom sistemu ciframa 0, 1, ...7. Ako ih numerišemo u binarnom brojnom sistemu potrebno je da obrazujemo $q = 8$ varijacija sa ponavljanjem n -te klase. Ovo znači da će u svakoj takvoj varijaciji biti n – simbola. Broj varijacija sa ponavljanjem n – te klase od 2 različita simbola, računa se na osnovu obrasca:

$$q = 2^n$$

pa za $q = 8$, n iznosi 3. Na osnovu koda između decimalnog i binarnog sistema imaćemo da je:

$$0 = 0(2^2) + 0(2^1) + 0(2^0) = 000$$

$$1 = 0(2^2) + 0(2^1) + 1(2^0) = 001$$

$$2 = 0(2^2) + 1(2^1) + 0(2^0) = 010$$

$$3 = 0(2^2) + 1(2^1) + 1(2^0) = 011$$

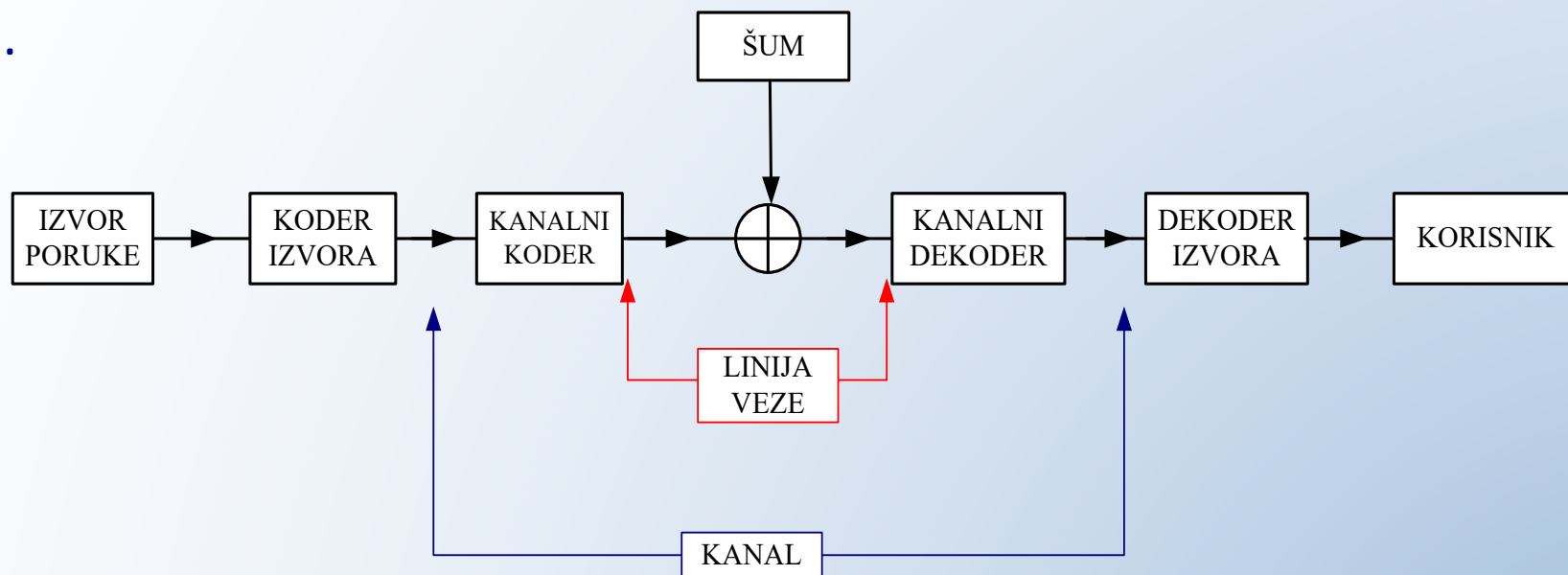
$$4 = 1(2^2) + 0(2^1) + 0(2^0) = 100$$

$$5 = 1(2^2) + 0(2^1) + 1(2^0) = 101$$

$$6 = 1(2^2) + 1(2^1) + 0(2^0) = 110$$

$$7 = 1(2^2) + 1(2^1) + 1(2^0) = 111$$

Ako se na strani predaje impulsi, koji su zahvaljujući kvantizaciji numerisani u decimalnom brojnom sistemu, sada numerišu u binarnom brojnom sistemu saglasno prethodnom kodu, onda umjesto brojeva 3 1 6 7 3 5, treba prenijeti brojeve 011, 001, 110, 111, 011, 101 itd. Ovakvi skupovi u nekom električnom sistemu mogu da se predstave povorkom impulsa i pauza. Ta operacija obavlja se u koderu. Broju 1 odgovara znak, a broju 0 pauza. Na taj način vrši se kodna modulacija kvantiziranih odbiraka signala $u(t)$.



