

Convertoare

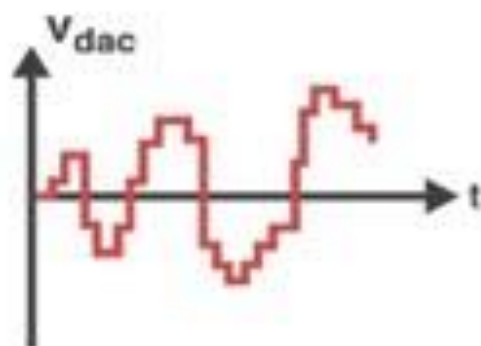
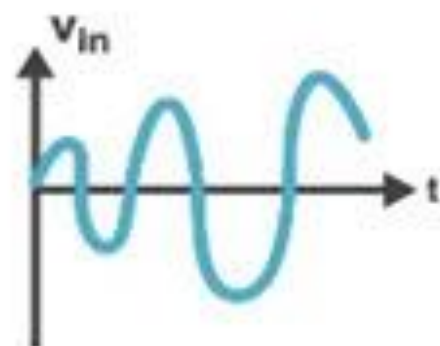
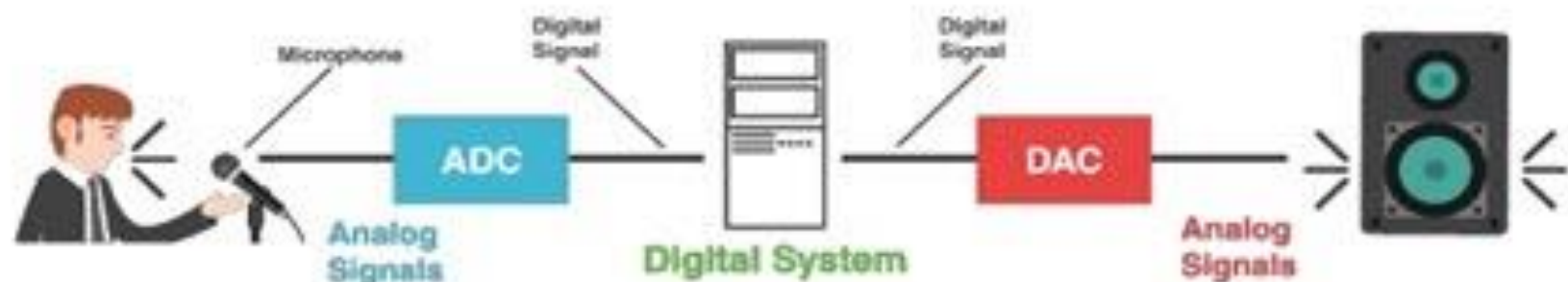
eșantionarea

digitizarea semnalului

convertoare analog numerice (CAN)

convertoare numeric analogice (CNA)

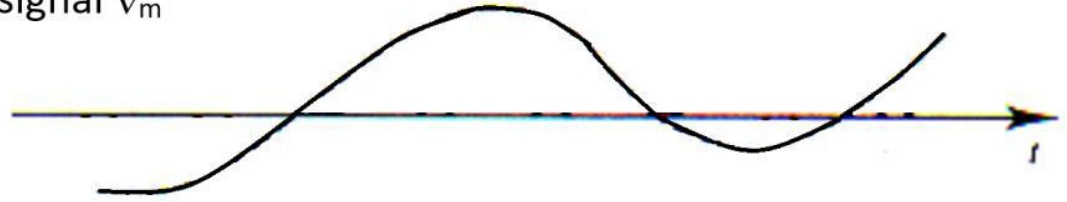
Need of conversion



Eșantionarea

- Obținerea unei secvențe de valori instantanee a semnalului analogic la momente regulate de timp

Analog
signal v_m



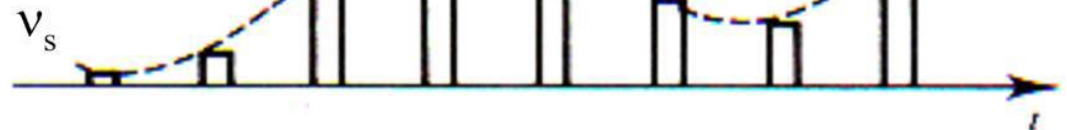
Sampling
signal $s(t)$



$$v_s = v_m * s(t)$$

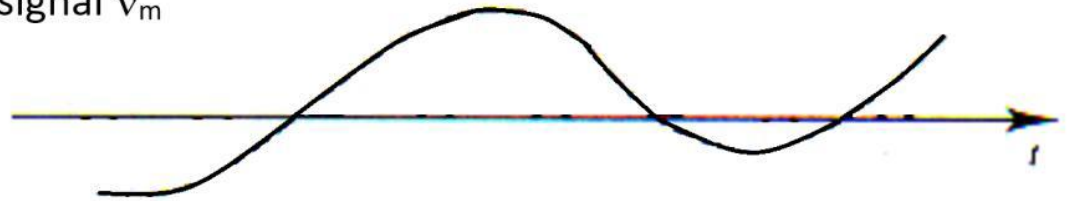


With all samples
positive



- Semnalul de permisiune sau funcția de eșantionare
 - $s(t)$
 - impulsuri de amplitudine constantă
 - durată τ
 - timp de separare T
 - τ cât de mic
 - frecvența de eșantionare cât mai mare

Analog
signal v_m



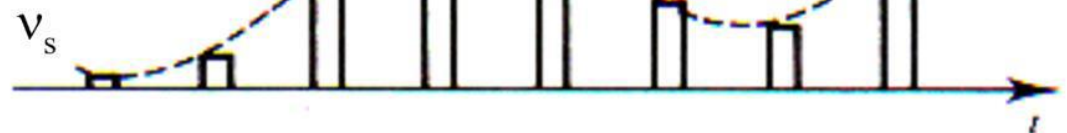
Sampling
signal $s(t)$



$v_s = v_m * s(t)$

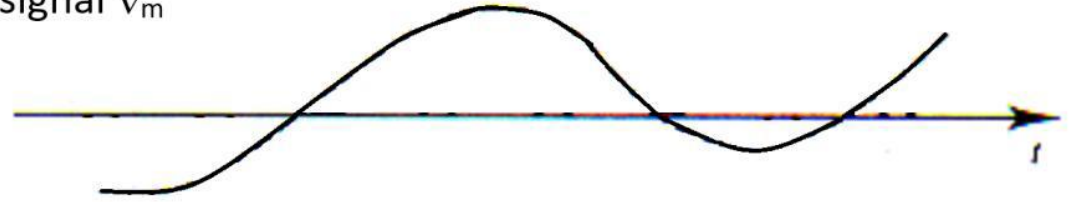


With all samples
positive



- Semnalul analogic $v_m(t)$ este de obicei deplasat în nivel, pentru a prezenta doar valori pozitive
- Se poate considera că toate eşantioanele sunt pozitive $v_s = v_m s(t)$

Analog
signal v_m



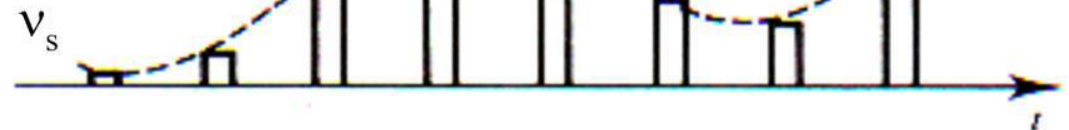
Sampling
signal $s(t)$



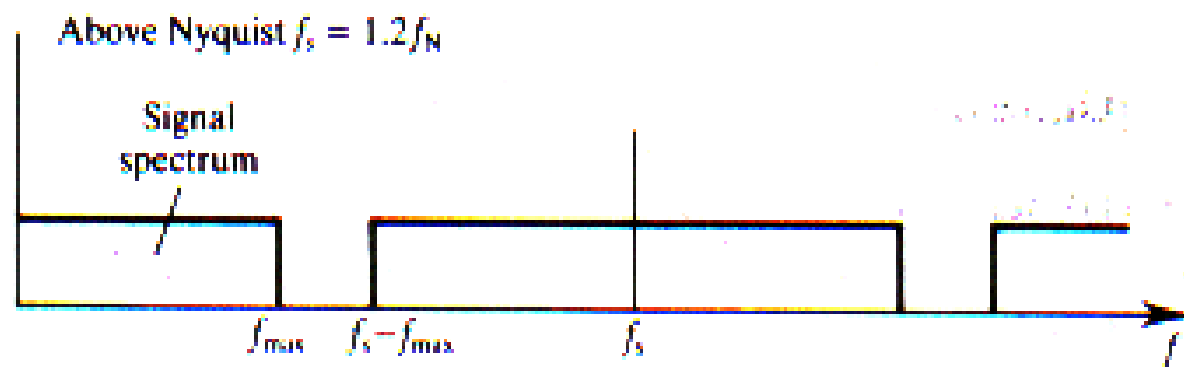
$$v_s = v_m * s(t)$$



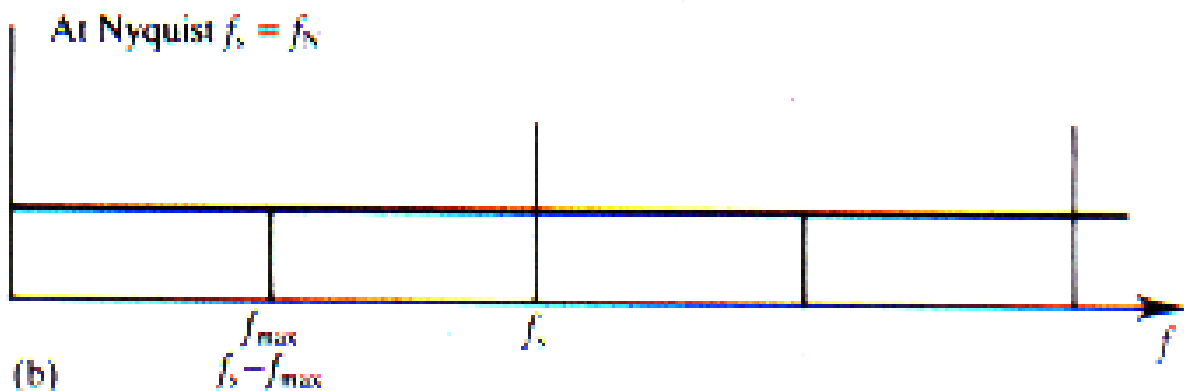
With all samples
positive



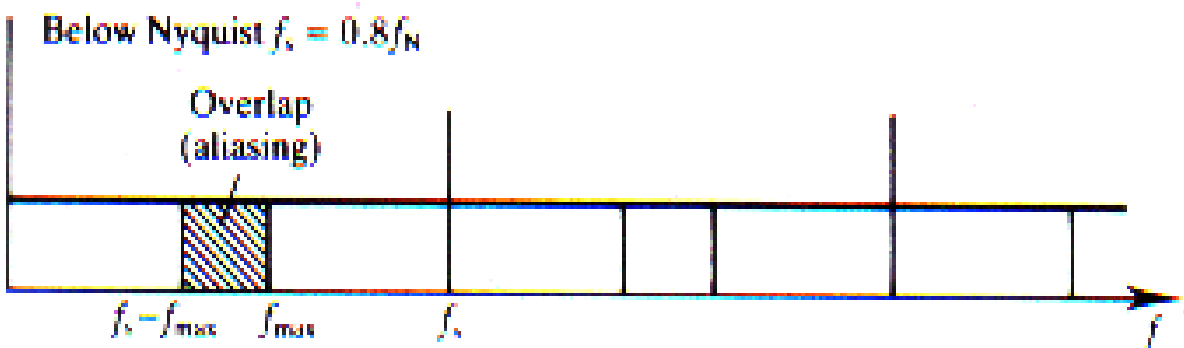
- Rezultatul analitic al eșantionării este funcția:
- $$v_s = v_m s(t) = (A_m \tau / T) [1 + \cos \omega_m t + \cos(\omega_s - \omega_m)t + 2\cos \omega_s t + \cos(\omega_s + \omega_m)t + \cos(2\omega_s - \omega_m)t + 2\cos 2\omega_s t + \cos(\omega_s + \omega_m)t + \dots]$$
- Pentru refacerea corectă a semnalului analogic original, criteriul Nyquist trebuie îndeplinit: *rata de eșantionare trebuie să fie cel puțin dublul frecvenței semnalului analogic eșantionat*
- $f_s \geq 2 f_m (= f_N)$, unde f_N se definește ca frecvența Nyquist.
- Dacă eșantionarea se petrece cu o frecvență f_s prea mică, marginea inferioară $f_s - f_m$ a frecvenței de eșantionare se suprapune peste frecvența semnalului analogic în banda de bază, ducând la coruperea acestuia



