

2.4. CONVERSIA ANALOG – NUMERICĂ A SEMNALELOR

2.4.1. PREZENTARE GENERALĂ

Pentru a putea fi acceptate de calculator în vederea prelucrării numerice semnalele analogice trebuie convertite în semnale numerice. În cadrul acestei conversii semnalul analogic este supus la trei operații succesive: eșantionarea, cuantificarea și codarea.

Prin eșantionare se realizează o observare periodică a semnalului analogic, materializată printr-o succesiune de eșantioane prelevate la anumite intervale de timp.

Cuantificarea (cuantizarea) este operația prin care eșantioanelor prelevate de dispozitivul eșantionator li se asociază semnale de aceeași natură, dar cu amplitudinea bine determinată. Pentru aceasta, domeniul de variație al semnalului analogic de intrare este împărțit într-un anumit număr de subdomenii (nivele), de obicei egale între ele. Dispozitivul de cuantificare va stabili în urma unei corelații prestabilite câte subdomenii cumulate corespund eșantioanelor de amplitudine prelevate și implicit, ce amplitudine vor avea semnalele de la ieșirea sa.

Deci, în urma eșantionării și cuantificării, unui semnal analogic cu o infinitate de valori în domeniul său de variație i se va atribui o mărime analogică de aceeași natură, dar cu un număr prestabilit de valori.

Codificarea este operația prin care fiecărui semnal rezultat în urma cuantificării i se atribuie un număr ce descrie valoric amplitudinea sa.

Eșantionarea se realizează în circuitele de eșantionare și memorare (CEM), iar cuantificarea și codificarea sunt operații realizate de convertoarele analog-numerice (CAN).

Aproape în totalitate codificarea se realizează într-un cod binar. Cele mai folosite coduri binare sunt: codul binar natural, complementar față de 1, complementar față de 2, Gray, binar deplasat, binar-zecimal.

2.4.2. CIRCUITE DE EȘANTIONARE - MEMORARE

2.4.2.1. Funcționare. Caracteristici.

Un circuit de eșantionare-memorare (CEM) realizează prelevarea unor eșantioane din semnalul analogic aplicat la intrarea sa și memorarea acestora pe durata conversiei analog-numerice.

Funcțional un CEM (fig. 5.1.) reprezintă un bloc care sub acțiunea unui semnal de comandă realizează cele două operații de eșantionare și de memorare.

Sub acțiunea semnalului de comandă $u_c(E/M)$ care prin nivelul logic "1", impune starea de eșantionare E, CEM funcționează ca un repetor, oferind la ieșire același semnal ca la intrarea sa.

În momentul trecerii semnalului de comandă la valoarea corespunzătoare nivelului logic "0", CEM memorează valoarea semnalului de intrare la acest moment, pe care îl transmite la ieșire. Această valoare se menține pe toată durata stării de memorare (M) impusă de semnalul de comandă.

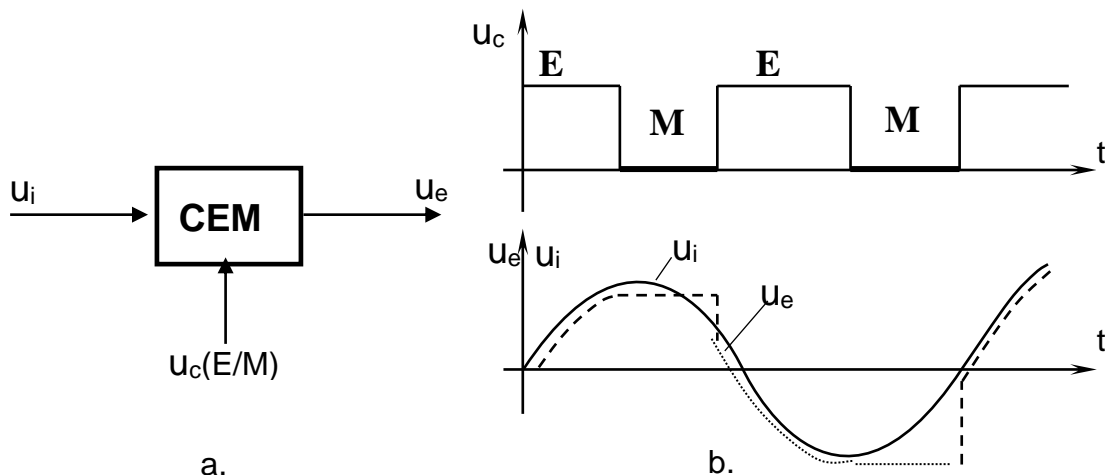


Fig. 5.1. Circuite de eșantionare-memorare :a - reprezentare simbolică;
b - diagrama semnalelor.

Acest interval de timp trebuie să fie cel puțin egal cu timpul de conversie care este dat de CAN. De regulă revenirea semnalului de comandă la starea logică "0" pentru prelevarea unui nou eșantion este comandată de CAN la sfârșitul procesului de conversie.

Schema echivalentă a unui CEM (fig. 5.2) conține un comutator și un condensator.

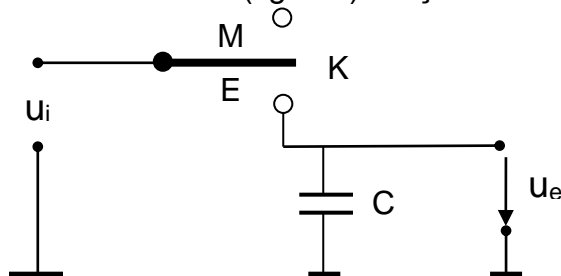


Fig. 5.2 Schema echivalentă a unui CEM

Când comutatorul K este închis (corespunzător stării de eșantionare), condensatorul C se încarcă urmărind tensiunea de intrare u_i care se regăsește la ieșire.

La comanda de memorare, comutatorul se deschide iar tensiunea de ieșire rămâne la valoarea din momentul respectiv.

Tranzițiile CEM de la o stare la alta determină întârzieri caracteristice prin timpul de apertură și timpul de achiziție (fig. 5.3).

