

### 3.2. PRINCIPIUL MODULATIEI DELTA (MD)

#### 3.2.1. Modulatia numerica diferentiala

Modulatia impulsurilor in cod (PCM) nu reprezinta singura modalitate de transformare a unui semnal analog in semnal digital.

Exista mai multe metode diferentiale ale caror principii de baza constau in faptul ca se esantioneaza, cuantizeaza si codeaza modificarile produse asupra semnalului analog in timpul perioadei de esantionare si nu toate valorile sale la momentele de esantionare.

In majoritatea metodelor diferentiale, codarea diferentei marimii amplitudinii esantioanelor se face prin PCM cu un numar de biti mai mic decât cel necesar in timpul codarii PCM clasice. Functie de modul cum se codifica semnalul numeric si de analiza semnalului pe baza esantioanelor precedente, tinând seama de proprietatile statistice ale lui, se disting mai multe sisteme cu modulatie numerica diferentiala; cele mai folosite sisteme tehnice numerice sunt:

- sisteme cu modulatie delta ( $M\Delta$ );
- sisteme cu modulatia impulsurilor in cod-Diferentiala (MIC-D).

#### 3.2.2. Modulatia delta ( $M\Delta$ )

Din studiul principiului MIC rezulta ca, indiferent de marimea amplitudinii esantionului semnalului, el se codeaza cu 8 biti.

Sunt doua variante de scheme structurale cu MIC- $\Delta$ . In figura 3.16. semnalul diferenta este obtinut in forma numerica, iar in figura 3.17. prin prelucrarea analogica. Dezavantajul schemelor consta in faptul ca produc distorsiuni neliniare.

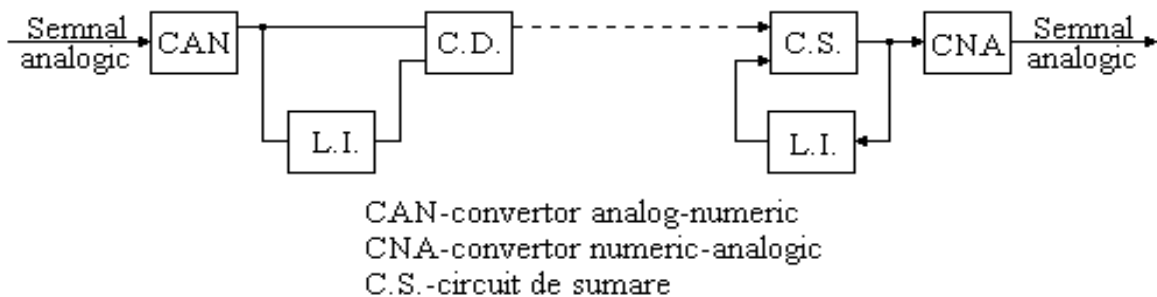


Fig. 3.16. Formarea numerica a semnalului diferenta

Daca la intrarea transmitatorului se aplica o tensiune linear crescatoare, la iesirea receptorului se obtine tot o tensiune linear crescatoare, iar panta sa nu poate lua decât valorile:  $0, \delta/T_e, 2\delta/T_e, \dots, K\delta/T_e$  in care:

- $\delta$  – marimea pasului de cuantizare;
- $T_e$  – perioada de esantionare.

La receptie pantele celor doua semnale nu coincid, aparând diferenta intre semnalul receptionat si cel transmis.

In figura 3.17. eroarea de cuantizare este de doi pasi de cuantizare, ceea ce duce la marirea puterii zgomotului de 4 ori.

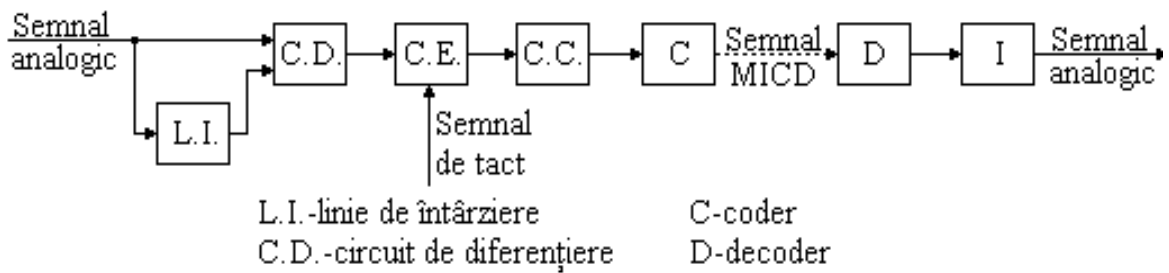


Fig. 3.17. Formarea analogica a semnalului diferenta

Pentru minimizarea acestor distorsiuni se compara permanent semnalul initial cu semnalul de la iesirea codecului, comparatia executându-se in codere delta ce au in circuitul de reactie un decoder pentru refacerea semnalului analogic.