(a)



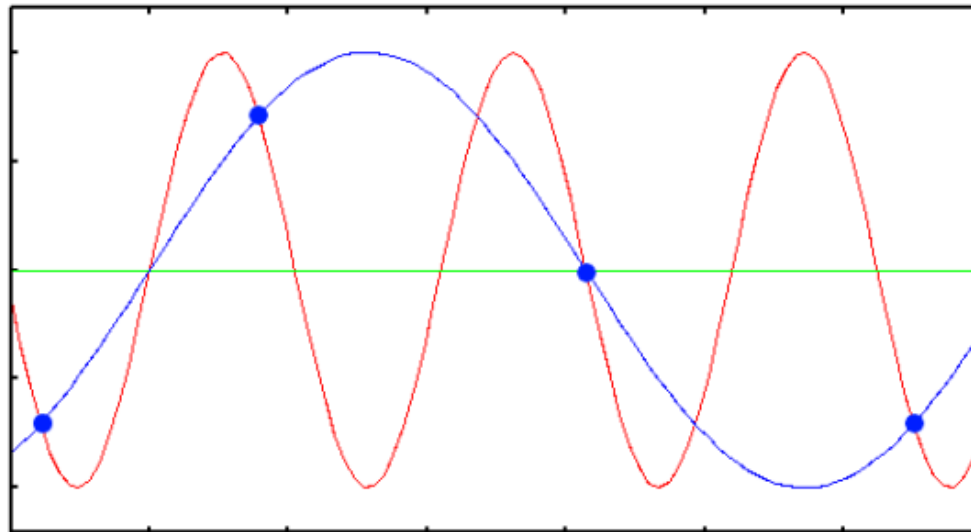
(b)



(c)

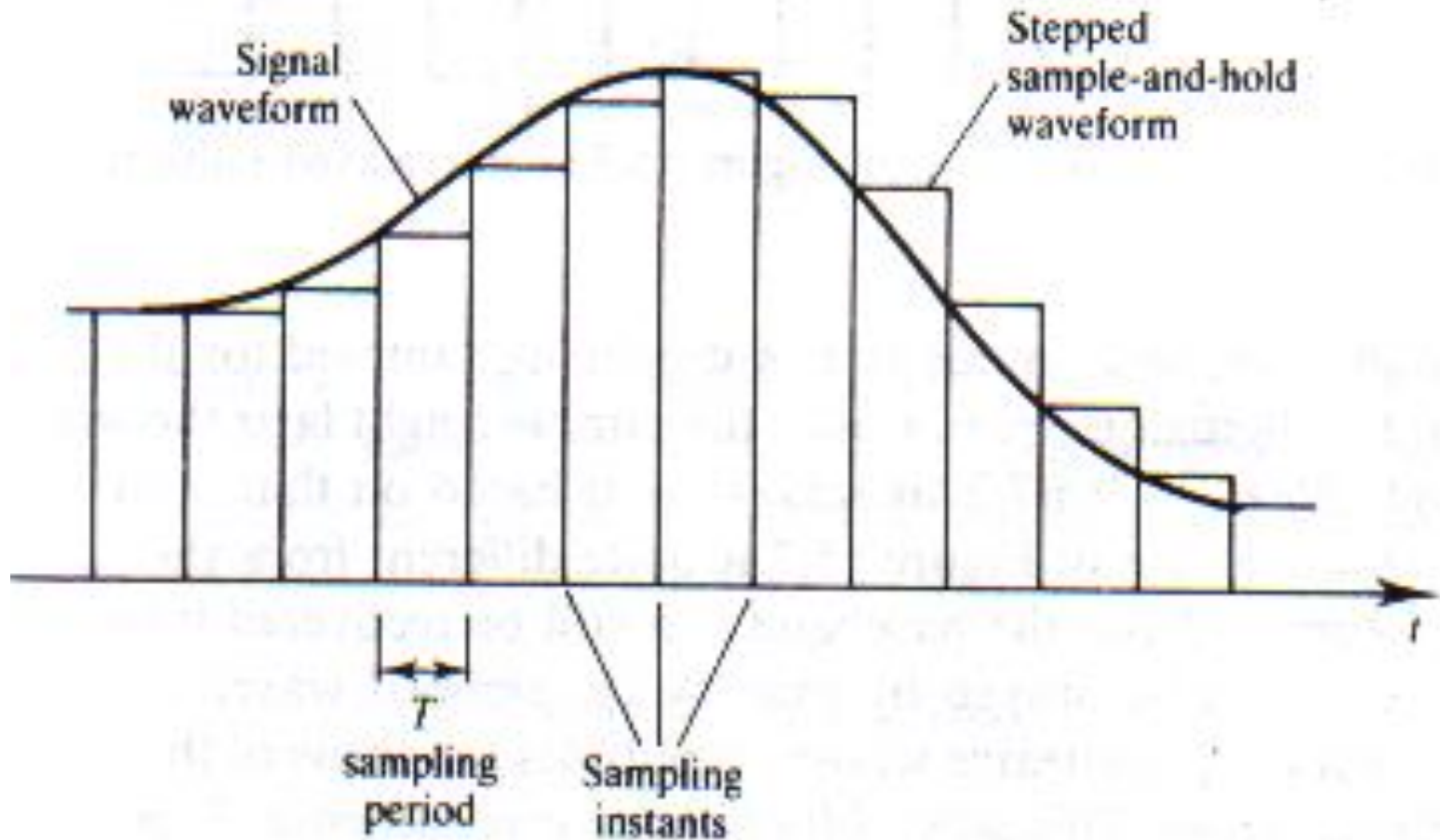
Ilustrarea criteriului Nyquist

- Altă problemă care este evitată dacă se îndeplinește criteriul Nyquist este cea cunoscută ca deghizarea semnalului (aliasing)
- O componentă joasă a semnalului de eșantionare f_s poate apărea în cadrul spectrului semnalului analogic și poate fi considerată ca parte a acestuia
- Fenomenul se poate petrece dacă semnalul original este afectat de zgomot, care prezintă frecvențe mai mari ca frecvența maximă a semnalului
- În acest caz se folosesc filtre trece jos sau filtre anti-aliasing, filtrarea având loc înaintea eșantionării

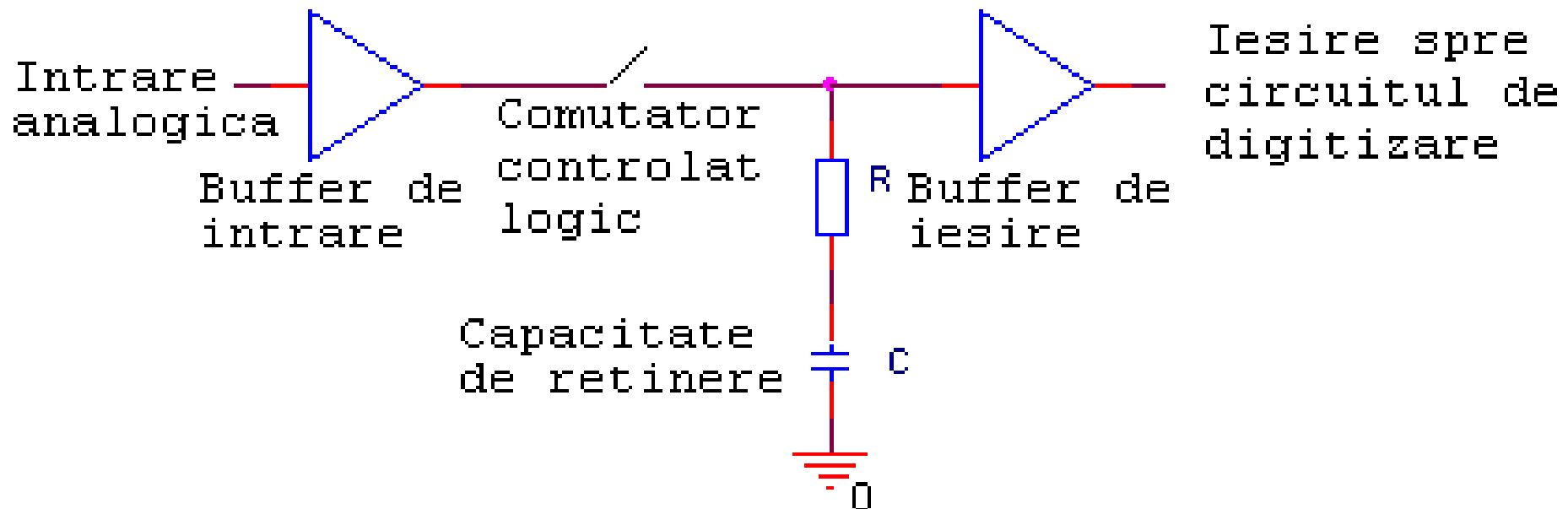


Plot showing aliasing of an undersampled 1D sinusoidal signal. The blue dots are the digital samples taken to record the red signal. Clearly, they are not enough to reconstruct the original signal: from then on, only the blue, wrong signal can be interpolated. (<https://svi.nl/AliasingArtifacts>)

- Procesul de **eșantionare și reținere** se definește ca menținerea valorii amplitudinii eșantionului până la următoarea eșantionare. Aceasta face ca forma de undă să capete un aspect de semnal în scară

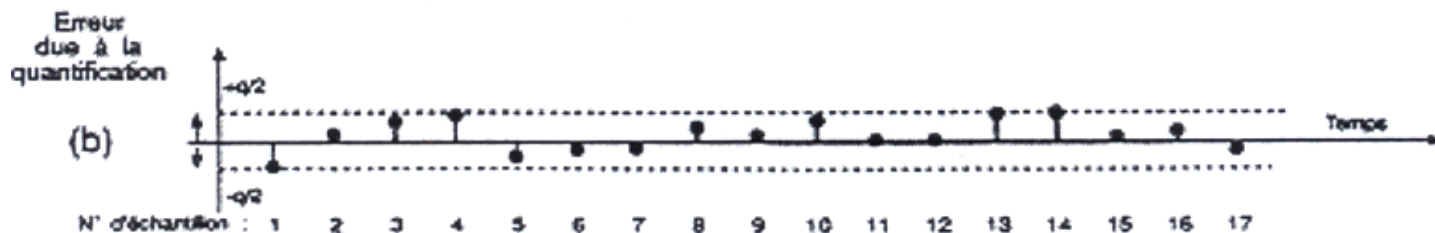
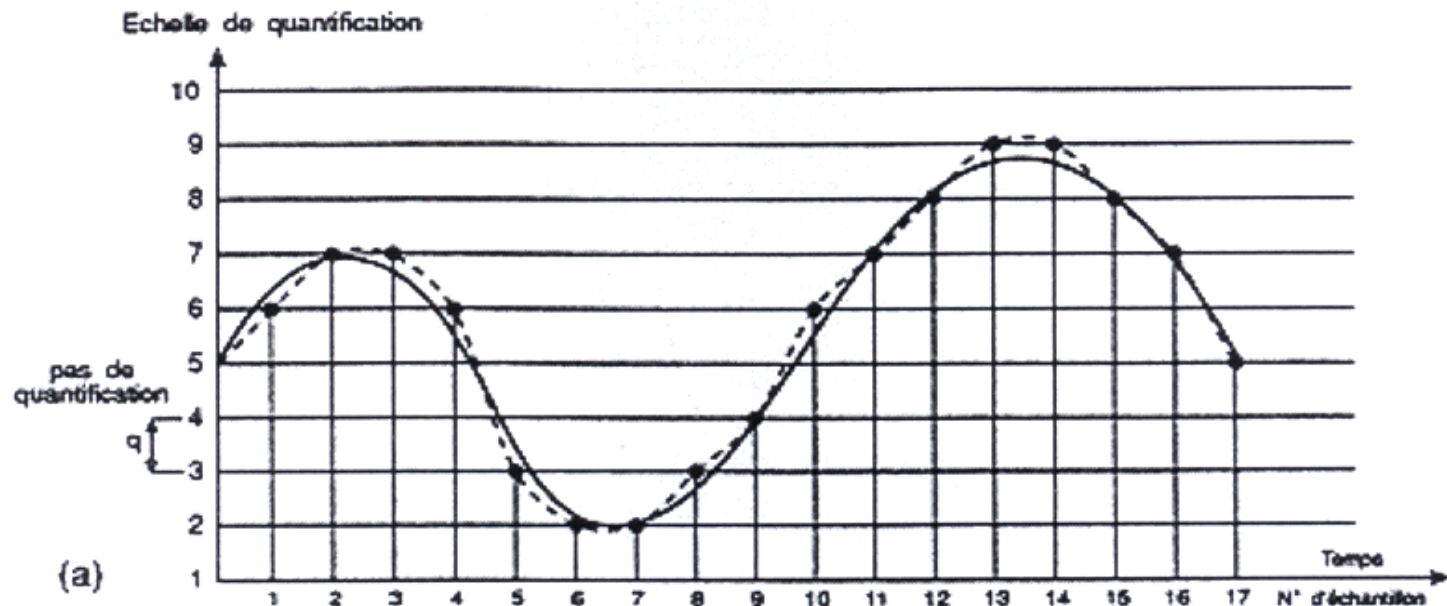