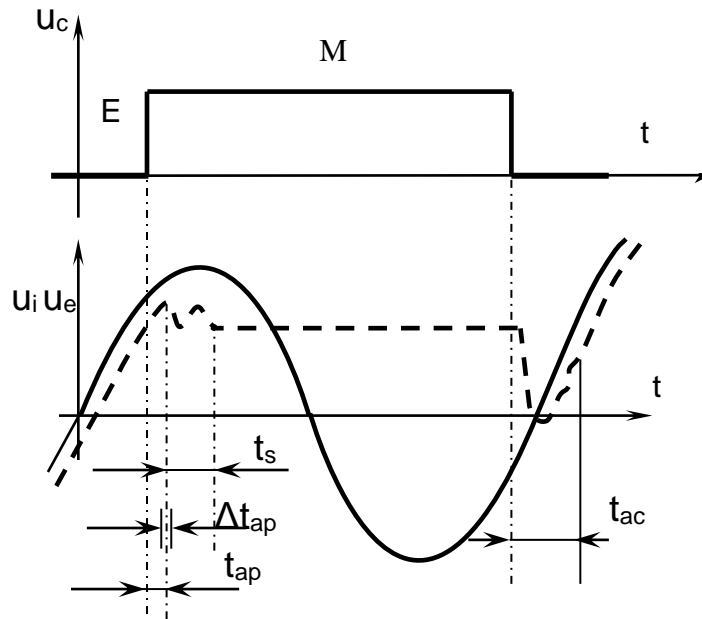


Fig.5.3 Diagrama de semnal

Timpul de apertură t_{ap} este determinat de momentul comenzii stării de memorare M și momentul începerii stabilizării tensiunii de ieșire. Acest timp ia valori de la 2...200 μs în raport de circuitele digitale ale circuitului de comandă. Variația maximă a timpului de apertură, Δt_{ap} reprezintă instabilitatea timpului de apertură.

Această instabilitate introduce erori a căror valoare maximă este:

$$\epsilon_{\max} = \left. \frac{du_i}{dt} \right|_{\max} \Delta t_{ap} \quad (5.1)$$

Achiziția de date trebuie să satisfacă condiția:

$$\epsilon_{\max} \leq \frac{U_{\max}}{2^n} \quad (5.2)$$

unde $\frac{U_{\max}}{2^n}$ reprezintă rezoluția absolută a convertorului analog-numeric, U_{\max} fiind valoarea maximă a tensiunii de la intrarea CAN, iar n numărul de biți ai secvenței binare de la ieșirea CAN

Pentru un CAN de rezoluție dată, instabilitatea timpului de apertură limitează superior frecvența semnalului de intrare u_i .

Pentru un semnal sinusoidal:

$$u_i = U_{i \max} \sin \omega t, \quad (5.3)$$

viteza maximă de variație a tensiunii de intrare se obține pentru :

$$U_{i \max} = U_{\max}. \quad (5.4)$$

Condiția 5.2 va deveni :

$$\omega \leq \frac{1}{2^n \Delta t_{ap}} \quad , \quad (5.5)$$

de unde rezultă frecvența maximă a tensiunii de intrare:

$$f \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot \Delta t_{ap}} \quad . \quad (5.6)$$

Timpul de stabilizare t_s definește intervalul de timp începând cu sfârșitul timpului de apertură și terminând cu momentul reducerii amplitudinii oscilațiilor tensiunii de ieșire sub valoarea corespunzătoare pentru $\frac{1}{2}$ din rezoluția absolută a CAN.

Timpul de achiziție t_{ac} este delimitat de momentul comenzii de esantionare, și momentul în care tensiunea de ieșire din CEM diferă față de cea de intrare cu mai puțin de $\frac{1}{2}$ din rezoluția absolută a CAN.

Timpul de achiziție are valori mai mari de 15 ns și trebuie să fie mai mic decât durata impulsului de esantionare pentru ca prelevarea esantioanelor să se facă corect. Această caracteristică a unui CEM este importantă, deoarece limitează în procesul de achiziție frecvența de esantionare.

2.2.2. Tipuri constructive de CEM

În construcția diferitelor tipuri de CEM se utilizează amplificatoare operaționale, condensatoare ca elemente de memorare și comutatoare ce realizează comanda în stările de esantionare și de memorare. Una dintre cele mai simple scheme de principiu pentru un CEM este dată în fig.5.4.

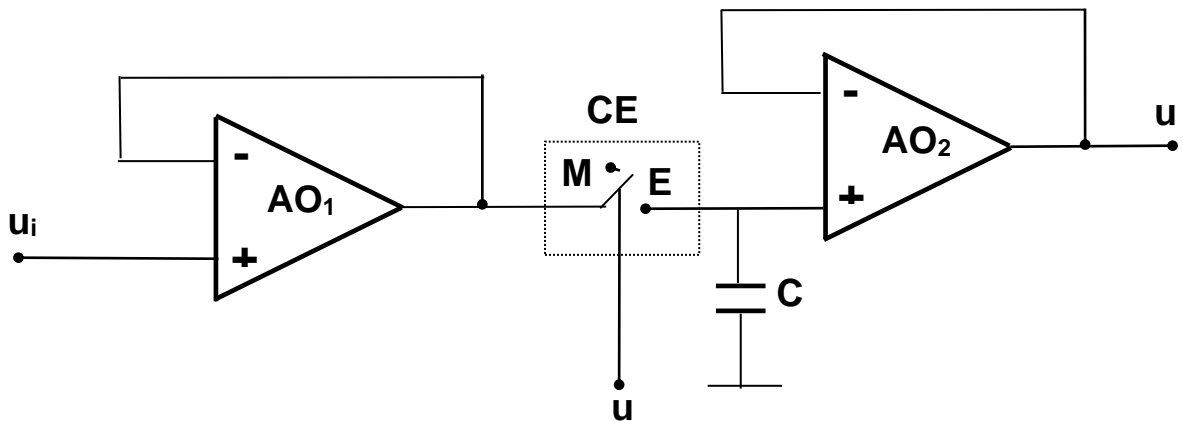


Fig.5.4. Schema de principiu a unui CEM.