Daca se tine seama de corelatia existenta intre esantioanele semnalului (fiecare tip de semnal are o anumita valoare) rezulta ca se poate reduce numarul de biti pe esantion, minimizând o parte din redundanta semnalului.

Semnalele electrice care intereseaza in comunicatiile digitale (telefonie, videotelefonie) au o densitate spectrala care scade pe masura cresterii frecventei. Esantioanele acestor semnale au legaturi de corelatie care sunt functie de tipul semnalului. Daca esantioanele se iau cu frecventa de esantionare de 8 kHz, coeficientul de corelatie intre esantioane este mai mare de 0,5. Pentru semnalul telefonic se poate alege o frecventa de esantionare astfel incât diferenta intre marimile a doua esantioane sa fie de marimea pasului de cuantizare. Se poate transmite intre sursa si receptor doar sensul de variatie a esantionului curent fata de cel anterior de ordinul 1, ordinul 2, s.a.m.d. Se realizeaza in acest fel cuantizarea cu un singur bit pentru semnalul diferenta care exprima rezultatul comparatiei.

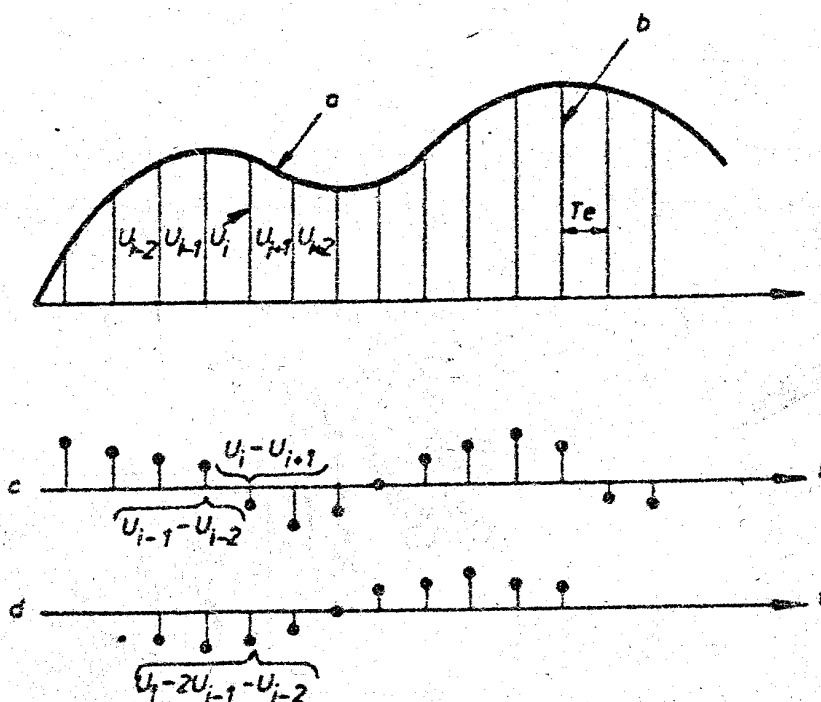


Fig. 3.18. Determinarea diferentelor de ordinul 1 si 2.

Daca se ia in calcul diferenta dintre esantionul curent si r esantioane anterioare atunci diferenta de ordinul r este:

$$\Delta U^{(r)} = \sum_{i=0}^r C_r^i (-1)^i \cdot U_i \quad (3.3.)$$

Un sistem de comunicatii clasic cu modulatie delta se compune din coder, canal de comunicatie si decoder. Semnalul  $u(t)$  cu spectru  $S(\omega)$  este transformat de coder intr-o

succesiune de simboluri binare care sunt transmise prin canalul de comunicare la decoder care reface semnalul transmis ce contine informatia.