- Circuit de eșantionare
- Capacitate de reținere C care se încarcă rapid în timpul de eșantionare, apoi menține valoarea până la următoarea eșantionare
- Bufferul de intrare prezintă o impedanță de ieșire foarte mică, permițând încărcarea rapidă a capacității
- Bufferul de ieșire are o impedanță de intrare foarte mare, evitând descărcarea capacității

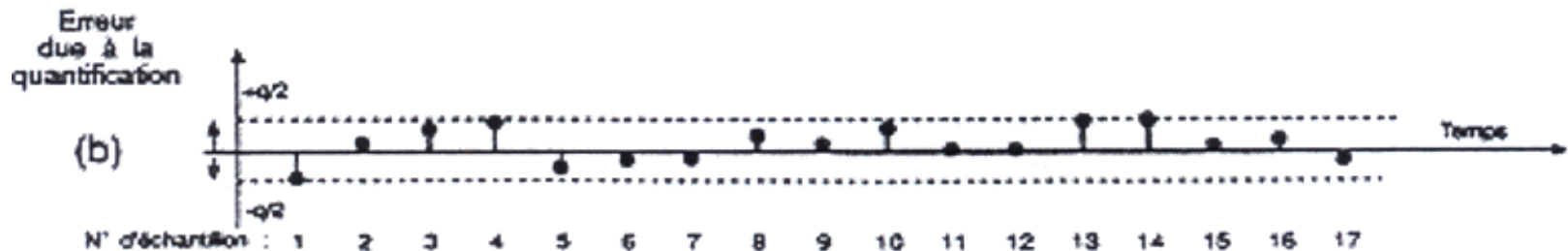
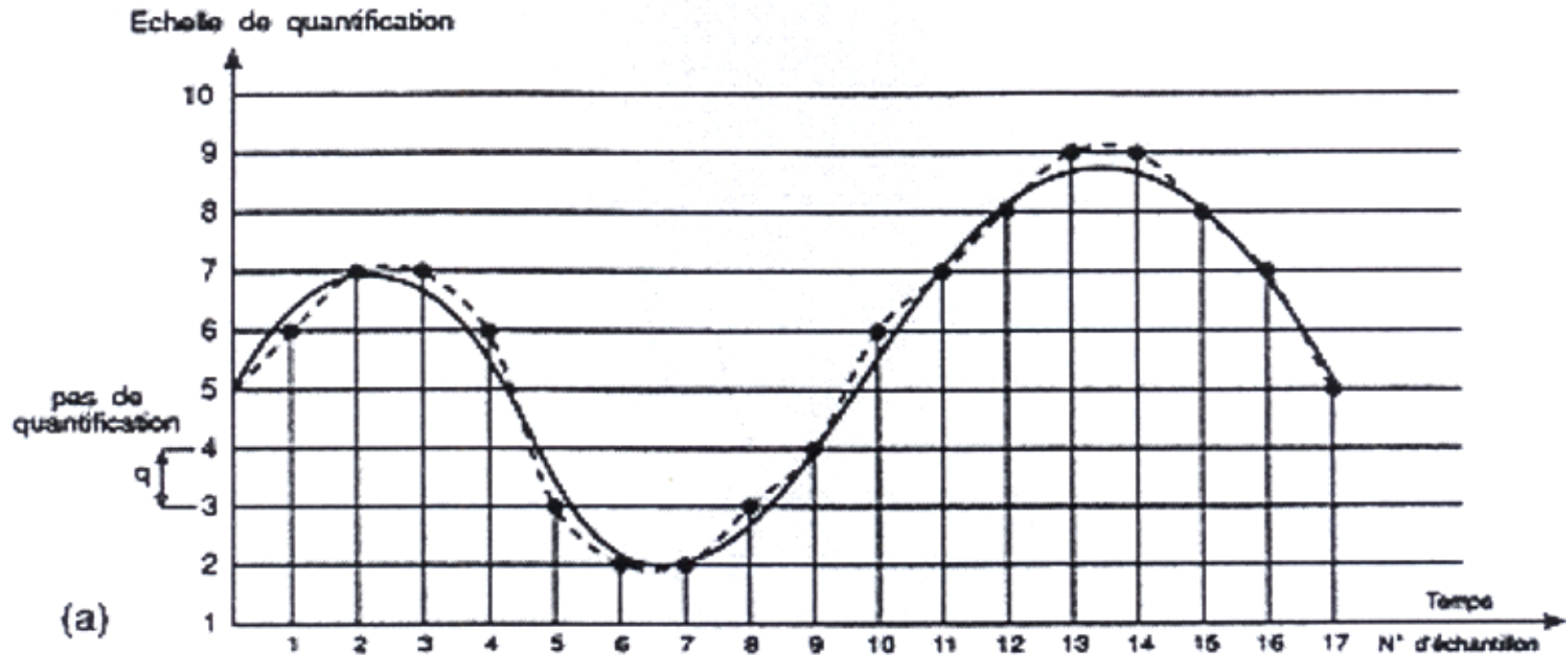


Digitizarea semnalului (cuantificarea)

- Interpretarea unei cantități continue prin folosirea unui set de valori discrete
- Stabilirea de valori numerice pentru valoarea dată a semnalului analogic



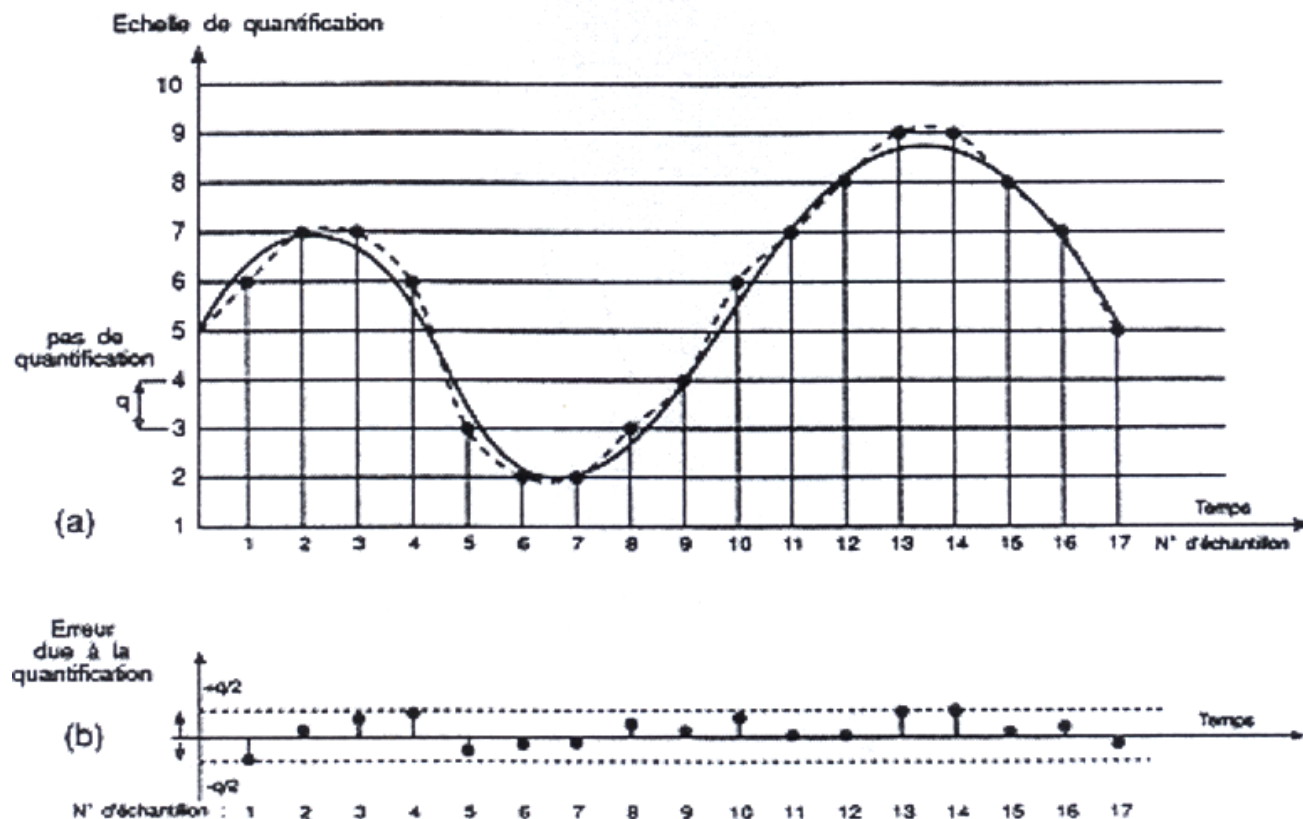
- Dacă se folosesc N biți, se obțin 2^N nivele
- N este rezoluția unui convertor
- Prin cuantificare, fiecare valoare a fiecărui eșantion va avea asociată o valoare binară pe N biți
- Cu cât N este mai mare, cu atât acuratețea este mai bună.



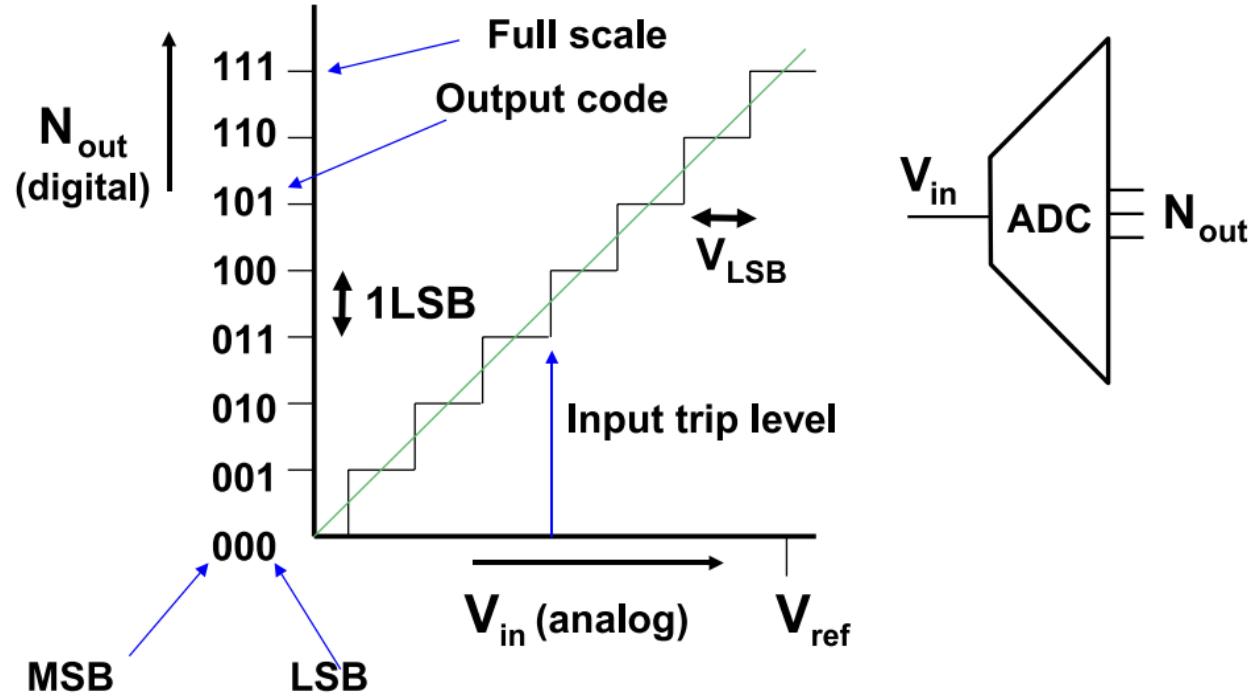
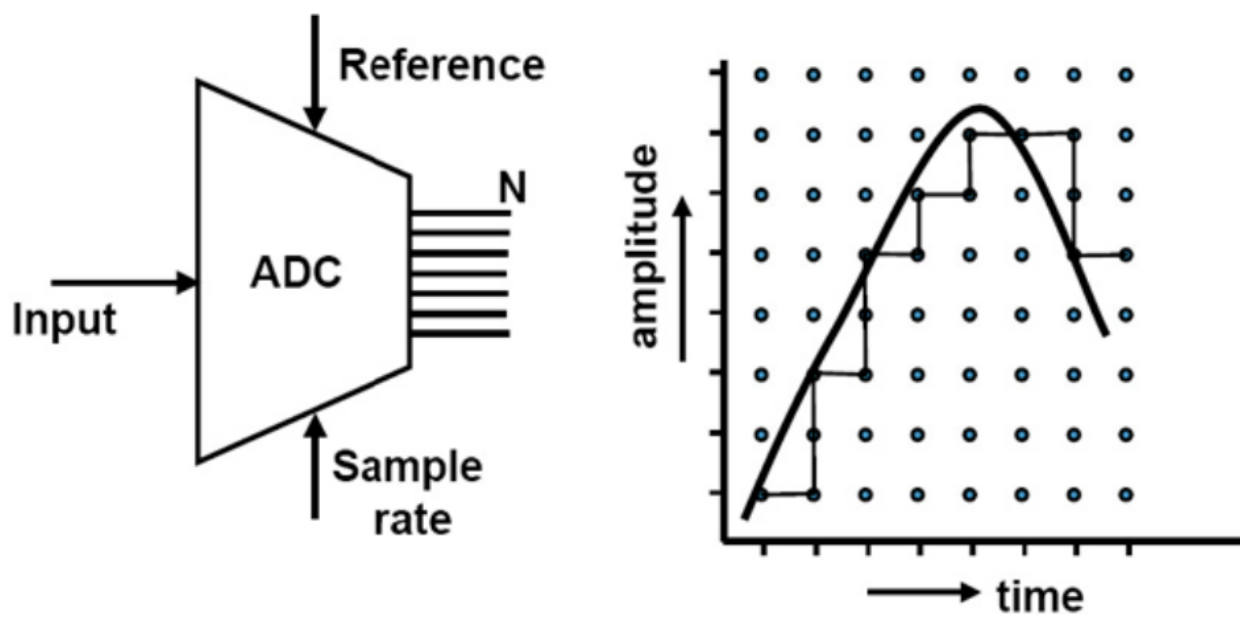
- Pas de cuantificare:

$$Q_s = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^N - 1}$$

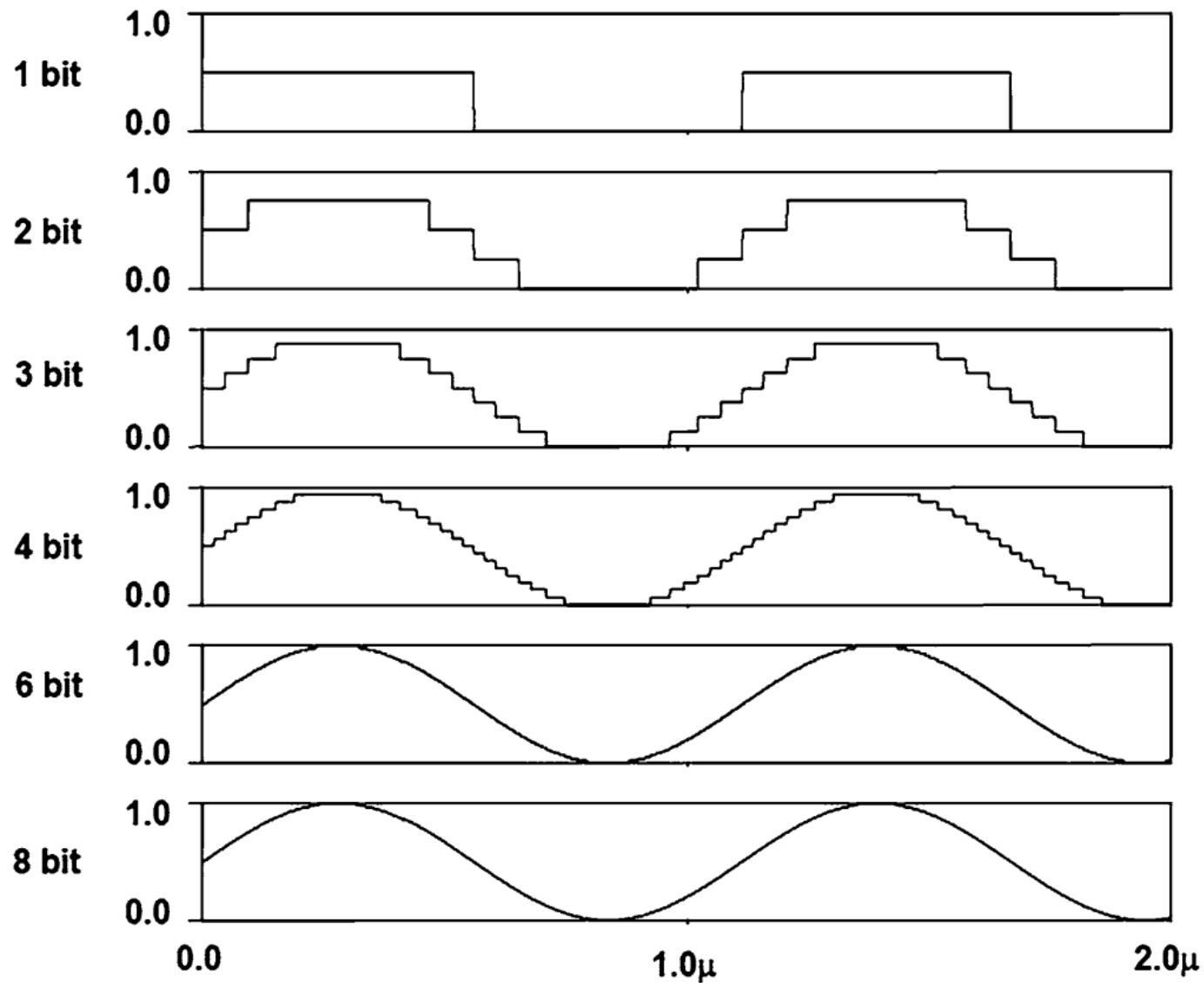
- Eroarea de cuantificare este definită ca diferența între valoarea reală a semnalului analogic și valoarea binară asociată



- Eroarea poate fi dată atât de procesul de eșantionare și reținere (valoarea eșantionului curent este menținută ca valoare pentru semnal până la următoarea eșantionare), cât și de procesul de cuantificare, care urcă sau coboară valoarea eșantionată, după cum dictează reprezentarea digitală



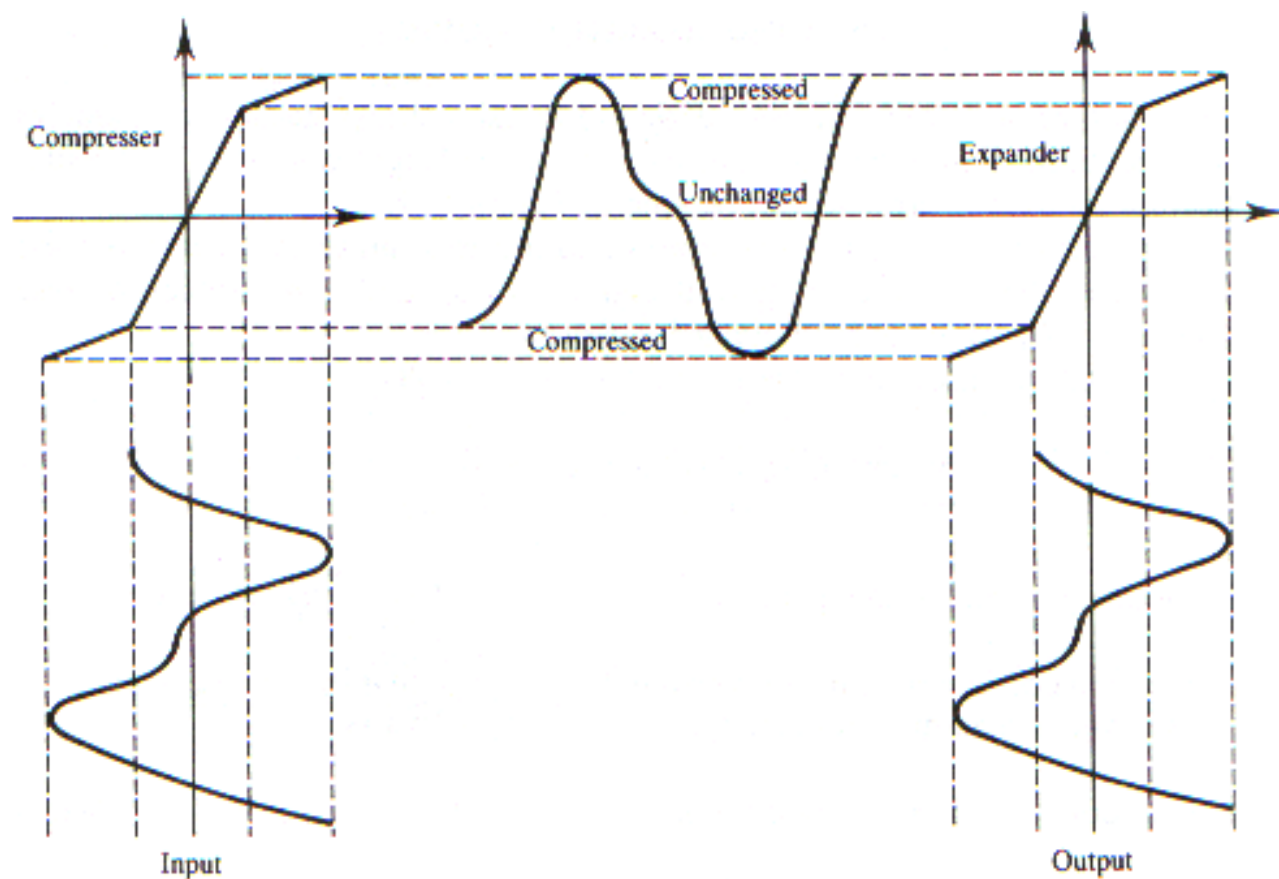
Source: Marcel J.M. Pelgrom, "Analog-to-Digital Conversion", Springer Netherlands, 2010.



Representation of a sine wave (900 kHz) quantized with 1, 2, 3, 4, 6, and 8 bit resolution

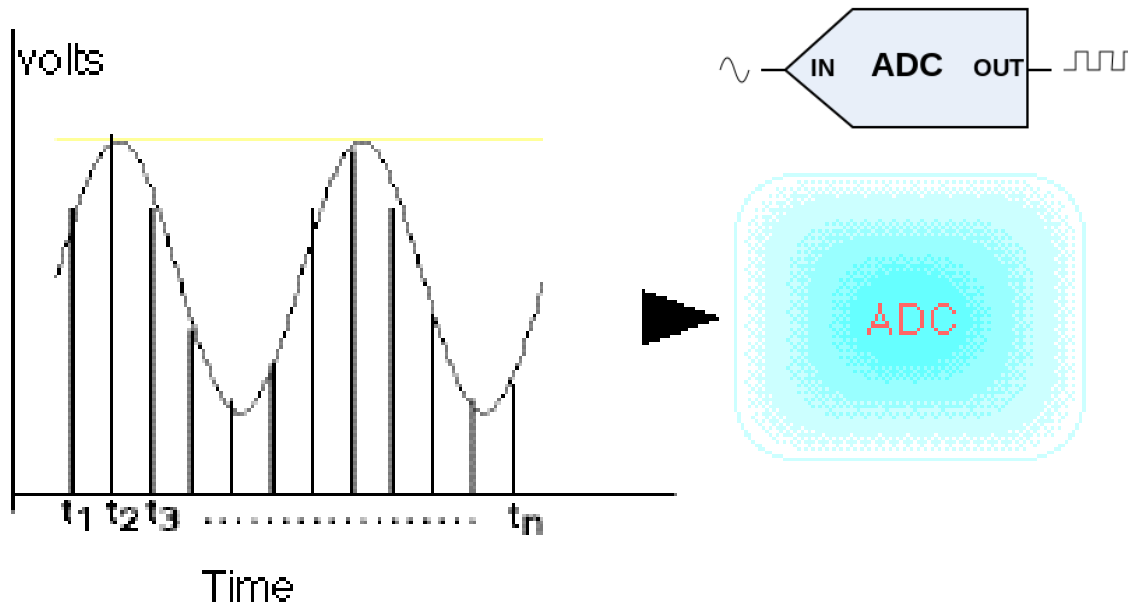
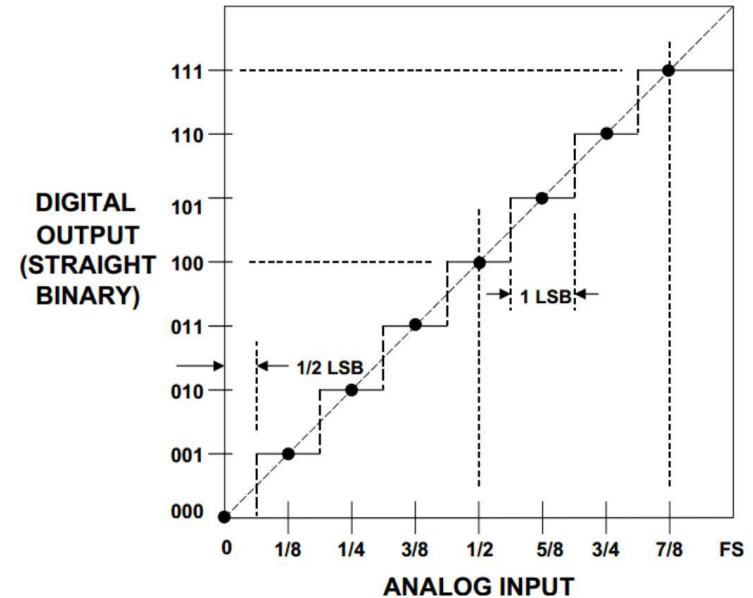
Source: Marcel J.M. Pelgrom, "Analog-to-Digital Conversion", Springer Netherlands, 2010.