Cele două amplificatoare operaționale AO₁ și AO₂ sunt în conexiune repetitoare, ceea ce asigură o impedanță de intrare foarte mare și o impedanță de ieșire mică. Ca urmare a acestui fapt condensatorul C se încarcă rapid în intervalul de timp de esantionare, ceea ce asigură un timp de achiziție redus, iar în intervalul de timp de memorare are loc o descărcare foarte lentă a condensatorului C, ceea ce asigură o alterare redusă a tensiunii esantionate.

Pentru reducerea influenței curentului de polarizare al AO₂ asupra tensiunii la bornele condensatorului C (atunci când comutatorul electronic CE este deschis) se poate utiliza schema cu două comutatoare din fig.5.5.

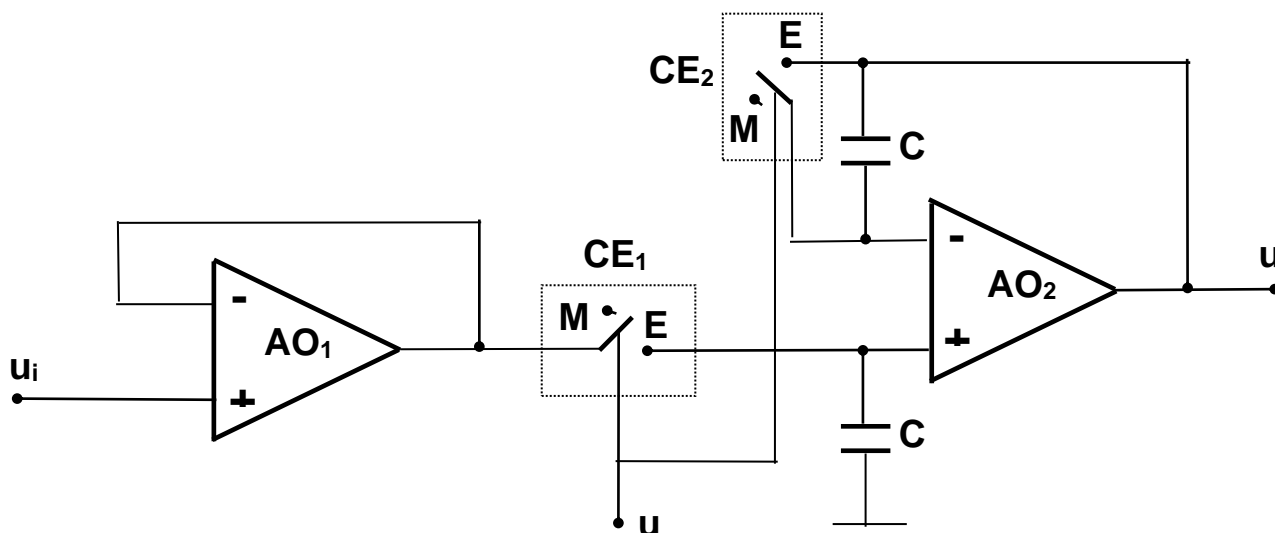


Fig. 5.5. Schema cu două comutatoare pentru un CEM

În starea de esanționare cele două comutatoare sunt închise, schema funcționând ca și cea anterioară. Pentru starea de memorare se deschid cele două comutatoare, condensatoarele fiind parcurse de curenți de polarizare egali.

Modificarea tensiunii de ieșire pentru această situație este :

$$\frac{du_e}{dt} = \frac{1}{C} (I_B^+ - I_B^-) = 0, \quad (5.7)$$

adică tensiunea de ieșire rămâne constantă.

Există totuși o alterare a tensiunii de ieșire din CEM, datorită faptului că cei doi curenți de polarizare diferă prin curentul de decalaj. Se impune ca această alterare să nu depășească valoarea corespunzătoare pentru $\frac{1}{2}$ LSB. Reducerea erorii de decalaj se realizează în următoarea schemă (fig. 5.6.).

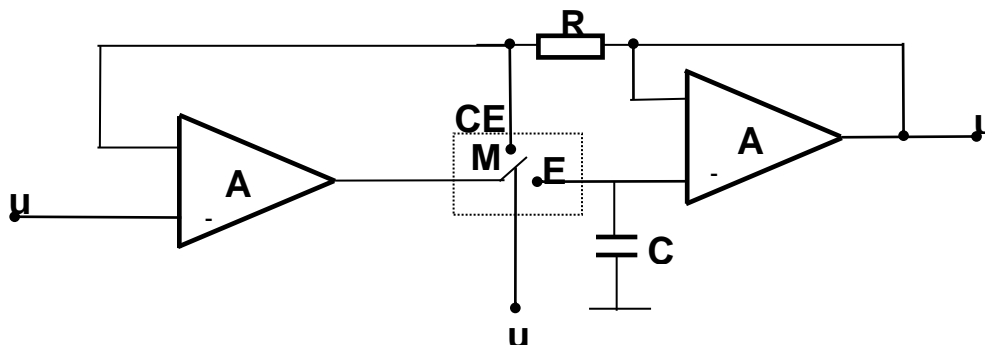


Fig. 5.6. Schema cu reacție globală

După cum se vede cele două amplificatoare operationale AO₁ și AO₂ sunt introduse într-o buclă de reacție globală ce elimină practic erorile de decalaj produse de AO₂.

În starea de memorare, cele două amplificatoare sunt în conexiune repetitoare, rezistența R având rolul de a prelua diferența de tensiune dintre intrare și ieșire.

La esanționare, comutatorul electronic se închide, permitând încărcarea rapidă a condensatorului C, astfel încât timpul de achiziție se micșorează semnificativ.

Una din schemele de CEM, cu o mare utilizare este dată în fig. 5.7.