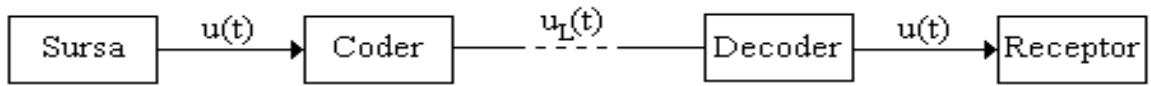


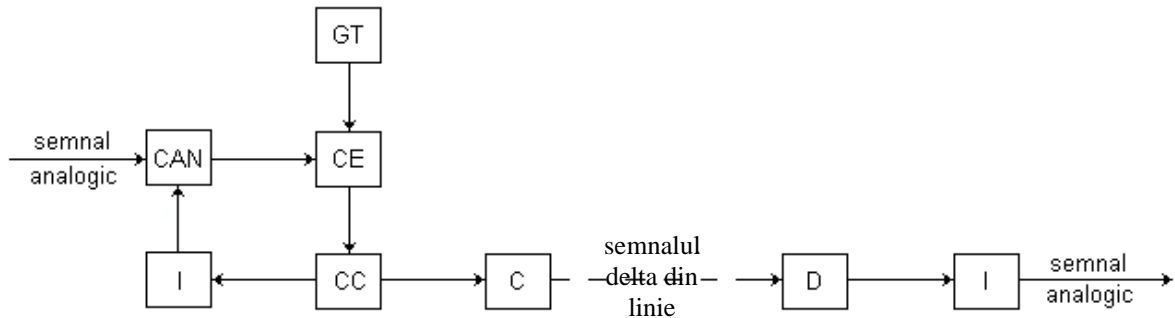
Fig. 3.19. Schema bloc a unui sistem cu modulator delta

Formarea semnalului numeric in modulatorul delta se realizeaza prin compararea semnalului de la un circuit de reactie (denumit si decoder local) cu semnalul initial analogic (fig. 3.20.).

Schema bloc a unui sistem cu modulator delta este o particularizare a schemei generale a unui modulator diferential. Ea este formata dintr-un comparator, coder, integrator si bucla care genereaza in permanenta la intrarea minus a comparatorului un semnal in trepte ce aproximeaza semnalul analog aplicat la intrarea plus. Fronturile anterior si posterior ale semnalului in trepte sunt comandate de un semnal periodic dat de generatorul de tact. La fiecare semnal de tact semnalul in trepte creste/descreste cu o treapta (doar una). In canalul de comunicare se transmit impulsuri cu polaritate pozitiva sau negativa in functie de variatia cu o treapta.

La receptor, un integrator identic cu cel de la emisie reface semnalul in trepte din care se obtine, dupa operatiunea de filtrare intr-un filtru trece jos, semnalul analog ce a fost aplicat modulatorului. Exista la semnalul receptionat erori sub forma de zgomot de cuantizare la fel ca la semnalul PCM.

CAN-circuit analog digital; CE-circuit de esantionare; CC-circuit de cuantizare; I-



integrator; D-decoder; C-coder, GT-generator de tact.

Fig. 3.20. Formarea semnalului modulat delta

In cazul modulatiei delta raportul semnal/zgomot de cuantizare ( $R_s/z_{g_c}$ ) este obtinut din relatia:

$$\frac{R_s}{z_{g_c}} \leq \frac{f_e^3}{2\pi^2 f_M^3} \quad (3.4)$$

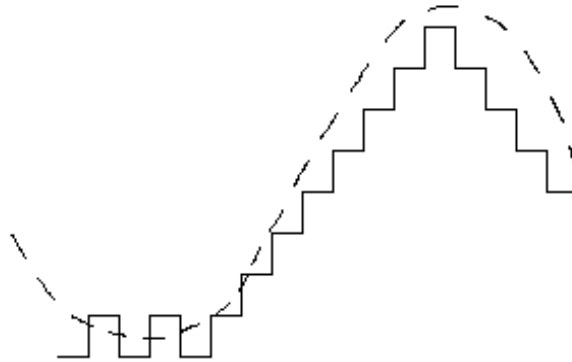
unde  $f_e$  este frecventa de esantionare iar  $f_M$  este frecventa maxima a spectrului de frecventa vocal.