- Semnalele de amplitudine mai mică sunt mai supuse erorii de cuantificare
- O soluție este creșterea numărului de biți alocați reprezentării unui eșantion, dar acest număr este de obicei de 8 sau 12, rar mai mare
- Soluția adaptivă este folosirea combinată a tehnicilor de compresie și expandare, tehnică numită *companding*
- Înaintea cuantificării, semnalul este distorsionat, în sensul că partea sa care prezintă valori mari este compresată după o anumită lege, iar la receptor, când se reface semnalul original, aceste intervale sunt expandate corespunzător aceleiași legi



Convertoare Analog Numerice (CAN)

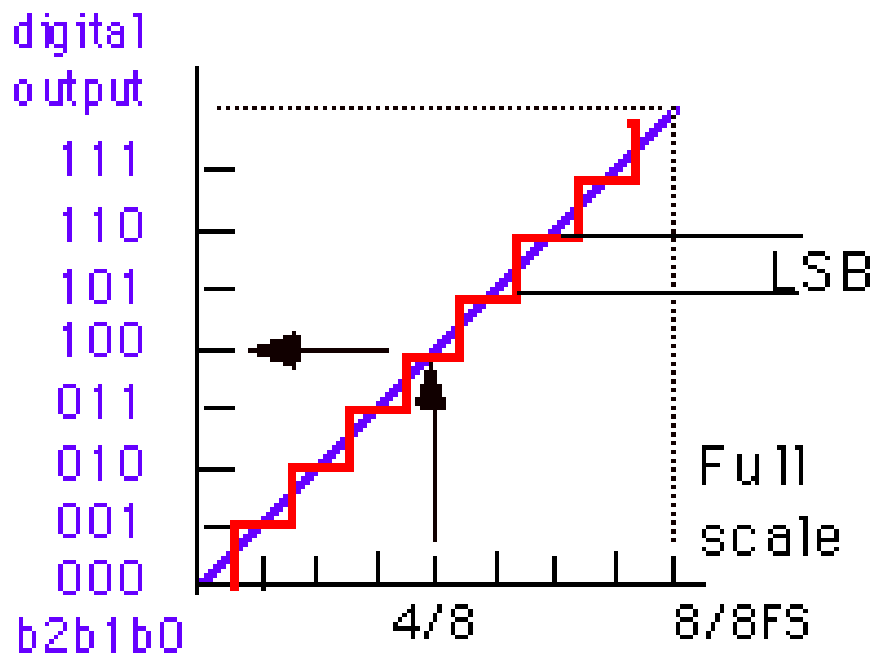
- ADC - Analog-to-Digital Converter
- Transformă un semnal analogic într-unul digital
- Procese de eșantionare-reținere la intervale regulate de eșantionare
- Eșantioane cuantificate pe baza unui număr de biți



TIME SAMPLE	DIG CODE
t_1	110
t_2	111
t_3	100
\vdots	\vdots
t_n	101

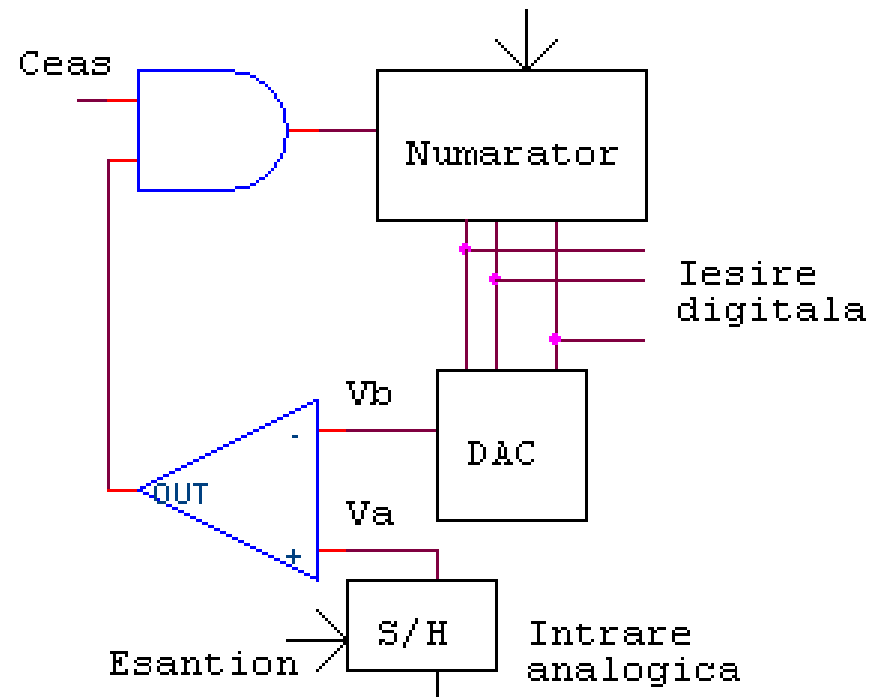
- Caracteristici ADC:
 - Conversia AD durează mai mult decât conversia DA
 - Un ADC poate conține un DAC
 - Conversia este temporizată de un semnal de ceas
 - Unitatea de control ADC este responsabilă pentru conversie, generarea semnalului și stocarea datelor
 - Rezoluția ADC dată de cea mai mică variație de intrare care dă o modificare a codului (ieșirii) (în funcție de numărul de biți pe care îi folosește ADC)
 - ADC prezintă o eroare inerentă de cuantificare, dar și: erori de offset, câștig, liniaritate (integrală și diferențială), histerezis și monotonie

- Caracteristica de transfer are forma unei funcții în trepte
- LSB sau bitul cel mai puțin semnificativ este definit ca incrementul minim de tensiune pe care CAN îl poate converti
- Full scale (FS) reprezintă domeniul de variație al intrării. Dacă FS pentru semnalul de intrare este de 10V, atunci LSB pentru un CAN pe trei biți este: $10/(2^3)=1.25V$. Pentru un CAN pe 12 biți, valoarea LSB este: $10/(2^{12})=2.44mV$
- Principalele tipuri de CAN sunt:
 - CAN cu simplă rampă
 - CAN folosind aproximații succesive
 - CAN cu dublă rampă
 - CAN lucrând în mod paralel (flash)
 - CAN Sigma Delta

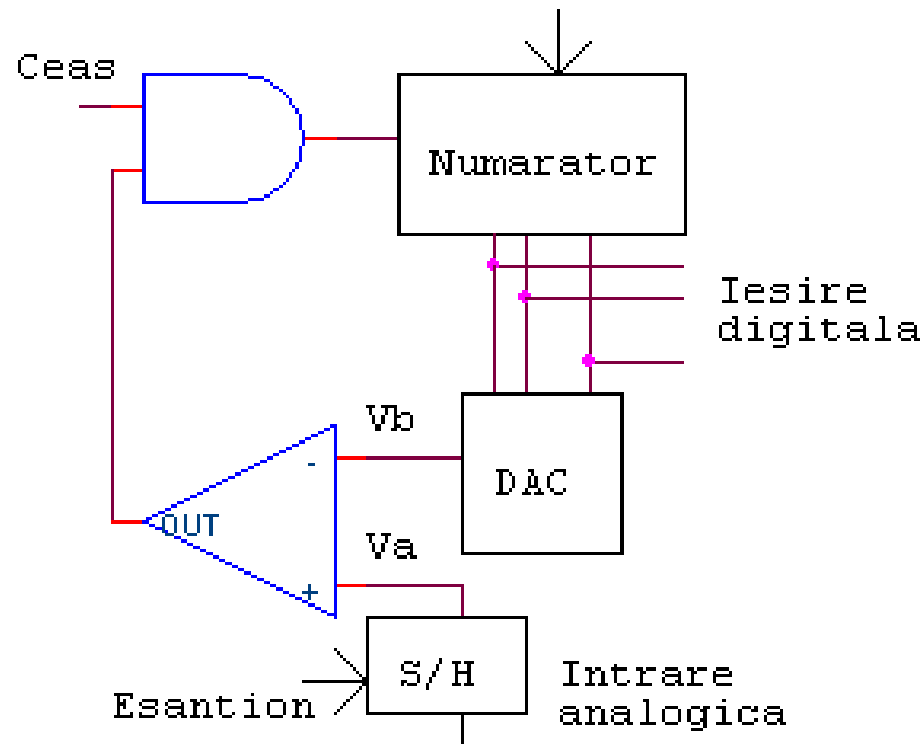


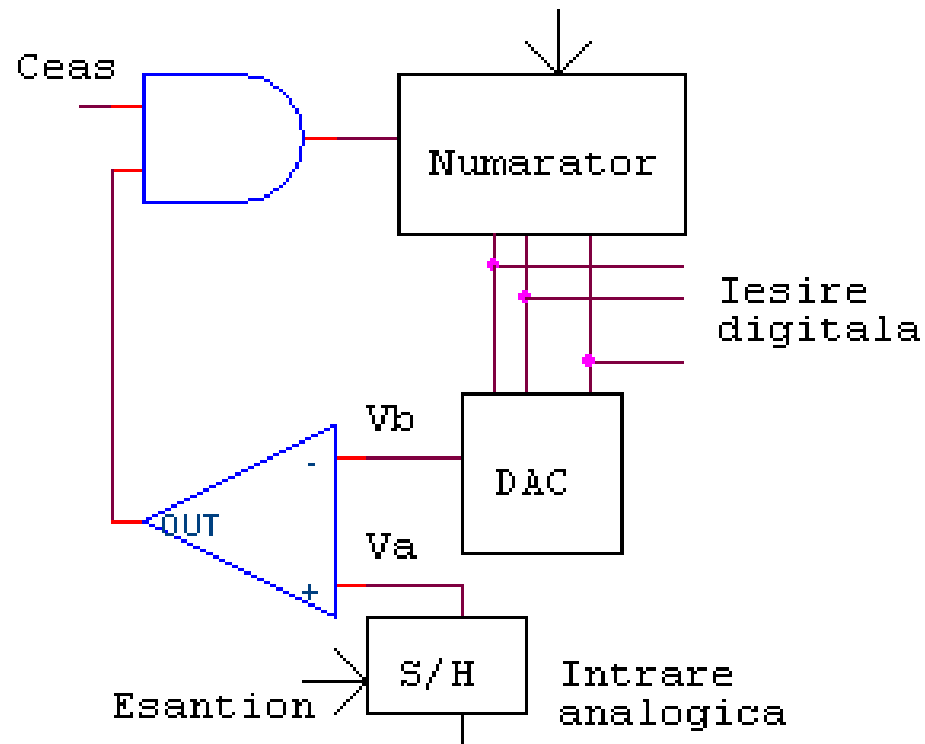
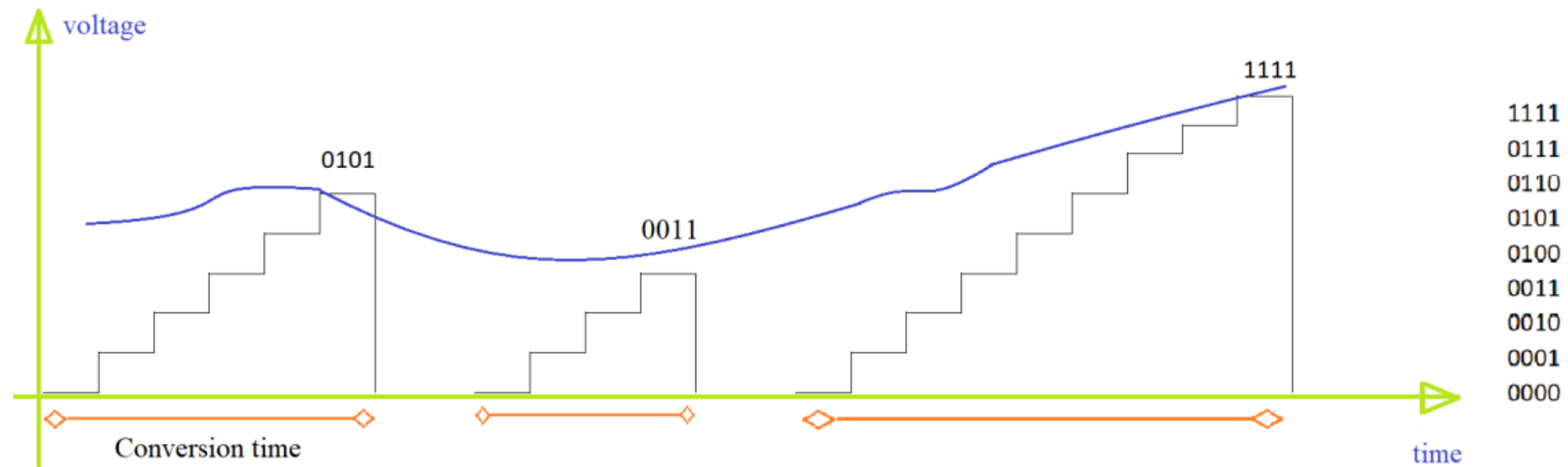
CAN cu simplă rampă