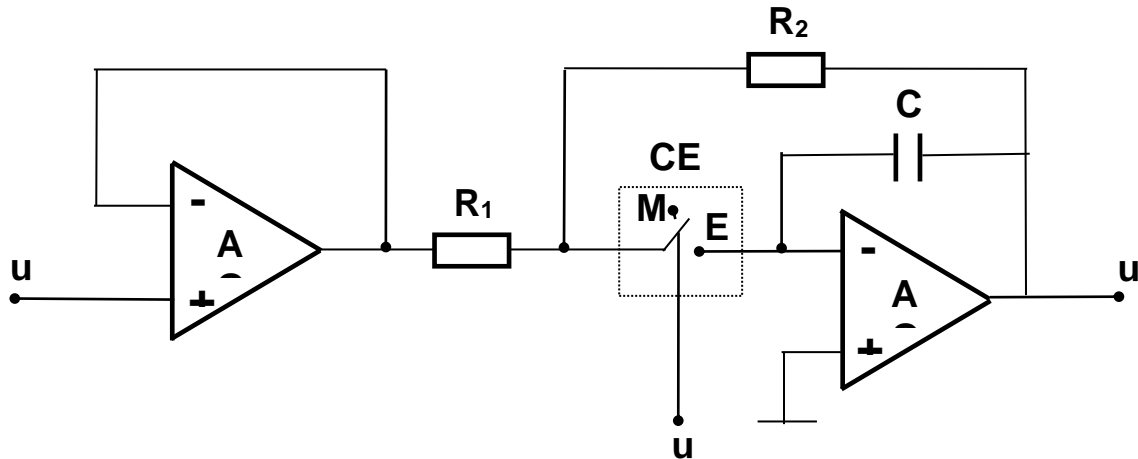


Fig. 5.7. Schema de CEM cu integrator.

Se vede că aici condensatorul de memorare este montat în reacția amplificatorului operational AO₂, formând împreună cu R₂ un circuit integrator.

În starea de esanționare, tensiunea de ieșire tinde spre valoarea :

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1 \quad (5.8)$$

cu o constantă de timp $\tau = R_2 C$.

2.5.3. CONVERTOARE ANALOG-NUMERICE

2.5.3.1. Prezentare generală.Funcționare. Erori

Convertoarele analog-numerice (CAN) reprezintă blocul principal în cadrul sistemului de conversie analog-numerică.Ele realizează conversia esantioanelor prelevate din mărimea analogică de intrare într-o mărime numerică cu un număr finit de valori..Această operație reprezintă de fapt o cuantizare în nivel a semnalelor de intrare.

Mărimea numerică de la ieșire este reprezentată printr-o secvență binară de n biți.

Caracteristica statică de transfer a unui CAN este reprezentată de o funcție tip scară .Un CAN liniar are lățimea și înălțimea treptelor egale.Variația minimă a mărimii de intrare (o tensiune cu valoarea la cap de scară U_{cs}), care produce două tranziții succesive ale secvenței binare de ieșire se numește de regulă cuantă :

$$q = \frac{U_{cs}}{2^n} \quad (5.9)$$

și care reprezintă și rezoluția absolută exprimată în valori ale mărimii de intrare.

Diferența dintre două valori consecutive ale mărimii numerice de ieșire este reprezentată de 1LSB (bitul de semnificație minimă).

Diferența în amplitudine dintre semnalul analogic de la intrarea CAN și cel numeric de la ieșirea sa reprezintă eroarea de cuantizare (fig. 5.8.b).Cu cât numărul de la ieșirea convertorului are mai mulți biți, cu atât această eroare este mai mică.

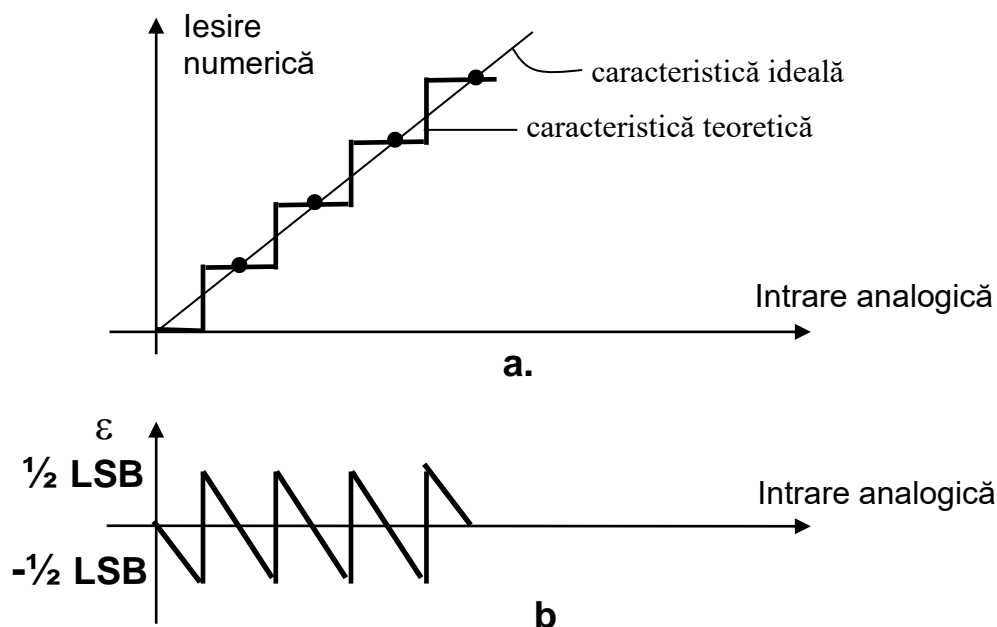


Fig.5.8. a. Caracteristica de transfer ; b. Eroarea de cuantizare.

Deoarece valorile tensiunii de intrare corespund valorii numerice de ieșire numai pentru punctele mediane ale intervalelor de cuantificare, aceeași eroare nu depășește valorile $\pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$. Caracteristica ideală corespunde cazului în care numărul de biți al semnalului numeric de ieșire $n = \infty$, adică convertorul nu are eroare de cuantizare.