Din relatia (3.4.) rezulta ca frecventa de esantionare trebuie sa fie de 125 ori mai mare decît frecventa maxima  $f_M$  a semnalului transmis in cazul cînd  $R_s/z_{g_c}$  este de 50 dB si

de 27 ori mai mare pentru un raport semnal-zgomot de cuantizare de 30 dB. Valoarea frecvenței de esantionare a modulatorului delta este de șase ori mai mare decât la modulatia impulsurilor în cod. Rezulta că la transmiterea semnalelor cu densitate spectrală uniformă și cu treaptă de cuantizare uniformă nu se reduce viteza de transmitere. În situația când se utilizează variante perfecționate ale modulatorilor delta se poate obține micșorarea vitezei de transmitere.

Într-un modulator delta poate să apară o distorsiune specifică acestui tip de modulație și care poate fi denumită depășire de pantă caracteristică intervalului când panta semnalului de intrare este mai mare decât panta semnalului de la ieșirea integratorului. (fig. 3.21.)

Fig. 3.21. Distorsiune tip depășire de pantă.



Panta maximă a unui semnal sinusoidal depinde proporțional de amplitudinea și de frecvența semnalului deci modulatorul are o caracteristică de supraîncărcare de tipul celei din figura 3.22.

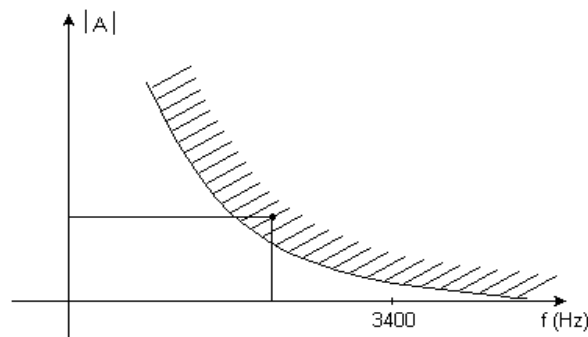


Fig. 3.22. Caracteristică de supraîncărcare a modulatorului delta.

Modulatorul este supraîncărcat de orice semnal sinusoidal a cărei frecvență și amplitudine determină un punct din zona hasurată.

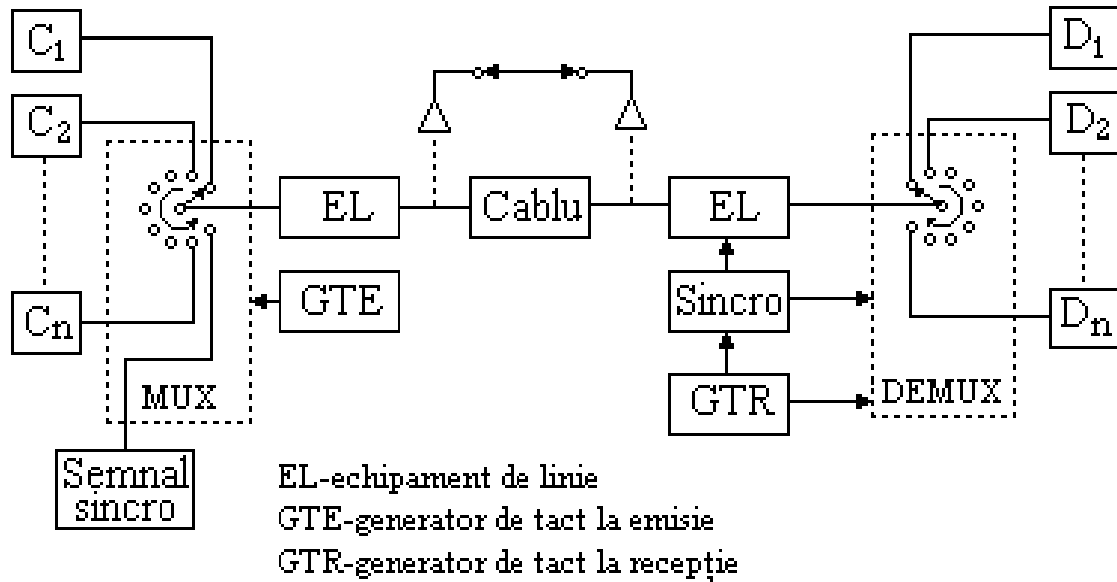
Modulația delta poate fi utilizată pentru transmisiuni telefonice multiplexate în timp, dar pentru fiecare cale telefonică în parte, urmând ca ulterior să se facă o multiplexare a semnalelor digitale.