- Relativ simplu, dar lent, timpul de conversie depinzând liniar de numărul de biți pentru cuantificare
- Compus din trei sub-blocuri:
 - numărător binar
 - convertor numeric-analogic
 - comparator analogic



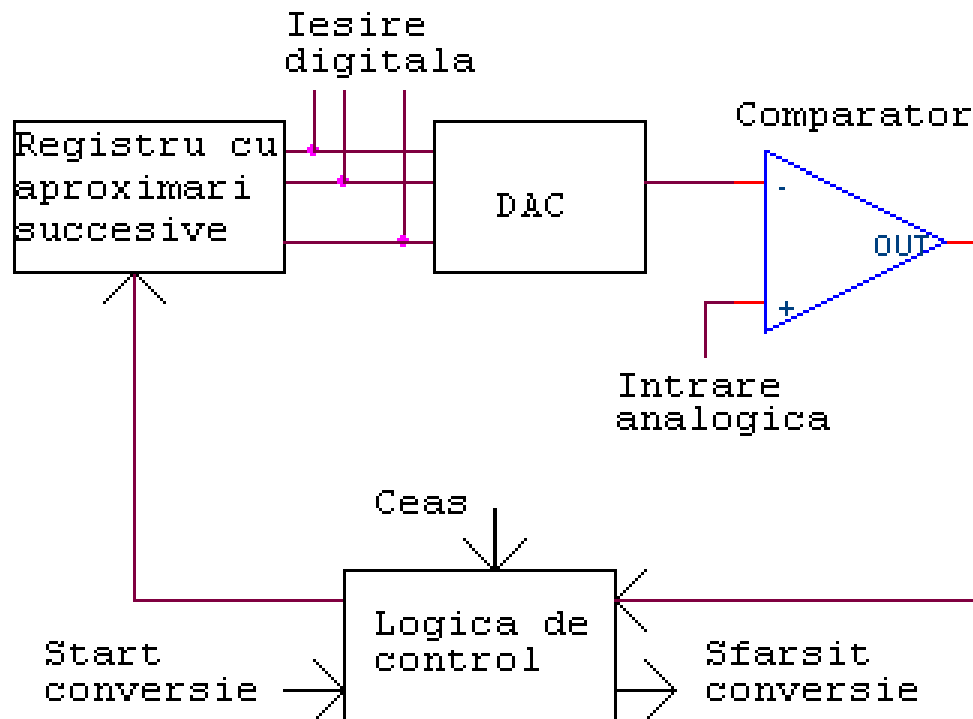
- Mod de operare:
- Numărătorul este resetat
- Intrarea analogică este eșantionată
- Cât timp tensiunea pe borna pozitivă a comparatorului V_a este mai mare decât cea de pe borna negativă V_b , numărătorul binar este incrementat
- Când V_a este egal cu V_b numărătorul este oprit, iar codul binar echivalent (rezultatul conversiei) este disponibil la ieșire.

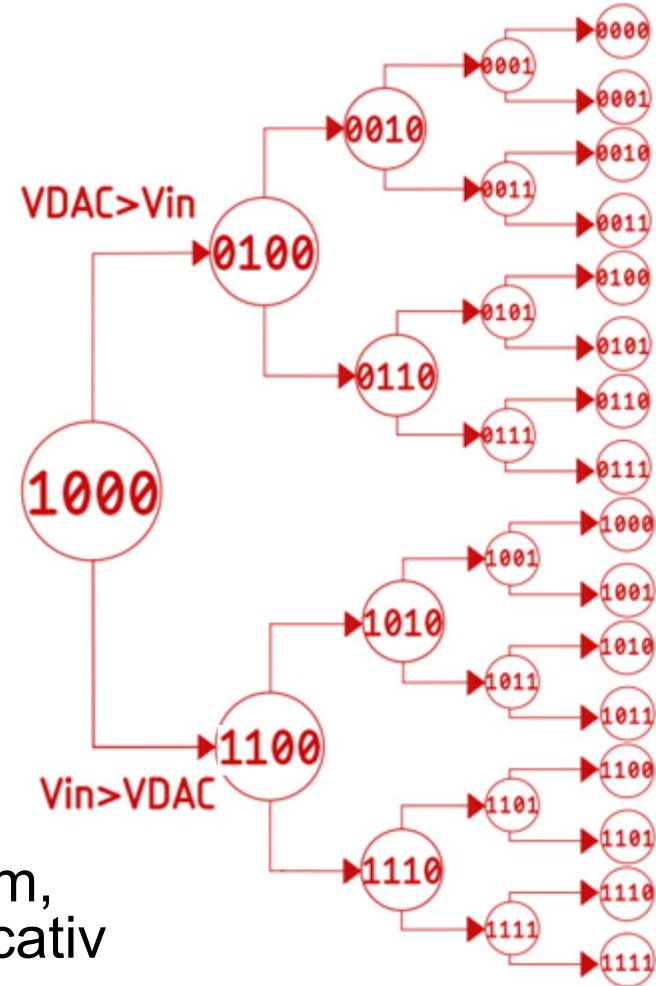
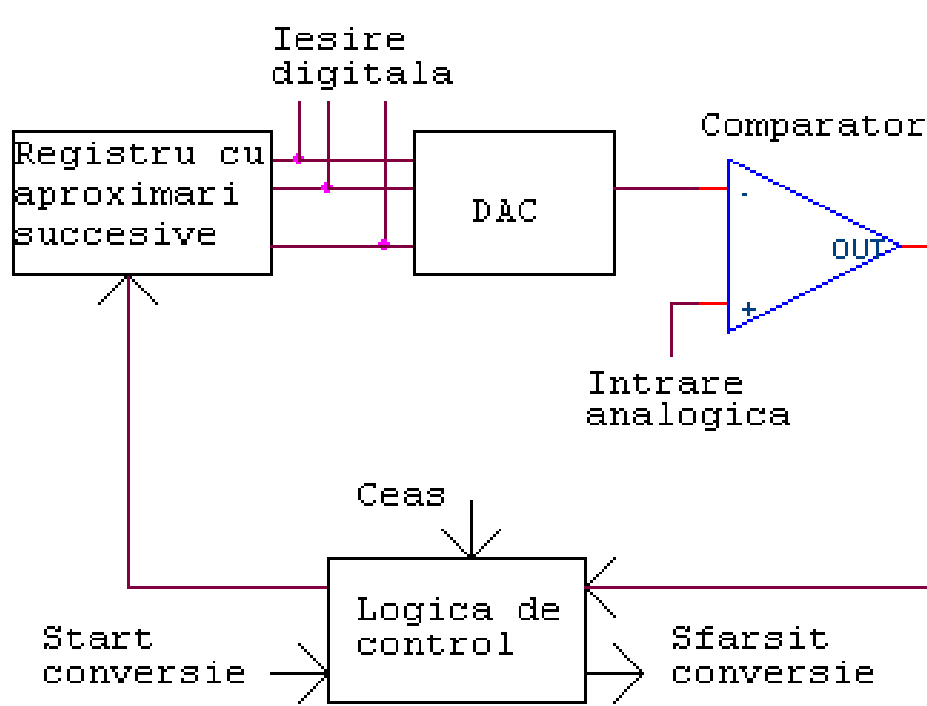




CAN cu aproximații succesive

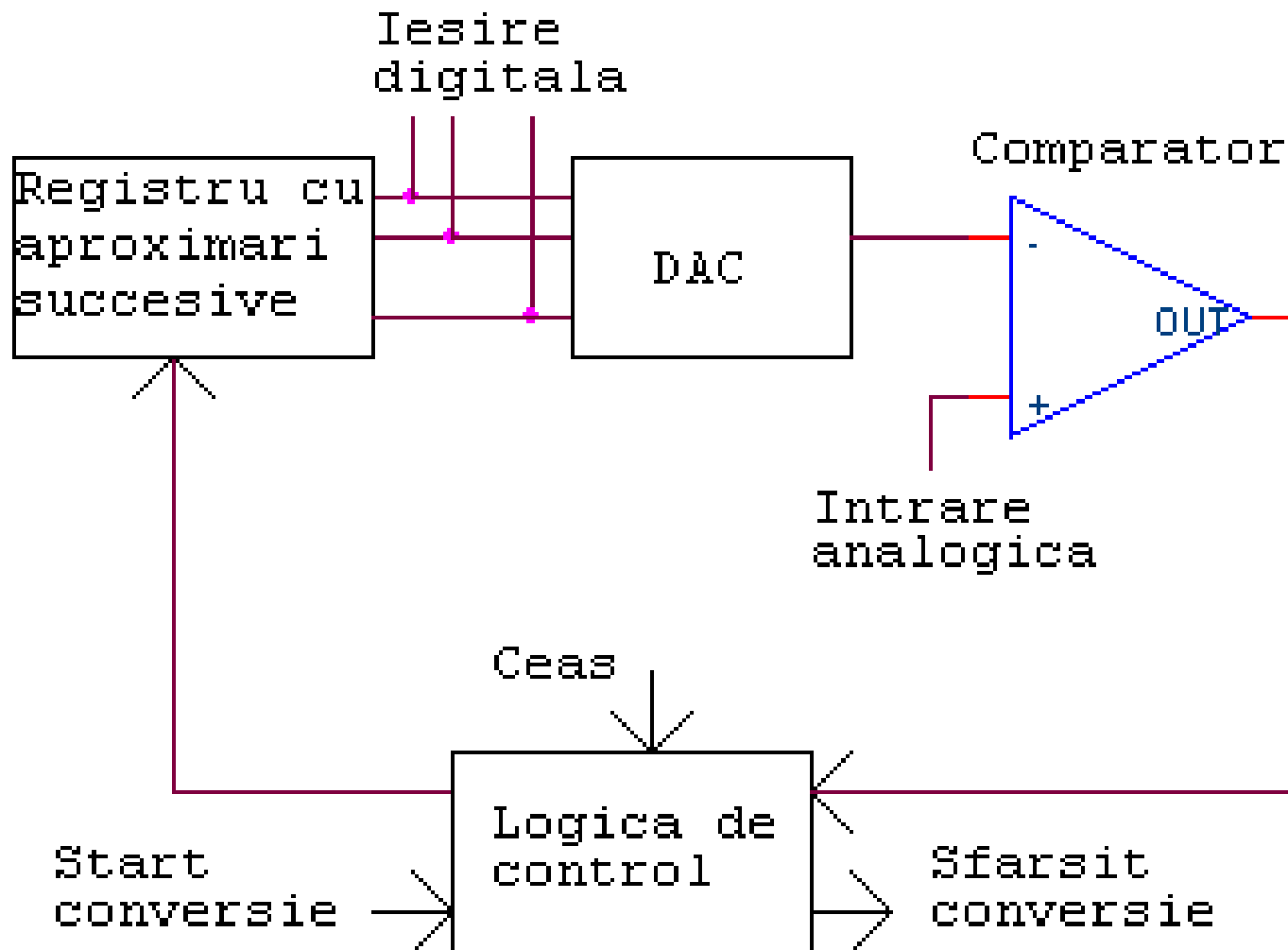
- Cel mai comun, bazat pe 8 sau 12 biți și conține următoarele elemente de bază:
 - Convertor numeric-analogic
 - Comparator analogic
 - Modul cu logică de control
 - Registru pentru aproximațiile succesive