2.5.3.2. Variante constructive de CAN.

Din punct de vedere functional CAN pot fi :

- cu comparatie directă ;
- cu conversie intermediară în interval de timp sau în frecvență ;
- cu conversie mixtă.

CAN cu comparatie directă realizează conversia prin compararea permanentă a tensiunii de intrare cu o tensiune de referință. După modul în care se prezintă tensiunea de referință, există CAN cu comparatie simultană si CAN cu comparatie succesivă.

2.5.3.2.1. CAN cu comparatie simultană (de tip paralel).

Acest tip de CAN realizează comparatia simultană a semnalului de intrare cu un set de nivele fixe echidistante diferite printr-o cuantă. Nivelele fixe sunt obtinute cu o retea divizoare de rezistente de mare precizie , careia i se aplică o tensiune de referință U_R egală cu valoarea la cap de scală U_{cs} a tensiunii de intrare (fig. 5.9).

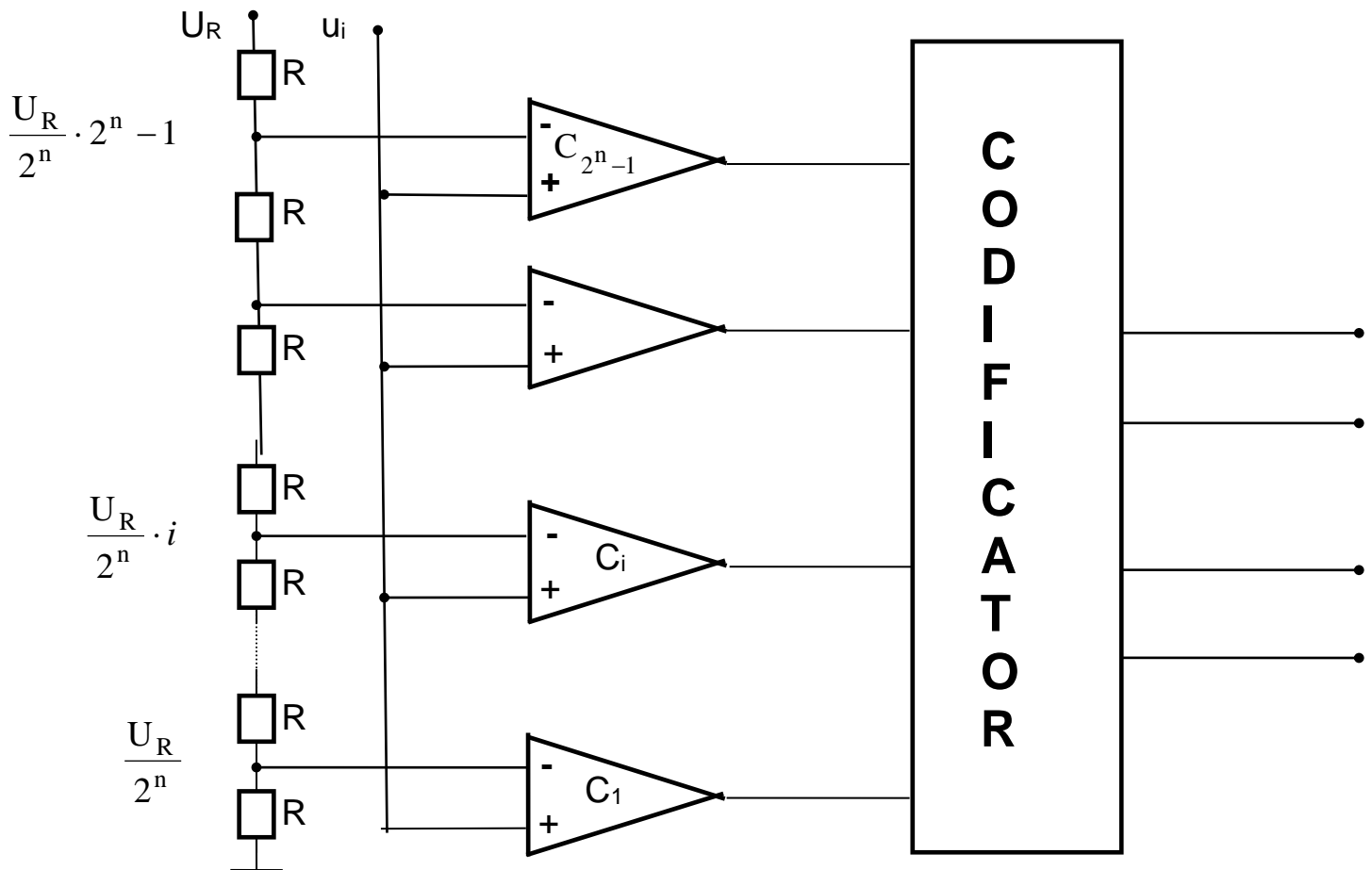


Fig.5.9. CAN paralel.

Toate comparatoarele la care tensiunea de intrare u_i este mai mare decât tensiunea de comparație respectivă, vor avea starea "1" iar celelalte starea "0".

Astfel la ieșirea comparatoarelor se obține un sir de stări logice $00...0111...1$, care reprezintă raportul u_i/U_R .

Dacă ieșirea numerică este reprezentată de n biți, vor exista 2^n rezistente și $2^n - 1$ comparatoare.

Codificatorul face trecerea de la codul numeric de la intrarea sa, la un cod binar (de obicei binar natural) la ieșirea convertorului.

CAN de tip paralel se caracterizează prin valori foarte reduse ale timpilor de conversie (zeci de ns), dar necesită un mare număr de elemente componente.

2.5.3.2.2. CAN cu aproximatii succesive

Acest tip de convertor este din categoria cu comparație succesivă.

Principiul de funcționare (fig.5.10) constă într-un sir de operații de comparație între tensiunea de intrare u_i și o tensiune de referință U_R , ce se desfășoară într-un număr de etape egal cu numărul n de biți ai numărului N de la ieșirea convertorului.