### 3.2.3. Modulatia delta cu simpla integrare (liniara-MDL) și dubla integrare (neliniara- MDNL)

#### 3.2.3.1. Sistemul de comunicație cu modulație delta (SCM $\Delta$ )

Un sistem de comunicare cu modulatie delta prezinta urmatoarea schema bloc (fig. 3.23.).

Fig. 3.23. Sistem de comunicare cu modulatie delta.



Fiecarui terminal ii corespunde un modulator (coder) delta individual, semnalul binar fiind multiplexat in timp de catre blocul multiplexor (MUX) a carui functionare este comandata de generatorul de tact pentru emisie (GTE).

Multiplexorul insumeaza si semnalele de sincronizare si semnalizare.

Semnalele binare de la iesirea multiplexorului sunt aplicate echipamentului de linie care prin interfata de linie asigura, conform unui cod de linie, un semnal bipolar.

Semnalele sunt transmise prin canalul de comunicare (cablu simetric sau fibra optica, radioreleu, radio etc.).

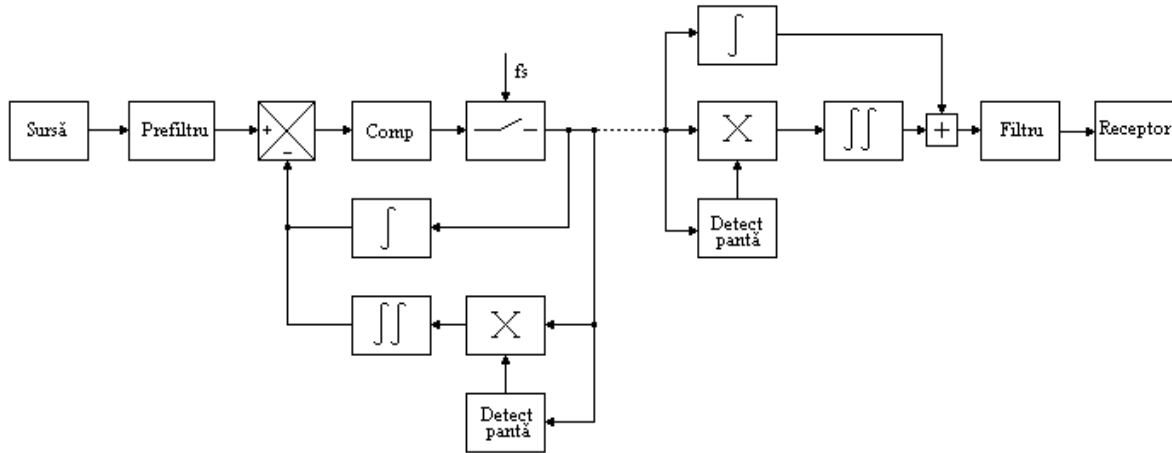
Prin codarea de linie semnalul digital a capatat anumite caracteristici care favorizeaza transmiterea sa pe un suport fizic. Transmiterea semnalelor digitale pe distante de ordinul zecilor sau sutelor de kilometri nu este posibila decât printr-un echipament de linie digital (fig. 3.23.) ce contine echipamentul de linie terminal si regeneratorul, componenta cea mai importanta care indeplineste functiile de refacere a impulsurilor, regenerarea semnalului de tact si regenerarea la iesire a impulsurilor.

La receptor semnalul de linie este transformat in semnal binar de echipamentul de linie digital (ELD). In demultiplexor (DEMUX) se separa caile multiplexate in timp in conformitate cu comenzile primite de la generatorul de tact pentru receptie (GTR). Semnalul analog se refaca de catre demoduloarele de cale.

Specific pentru echipamentele numerice cu modulatie delta este individualizarea codecurilor (coder+decoder). Modulatorul delta este in cazul general un convertor analog-digital pe principiul unei scheme cu reactie (fig. 3.25.), in care semnalul de iesire  $u_L(t)$  reprezinta aproximarea numerica a erorii  $e(t)$  dintre semnalul analog  $u(t)$ , care se modifica si semnalul  $u_r(t)$  care-l aproximeaza pe  $u(t)$ .

In figura 3.24. avem un sistem de modulatie delta complexa care are principala performanta dinamica de 35 dB la un raport semnal/zgomot de 28 dB.