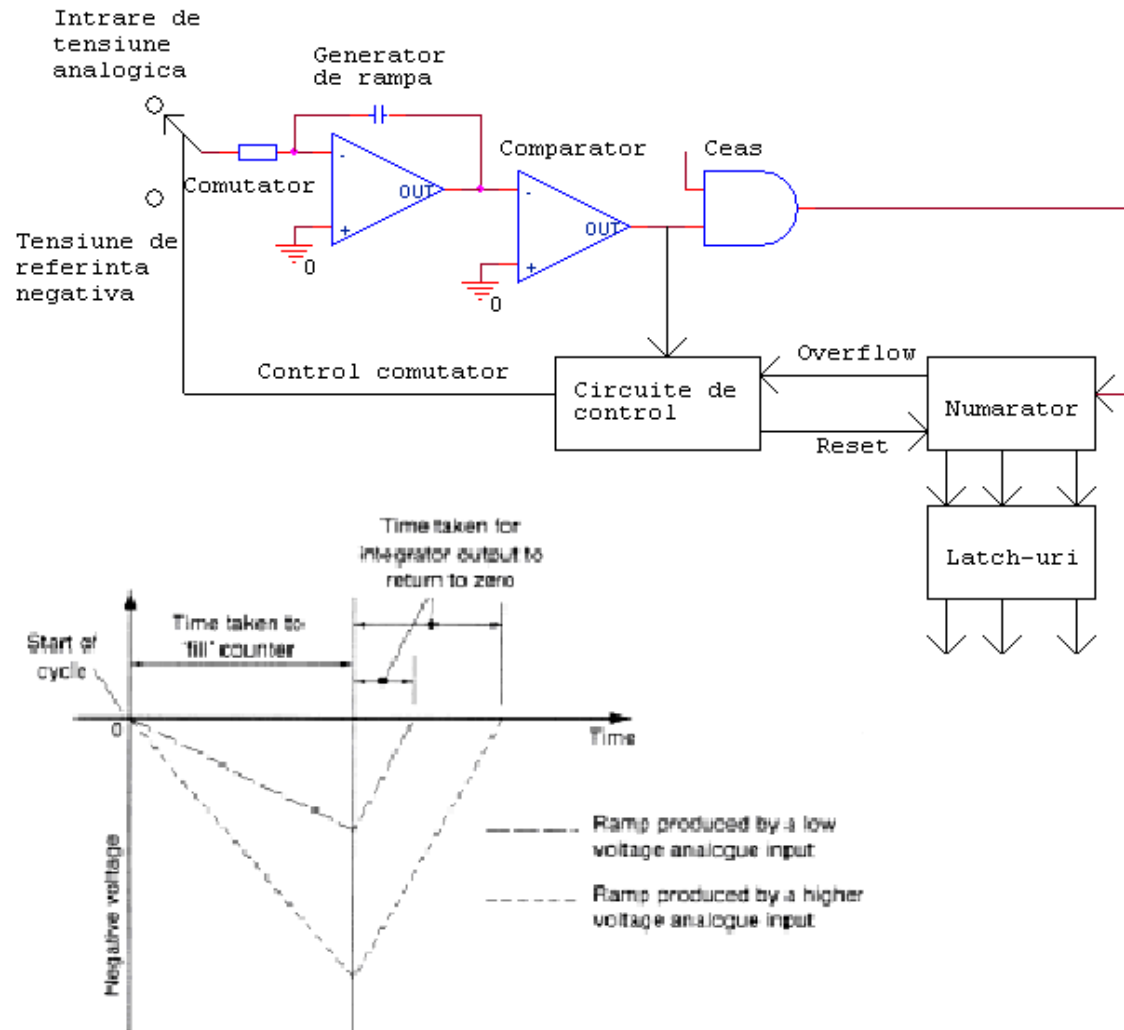
- Mod de operare bazat pe căutarea binară:
- Inițial, registrul prezintă la ieșiri o valoare corespunzătoare jumătății domeniului maxim, obținută prin setarea bitului cel mai semnificativ la 1 și a tuturor celorlalți la 0 (1000...0)
- Dacă intrarea analogică prezentă la borna comparatorului este mai mare decât cea obținută de la ieșirea convertorului numeric-analogic, $MSB=1$, altfel $MSB=0$
- Registrul execută aceleași operație pentru fiecare bit, de la MSB la LSB, la sfârșit registrul prezentând la ieșiri valoarea numerică rezultat al conversiei.

- Caracteristici:
- Conversia necesită doar N pași, iar valori ale timpului de conversie de ordinul μs sunt tipice
- Ieftine, relativ precise și rapide

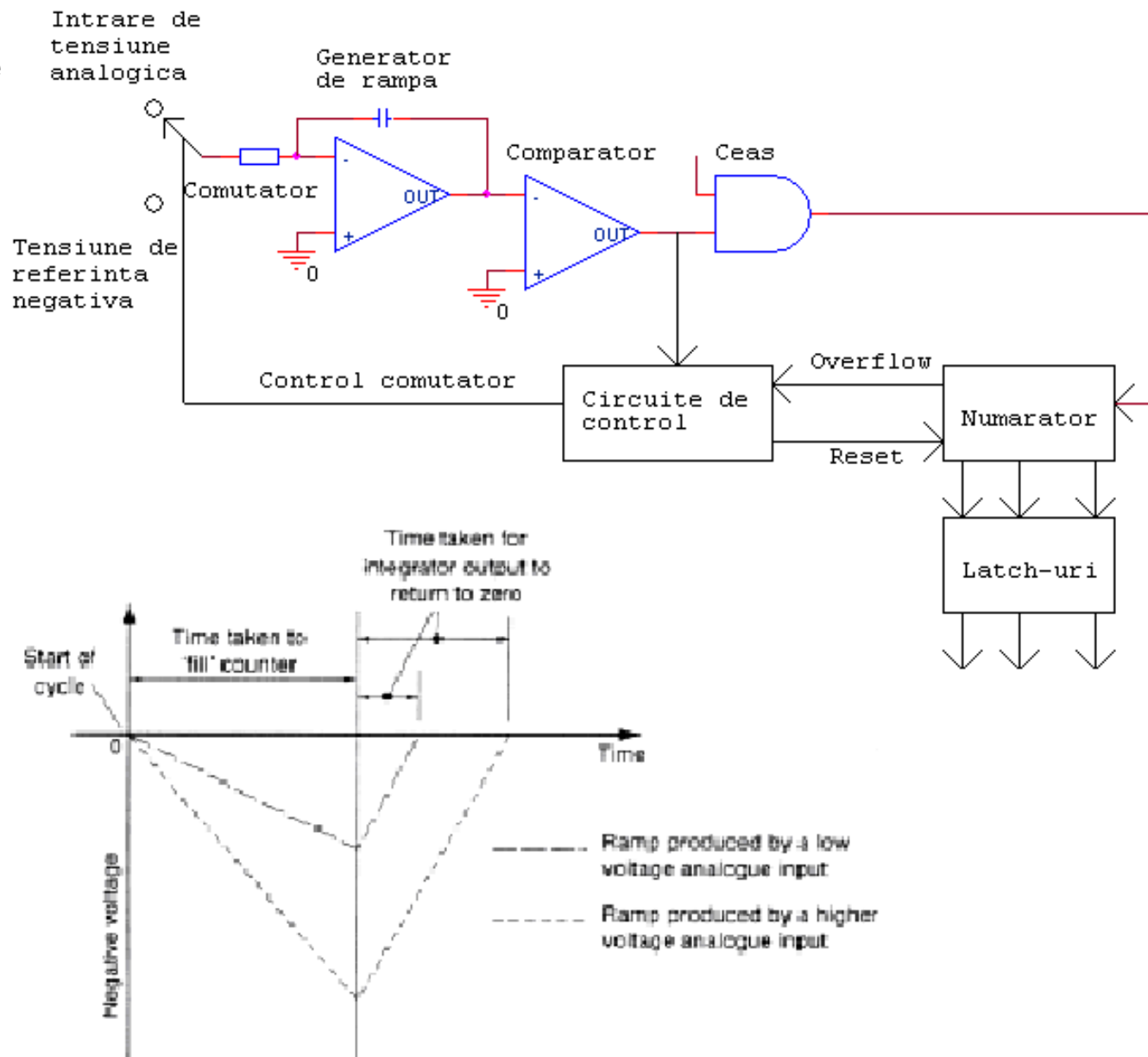


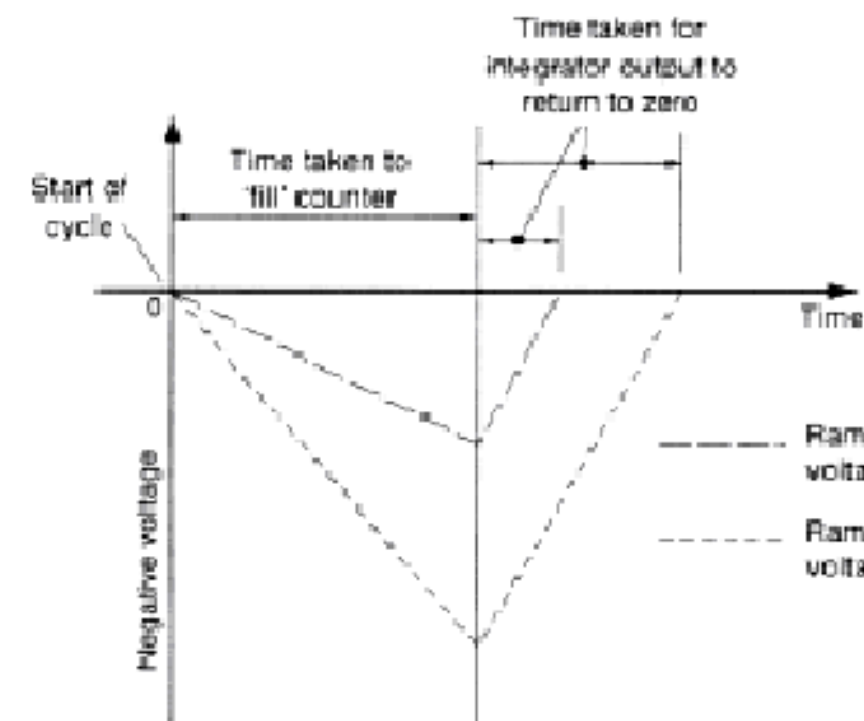
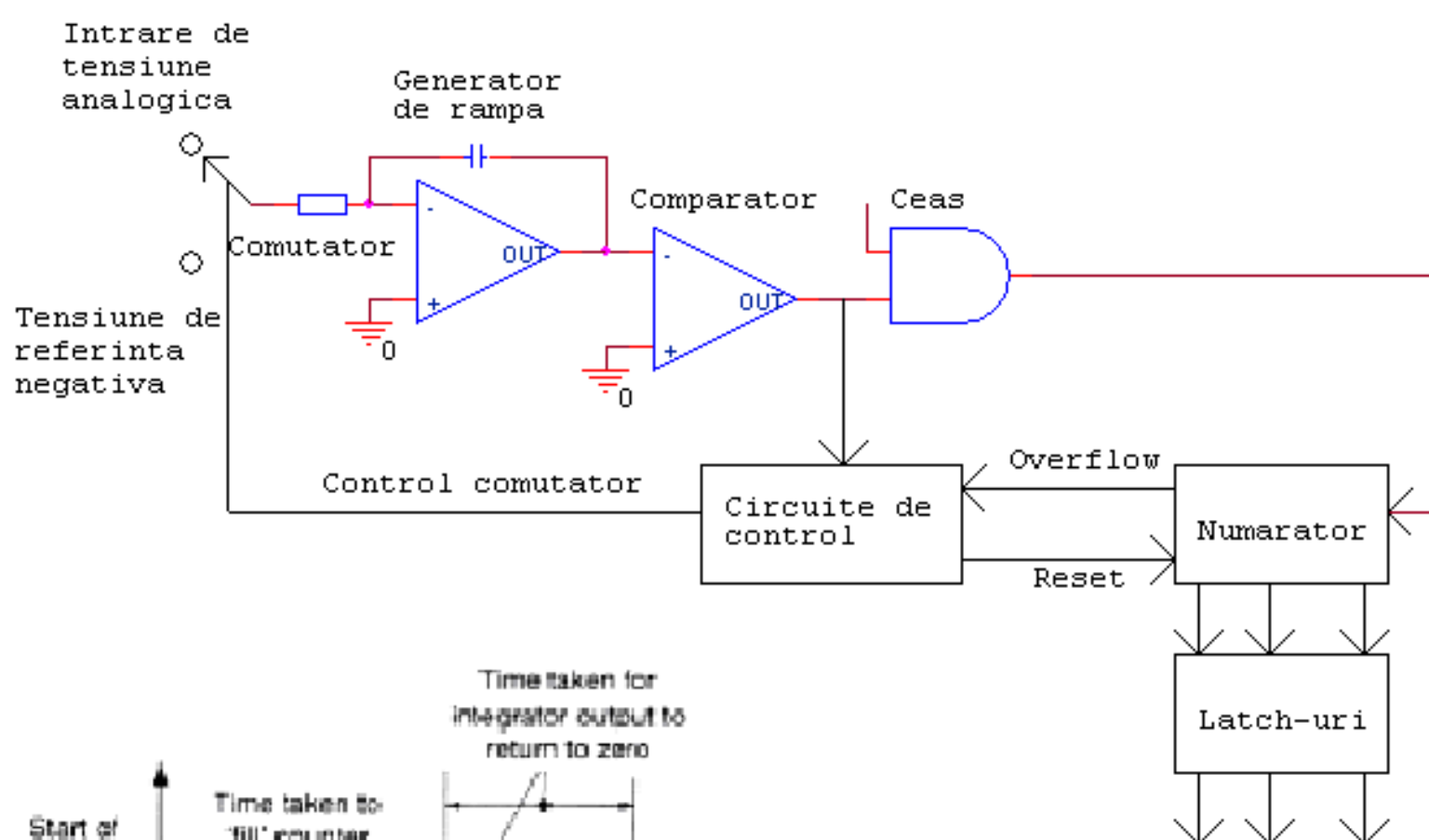
CAN cu dublă rampă