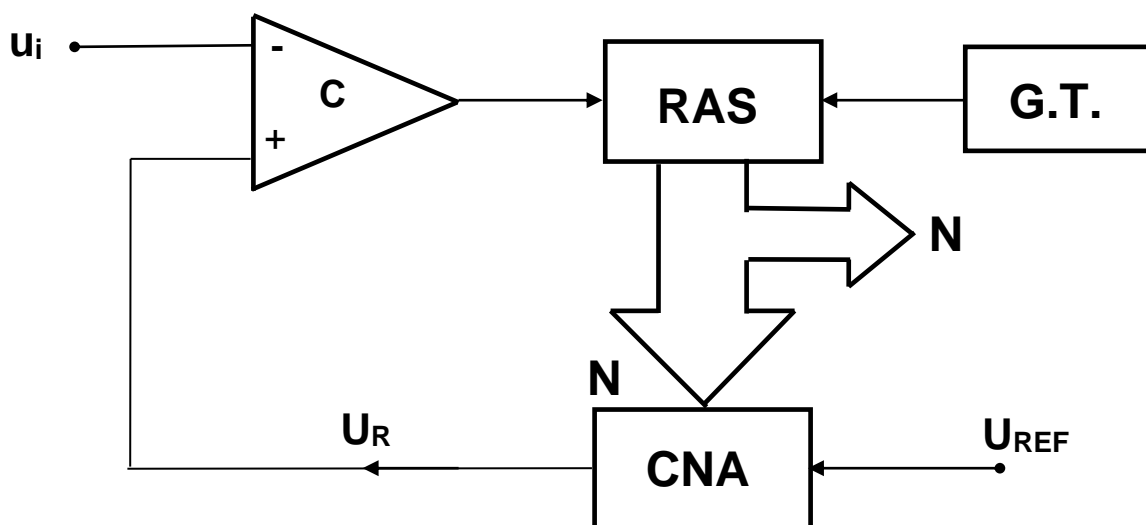


Fig.5.10. CAN cu aproximatii succesive.

Concret, în fiecare etapă se decide ce valoare corespunde bitului b_i de rang i .

Cele n comparații succesive sunt realizate de comparatorul C în ritmul impus de un generator de tact GT.

Registrul de aproximări succesive RAS conține un registru de n circuite basculante bistabile ce poate fi poziționat în diferite moduri în raport de tensiunea de la ieșirea comparatorului.

Acest dispozitiv conduce convertorul numeric analogic CNA, a cărui tensiune de ieșire U_R reprezintă numărul binar N existent la intrarea sa.

Specific acestui tip de convertor este faptul că modificarea tensiunii cu U_R pe durata unei conversii prezintă următoarele aspecte :

- primul salt al tensiunii U_R este egal cu jumătate din valoarea maximă a tensiunii de intrare .

- variația la un moment dat al tensiunii U_R , este jumătate din variația suferită la tactul precedent ;

- tensiunea U_R scade sau crește după cum $U_i < U_R$, respectiv $U_i > U_R$

Tensiunea de intrare u_i supusă procesului de conversie poate fi scrisă sub forma :

$$u_i = U_R \frac{b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0}{2^n} . \quad (5.10)$$

Bitii b_1, b_2, \dots, b_n se obțin în urma comparației dintre tensiunea U_R generată de CNA și U_x . Rezultatul acestei comparații se materializează în valorile 0 sau 1 pentru fiecare bit.

În prima etapă se compară U_i cu $U_R = \frac{U_{\max}}{2}$. Dacă $u_i > \frac{U_{\max}}{2}$, rezultă valoarea celui mai semnificativ bit $b_1 = 1$.

În etapa a doua se compară u_i cu $b_1 \cdot \frac{U_{\max}}{2} + \frac{U_{\max}}{2^2}$ pentru a se decide valoarea celui de-al doilea bit b_2 .

Dacă de exemplu $u_i < b_1 \cdot \frac{U_{\max}}{2} + \frac{U_{\max}}{2^2}$ rezultă $b_2 = 0$. Comparațiile continuă până la obținerea bitului b_n de semnificație minimă.

Acest tip de CAN este cel mai utilizat în sistemele de achiziție a datelor. El are întotdeauna același timp de conversie determinat de cele n perioade de tact.

Eroarea de conversie depinde de exactitatea CAN și de sensibilitatea comparatorului. Principalul dezavantaj al acestui tip de CAN îl reprezintă slaba rejectie a semnalelor perturbatoare.

2.5.3.2.3 CAN cu dublă integrare

Acest tip de convertor face parte din categoria convertoarelor cu conversie intermediară a tensiunii de intrare într-un interval de timp.

Schema funcțională a unui asemenea convertor este prezentată în fig. 5.11.