Fig. 3.24. Sistem de modulatie delta complexa



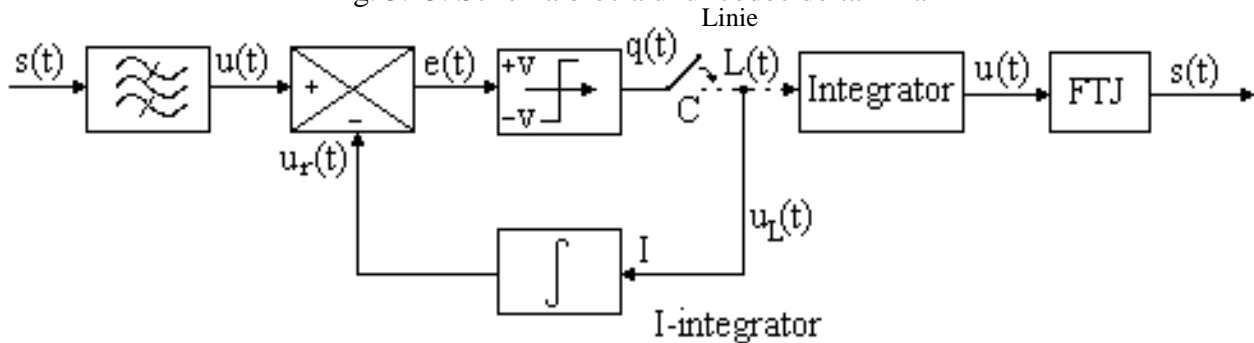
In functie de metoda de aproximare se disting mai multe tipuri de modulatie delta:

- daca semnalul  $u_r(t)$  se obtine prin simpla integrare a semnalului  $u_L(t)$ , spunem ca avem modulatie delta ( $M\Delta$ ) cu simpla integrare sau liniara ( $M\Delta L$ );
- daca aproximarea se face prin doua integrari succesive a semnalului  $u_L(t)$ , spunem ca exista modulatie delta cu dubla integrare ( $MDDI$ );
- daca contine doua bucle de reactie, o bucla liniara si una neliniara exista modulatie delta complexa.

### 3.2.3.2. Modulatie delta cu simpla integrare (MDSI) – modulatie delta liniara

Coderul delta poate fi un convertor analog-digital pe principiul unei scheme cu reactie.

Fig. 3.25. Schema bloc a unui codec delta liniar



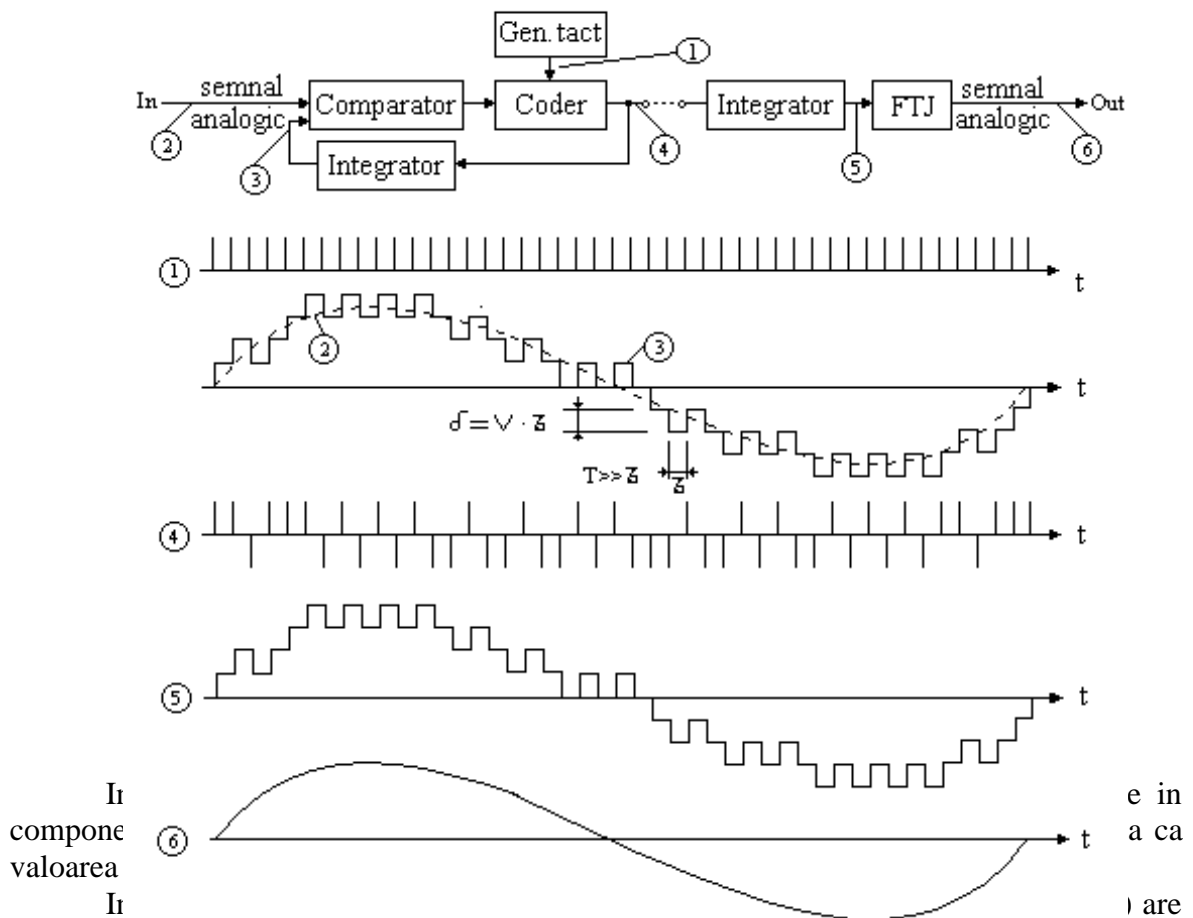
Semnalul telefonic continuu supus codarii este limitat in banda de catre un filtru trece banda care are frecventele de taiere  $f_1$  si  $f_2$ , rezultând semnalul electric  $u(t)$  care este aplicat comparatorului impreuna cu semnalul  $u_r(t)$  de reactie, de la iesirea integratorului. Semnalul de la iesirea coderului  $q(t)$  este un semnal numeric cu durata  $\tau$  secunde, amplitudinea  $\pm V$  volti si frecventa  $f_e=1/T$ , cu indeplinirea inegalitatilor  $T \gg \tau$  si  $f_e > 2f_2$ .