1.Koder izvora – sastavni dio predajnika koji treba da pretvori poruku u odgovarajući kod (niz simbola iz konačnog skupa različitih simbola)

2.Kanalni koder – pretvara koderom izvora kodirnu poruku u signal

3.Kanalni dekoder – primljeni signal pretvara u kodiranu poruku

4.Dekoder izvora – poruku predstavljenu odgovarajućim kodom prevodi u odgovarajući oblik pogodan za korisnika

Ovakav signal prenosi se kroz sistem do prijemnika. Poznavajući kod, ovi impulsi mogu ponovo da se pretvore u odgovarajuće odbirke. Taj proces se obavlja u dekoderu i kaže se da je signal dekodiran. Propuštajući dekodirane impulse potom kroz niskofrekventni filter, na njegovom izlazu dobiće se signal $u_q(t)$. Ako učinjena greška kvantizacije $u_N(t)$ nije velika, $u_q(t)$ se neće mnogo razlikovati od $u(t)$ i prenos će biti prihvatljiv.

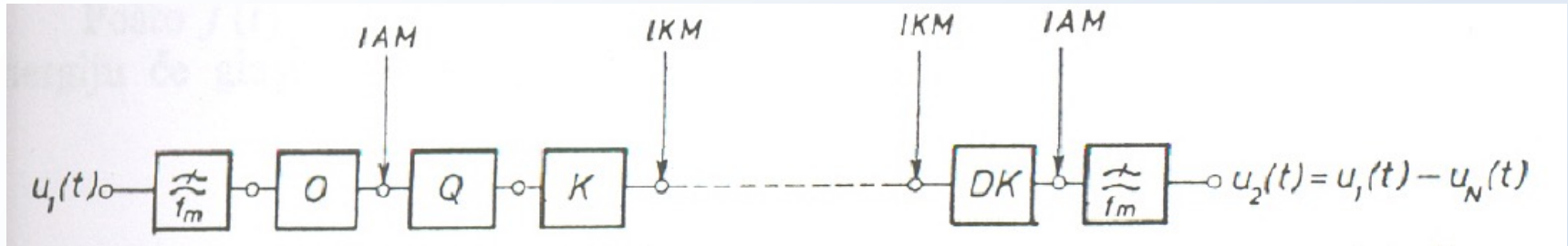
Ovakvi sistemi prenosa diskretnog tipa u kojima se u stvari prenose brojevi nazivaju se **digitalnim sistemima prenosa**.

Ovakvim postupkom modulacije problem prijema svodi se na jednostavan problem odlučivanja. Prijemnik treba svaki put da odgovori na pitanje da li je u datom intervalu predajnik poslao impuls ili ne. Pri tome, talasni oblik primljenog signala može biti značajno deformisan u odnosu na poslani signal. Potrebno je da on bude očuvan samo toliko da prijemnik može da odlučuje, odnosno regeneriše novi signal. Jasno je da svi uređaji i sklopovi jednog ovakvog sistema mogu biti mnogo jednostavniji i manje precizni nego u analognim sistemima prenosa.

Druga prednost je u tome što se u ovim sistemima može tolerisati znatno veći šum nego u analognim sistemima. Ovo zbog toga što u vezi koja ima niz relejnih pojačavačkih stanica šum ima kumulativan efekat kod analognih sistema. Taj kumulativan efekat može da se izbjegne u sistemima sa IKM, jer se na svakoj relejnoj stanici postavlja regenerativni pojačavač.

Glavni nedostatak sistema sa IKM-om je to što su sva poboljšanja postignuta na račun širine propusnog opsega koji sistem mora da ima. Baš radi ovoga, sistemi sa IKM ne primjenjuju se na magistralnim trasama veza koje imaju veliki broj kanala. Ali, zato sistemi multipleksa sa IKM pokazuju svoju ekonomičnost u vezama na kratka rastojanja.

- IKM modulacija omogućava da se od analognog signala dobije digitalni.



Najprije se signal ograničenog spektra diskretizuje po vremenu, tj. obavlja se postupak impulsne amplitudske modulacije. Uzeti odbirci se kvantiziraju pa se potom kodiraju.

- U predajniku se obavlja analogno-digitalna konverzija, a na strani prijema se obavlja digitalno-analogna konverzija. U tu svrhu se koristi dekoder (DK) koji IKM signal pretvara u kvantizirane odbirke signala. Dekoder mora biti komplementaran sa koderom da bi kombinaciju nula i jedinica pretvorio u odgovarajući odbirak. Na kraju se nalazi NF filter koji vrši rekonstrukciju signala na bazi kvantiziranih odbiraka. Dobijeni signal na izlazu će se razlikovati od originalne poruke za grešku kvantizacije $u_N(t)$.

- U IKM sistemu sa neravnomjernom kvantizacijom, na izlazu iz ekspandora dobiće se kvantizirani odbirci prenošenog signala. Kada se oni dovedu na ulaz NF filtra, signal na njegovom izlazu predstavljaće kvantizirani signal $u_q(t)$.



Blok šema sistema za prenos sa IKM

O – predajni odabirač ; C – kompresor ; $Q + K$ - sklop za kvantiziranje i kodiranje ; D – dekodier ; E – ekspandor.