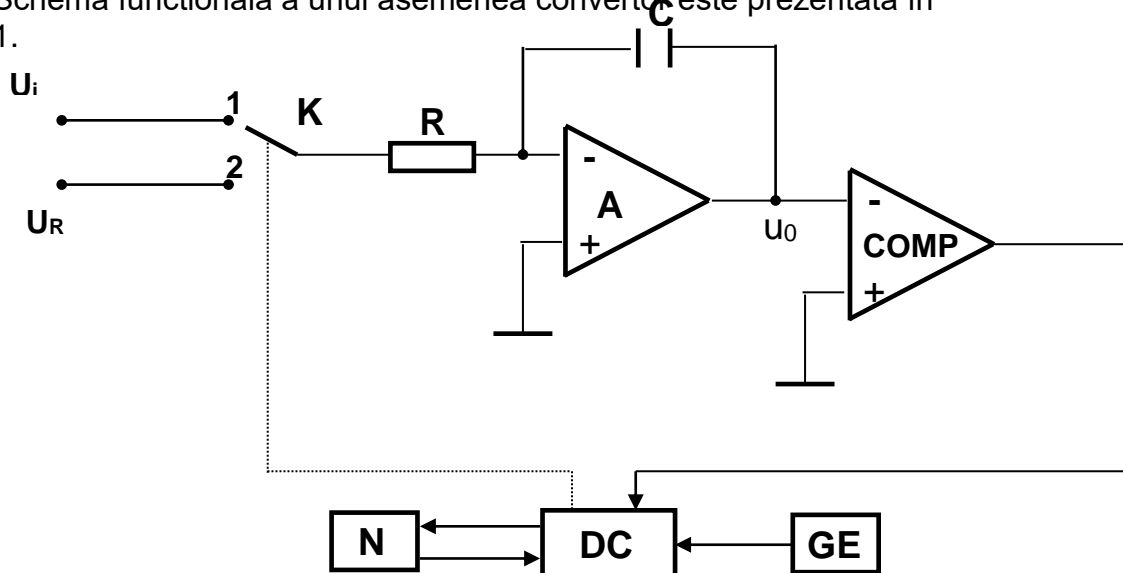


Fig. 5.11. CAN cu dublă integrare

Conversia se face în două etape, fiind controlată de dispozitivul de comandă DC în ritmul impulsurilor de tact oferite de generatorul etalon GE.

În prima etapă DC anulează conținutul numărătorului reversibil N și trece comutatorul K pe poziția 1, astfel încât la intrarea integratorului realizat cu amplificatorul operațional AO, rezistența R și condensatorul C se aplică tensiunea U_x care începe să fie integrată. Conținutul numărătorului este incrementat, pentru fiecare impuls cu frecvența f_0 , până la capacitatea maximă N_{max} . Integrarea tensiunii U_x se face pe durata T_1 cât are loc încărcarea numărătorului.

Tensiunea u_0 la ieșirea integratorului variază liniar :

$$u_0 = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_x dt = -\frac{U_x t}{RC} , \quad (5.11)$$

ajungând după timpul T_1 la valoarea:

$$U_0 = -\frac{U_x t_1}{RC} = -\frac{U_x N_{max} t}{RC f_0} . \quad (5.12)$$

După timpul T_1 , la încărcarea cu un nou impuls a numărătorului, conținutul acestuia este anulat, deci trece în starea zero.

În acest moment s-a încheiat etapa de integrare a tensiunii de intrare. Se dă comanda de trecere a comutatorului K pe poziția a doua și începe etapa de integrare a tensiunii de referință U_R .

Pe durata integrării, dispozitivul de comandă menține accesul impulsurilor de frecvență f_0 la intrarea numărătorului, care se încarcă din nou.

Tensiunea la ieșirea integratorului va începe să scadă liniar:

$$u_0 = U_0 - \frac{1}{RC} \int_0^t U_R dt = U_0 - \frac{U_R t}{RC} . \quad (5.13)$$

Integrarea tensiunii de referință are loc un interval de timp T_2 , până când circuitul comparator sesizează la ieșirea integratorului aceeași tensiune ca la începutul conversiei, care de regulă este egală cu zero (fig.5.12). În acest moment încetează integrarea tensiunii de referință.

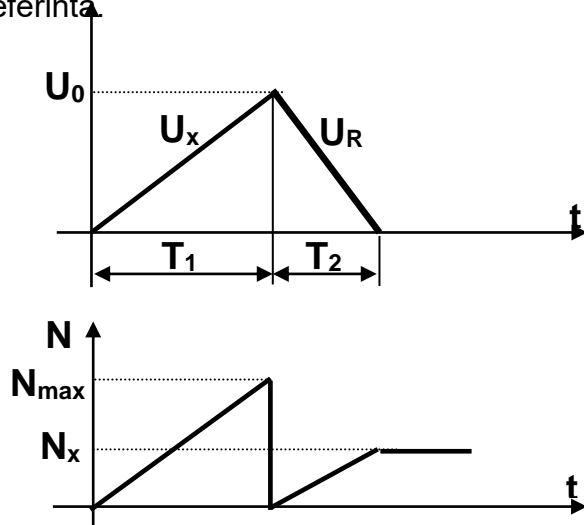


Fig. 5.12. Diagrama tensiunii și variația conținutului numărătorului

Tensiunea la iesirea integratorului fiind nulă, rezultă:

$$U_0 - \frac{U_R T_1}{RC} = U_0 - \frac{U_R}{RC} \cdot \frac{N_x}{f_0} = 0, \quad (5.14)$$

unde N_x este continutul numărătorului la sfârșitul conversiei.

Din relațiile (5.12) și (5.14) rezultă :

$$U_x = U_R \frac{N_x}{N_{\max}}. \quad (5.15)$$

După cum se vede pentru ca efectele integrării celor două tensiuni să fie de sens opus, este necesar ca acestea să aibă polarități diferite, ceea ce reprezintă o limitare majoră.

2.5.4. ANSAMBLUL CEM – CAN

Operația de conversie analog-numerică este precedată de operația de esantionare a tensiunii de intrare și de memorarea esantioanelor generate pe durata conversiei.

Dacă semnalele ce se măsoară sunt lent variabile și pe durata conversiei analog numerice nu există variații ale semnalului de intrare mai mari decât rezoluția convertorului, atunci nu este necesară operația de esantionare-memorare.

Acest lucru se întâmplă dacă panta maximă de variație a tensiunii de intrare u_i îndeplinește condiția :

$$\left. \frac{du_i}{dt} \right|_{\max} \leq \frac{U_{\max}}{2^n \cdot T_c} \quad (5.16)$$

unde $\frac{U_{\max}}{2^n}$ este rezoluția CAN, iar T_c este timpul de conversie.

Pentru o tensiune de intrare sinusoidală, frecvența maximă pe care o poate avea este :

$$f_{\max} = \frac{2^{(um)}}{\pi T_c} \quad (5.17)$$

Modul de comandă al ansamblului CEM-CAM depinde de tipul celor două componente ale ansamblului (fig. 5.13).