Frecventa de aparitie a impulsurilor binare este direct proportionala cu panta instantanee a lui  $u(t)$ . Daca panta semnalului  $u(t)$  este pozitiva, semnalul  $u_L(t)$  are in componenta un numar de impulsuri pozitive mai mare decât numarul de impulsuri

negative. Când  $u(t)$  are panta negativa raportul dintre numărul impulsurilor pozitive și negative se schimbă față de situația anterioară.

Formele de undă ale semnalelor din codorul delta liniar sunt prezentate în figura 3.26.

Semnalul  $u_L(t)$  este supus unei integrări simple pentru a se obține semnalul  $u_r(t)$  în trepte, de mărime  $\delta = V \tau$ , de durată  $T$  secunde (fig. 3.26.) care se aplică intrării inversoare a comparatorului și care aproximează semnalul de la intrarea codecului  $u(t)$ . Semnalul diferențial obținut în comparator este chiar semnalul eroare de comparație,  $e(t) = u(t) - u_r(t)$  ce este cuantizat în limitele  $\pm V$ , rezultând semnalul  $q(t)$ . Dacă  $e(t) > 0$ , la tactul următor va apărea la ieșirea cuantizorului un impuls pozitiv care aplicat circuitului de reacție va produce o mărire cu o treaptă a semnalului  $u_r(t)$  ce va determina scăderea semnalului  $u(t)$ . Astfel se micșorează eroarea  $e(t)$  care, dacă devine negativă, va determina ca  $u_L(t)$  să fie un impuls negativ, iar  $u_r(t)$  va scădea cu o treaptă. Ieșirea cuantizorului este esanționată la fiecare  $T$  secunde, rezultând semnalul  $L(t)$ . Fenomenele se repetă, procesul de urmărire continuă și astfel codorul delta minimizează eroarea dintre  $u(t)$  și  $u_r(t)$ .



are 10 impulsuri pozitive și 5 impulsuri negative. valoarea medie a lui  $u_L(t)$  pe acest interval  $t_1-t_2$  este  $4\delta\tau/10T$ . Integratorul ideal are răspunsul în impuls  $i(t)$  de forma:

$$i(t) = \begin{cases} \text{pentru } t \geq 0 \\ \end{cases}$$

0 pentru  $t < 0$ .