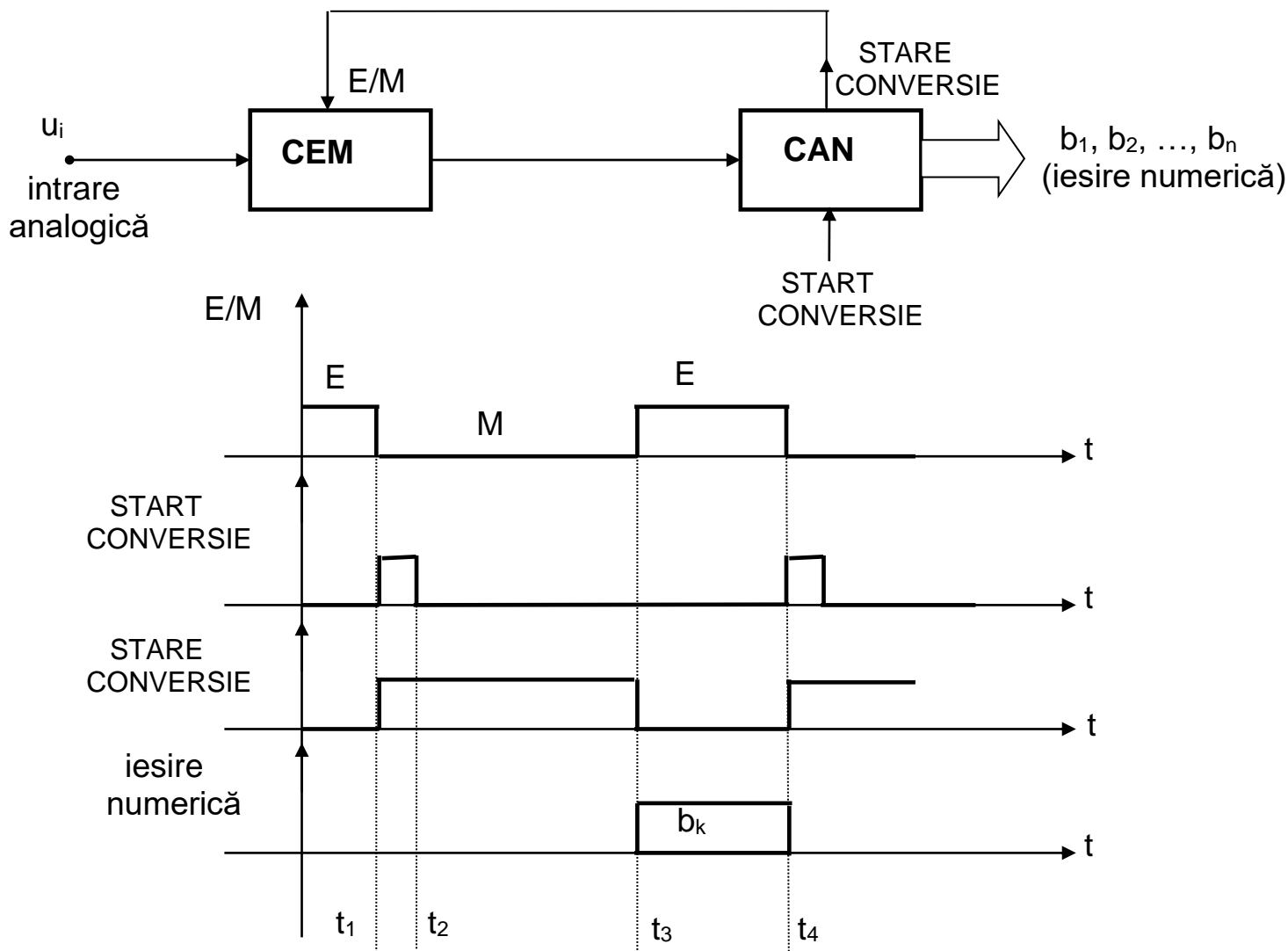


Fig. 5.13. Ansamblul CEM-CAN.

Semnalul de comandă de esantionare si memorare (E/M) se aplică la intrarea logică de comandă a CEM. Semnalele de comandă ale CAN sunt : START CONVERSIE care permite declansarea proceselor de conversie pe fronturile crescătoare si STARE CONVERSIE care indică prin nivelul logic „1” efectuarea de către CAN a unei conversii, iar prin frontul coborât sfârșitul conversiei.

Pentru realizarea conversiei analog-numeric se dă comanda START CONVERSIE la momentul t_1 .

La aparitia impulsului corespunzător acestei comenzi, iesirea STARE CONVERSIE trece din starea „0” în starea „1”, determinând comutarea CEM din starea de esantionare în cea de memorare. Tensiunea la iesirea CEM se stabilizează în intervalul t_1-t_2 , iar din momentul t_2 corespunzător sfârșitului impulsului START CONVERSIE, începe conversia propriu-zisă în CAN. La sfârșitul conversiei, iesirea STARE CONVERSIE revine din nou în starea „0”, determinând comutarea CEM din starea de memorare în starea de esantionare (momentul t_3).

Din acest moment tensiunea de iesire din CEM va urmări evoluția tensiunii de intrare până la aparitia unui nou impuls corespunzător comenzii START CONVERSIE, iar bitii rezultați din conversie se încarcă la iesirea convertorului. Timpul de conversie T_c al CAN este delimitat de momentele t_2 și t_3 .

Este necesar ca $t_4 - t_3 \geq t_{ac}$, unde t_{ac} este timpul de achiziție al CEM, iar $t_2 - t_1 = t_{ap} + t_s$, unde t_{ap} este timpul de apertură iar t_s este timpul de stabilizare al CEM.

Pentru ansamblul CEM-CAN, se precizează perioada minimă de achiziții care reprezintă intervalul de timp minim între momentele de prelevare a două esantioane succesive :

$$T_{ac\ min} = t_{ap} + t_s + T_c + t_{ac} . \quad (5.18)$$

Frecvența maximă de esantionare va fi deci :

$$f_{e\ max} = \frac{1}{T_{ac\ min}} , \quad (5.19)$$

iar frecvența maximă a semnalului de intrare (conform teoremei esantionării) va fi :

$$f_{\max} = \frac{f_{e\ max}}{2} . \quad (5.20)$$