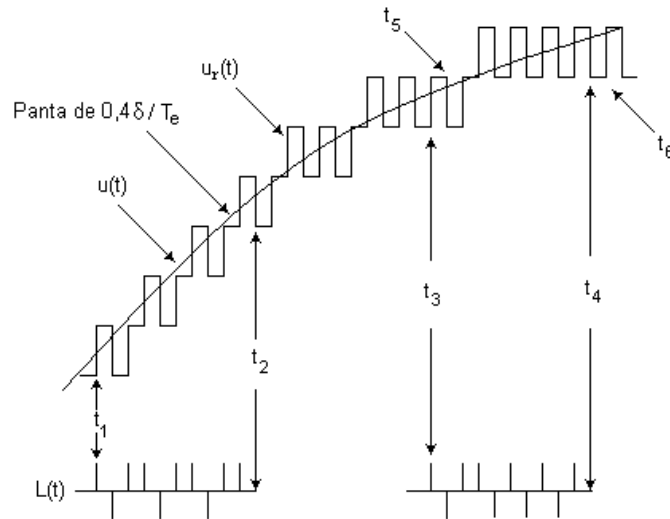


Fig. 3.27. Aproximarea pantei medii a lui  $u(t)$  de catre valoarea medie a lui  $u_L(t)$

Un impuls din semnalul de la iesire  $u_L(t)$  genereaza o treapta  $\delta = v \tau$  volti la iesirea integratorului.

La iesire din integrator  $u_r(t) = \delta$ . Valoarea medie a semnalului  $u_L(t)$  se poate exprima:  $u_{L(t)} = 4V\tau / 10T = 0,4\delta/T$ .

Variatia semnalului  $u(t)$  pe intervalul de timp  $t_1-t_2$  este  $3\delta$ , ceea ce corespunde la o panta medie de:

$$\frac{du(t)}{dt} = 0,3\delta/T \quad (3.5)$$

care reprezinta aproximarea valorii medii a semnalului de iesire  $u_r(t)$ .

Pentru imbunatatirea aproximarii este necesara o treapta  $\delta$  mica si o frecventa  $f_e$  mare. In intervalul  $t_3-t_4$  variatia lui  $u(t)$  este  $\delta$  ce corespunde la o panta medie  $du(t)/dt = 0,1\delta/T$  si  $u_L(t) = 0,2\delta/T$ , iar pentru intervalul  $t_5-t_6$   $du(t)/dt = 0,1\delta/T$  si valoarea medie a lui  $u_L(t)$  este nula.

Pentru ca modulatia delta liniara sa fie in urmarire se impune minimizarea treptei  $\delta$  pentru o frecventa de esantionare  $f_e$  data. Semnalul  $L(t)$  consta din impulsuri cu durata  $\tau$ ,

amplitudinea  $\pm V$  si frecventa de repetitie  $f_e = \frac{1}{T_e}$ , unde  $T_e \gg \tau$  si  $f_e \gg 2f_M$ . Decodorul

delta (fig. 3.25.) este compus dintr-un circuit integrator si un filtru trece jos (FTJ).

Circuitul integrator are rolul de a extrage semnalul in trepte din semnalul complex care a fost receptionat iar FTJ extrage semnalul de joasa frecventa  $u(t)$  care a fost transmis si care contine informatia.

In situatia in care consideram transmisia fara erori, semnalul  $u_L(t)$  din linie este refacut si integrat pentru a obtine semnalul in trepte  $u_r(t)$  care este identic cu semnalul  $u_r(t)$  din coder.

In realitate in canalul de comunicatie se introduc erori si, in consecinta, semnalul  $u_r(t)$  de la receptie difera de  $u(t)$  prin semnalul eroare (care este o marime cu atit mai mica cu cat apropiem mai mult pe  $u_r(t)$  de  $u(t)$ ); eroarea fiind minimizata se poate reproduce la iesire un semnal apropiat de semnalul transmis.



Treapta de cuantizare in cazul modulatiei delta este constanta si de regula este de 40 mV.

Modificarea a cel puțin una din caracteristicile modulatiei delta liniare conduce la alte tipuri de modulație delta, ca de exemplu modulația delta adaptivă. Pentru îmbunătățirea calitatii transmițerii semnalului de vorbire se utilizează modulația delta adaptivă, bazată pe faptul că mărimea treptei de cuantizare nu este uniformă ci se modifică (adaptează, compandea) în funcție de puterea silabică a semnalului telefonic (amplitudini mici sau mari).