- Elemente de bază:
 - Circuit integrator
 - Circuit detector de trecere prin zero
 - Numărător binar
 - Logică de comandă și circuite de comutare

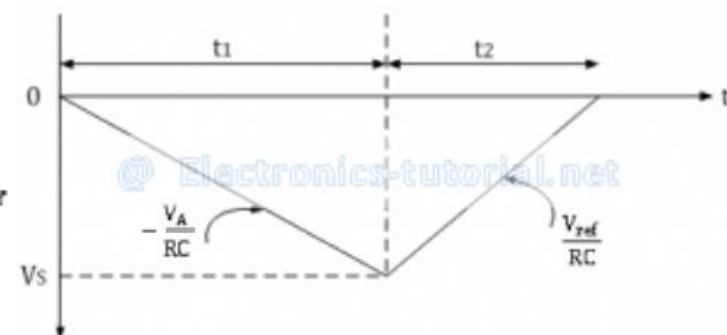


- Mod de operare:
- Numărătorul este resetat și comutatorul este conectat la intrarea analogică
- Integratorul generează o tensiune negativă de tip rampă, cu o înclinare ce depinde de mărimea intrării analogice
- Comparatorul prezintă la ieșirea sa nivel ridicat, ce permite impulsurilor de ceas să comande numărătorul
- Când numărătorul indică depășire (semnal overflow activ), este resetat la zero și circuitele de control schimbă poziția comutatorului la o tensiune negativă de referință
- Aceasta comandă integratorul să genereze a rampă cu înclinare pozitivă
- Când această rampă trece prin zero, comparatorul generează la ieșire valoare coborâtă, ce stopează numărătorul, iar valoarea din acel moment reprezintă echivalentul numeric al semnalului analogic de la intrare.





$$T_2 = V_A / V_{ref} * T_1$$

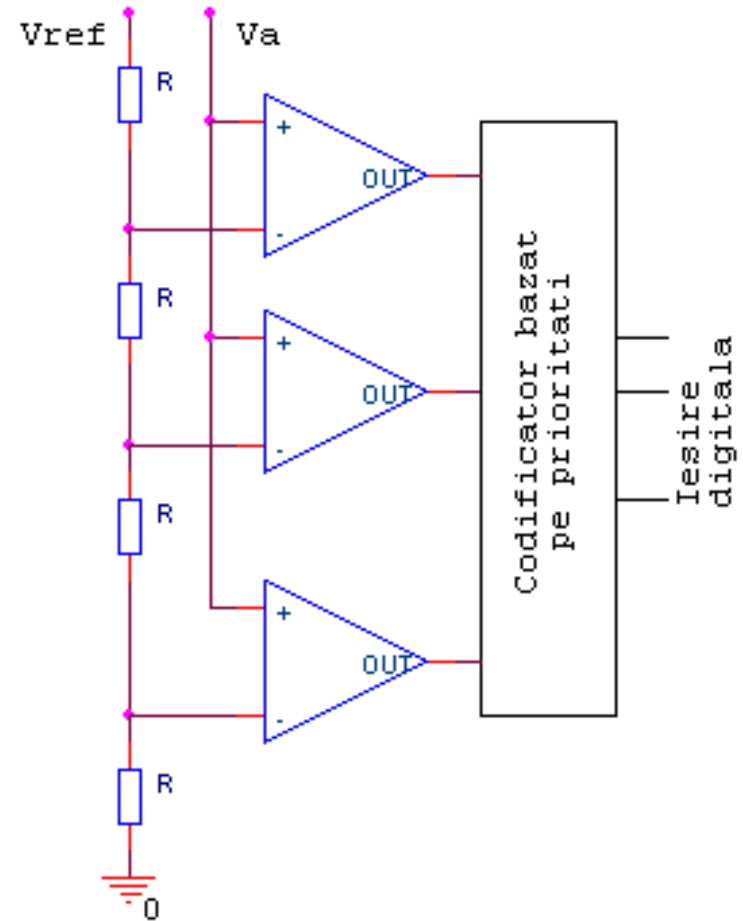


@ Electronics-tutorial.net

- Caracteristici:
 - Rezoluție înaltă, dar viteză de conversie modestă; cost mai ridicat ca anteriorul
 - Utilizat în special în construirea aparatelor de măsură
 - Puțin sensibil la zgomot sau la modificările semnalului de ceas

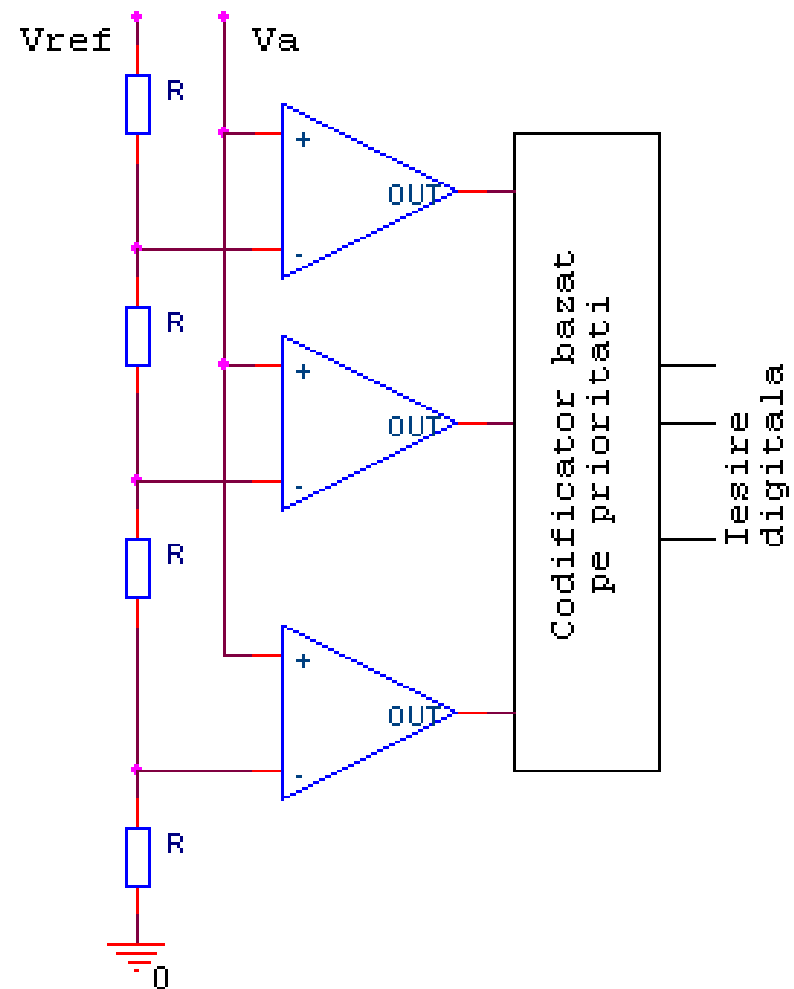
CAN de tip paralel (flash)

- Elementele componente de bază:
 - Circuit divizor multiplu de tensiune
 - Set de circuite comparatoare
 - Circuit codificator bazat pe prioritate
- Compară tensiunea de intrare în mod paralel, folosind un set de comparatoare atașate la o rețea de rezistențe. Se produce astfel o ieșire numerică într-un singur ciclu de operare, ceea ce dă viteza deosebită a acestui CAN
- Dezavantajul este prețul ridicat, dat de necesitatea fabricării de rezistențe cu valori foarte precise, și a creșterii exponențiale a numărului de componente odată cu creșterea numărului de biți folosiți la conversie

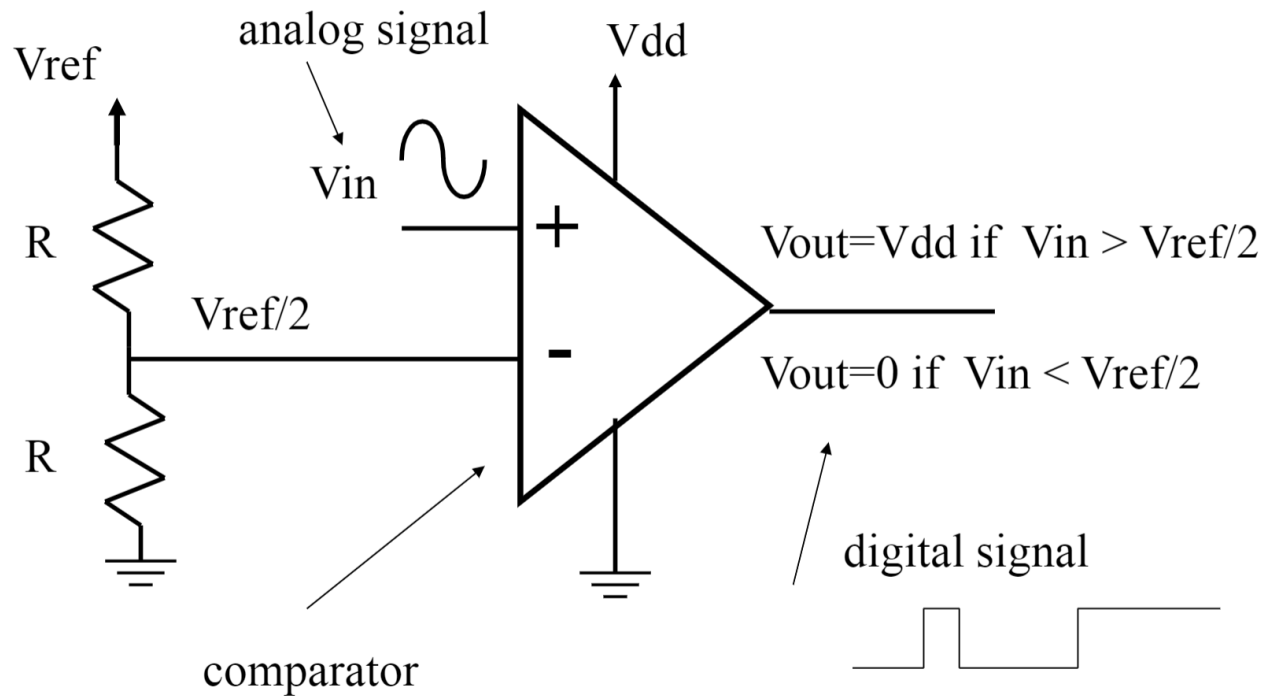


- Mod de operare:
- Intrarea analogică este aplicată la toate intrările comparatoarelor
- Codificatorul bazat pe priorități convertește valorile de la ieșirile comparatoarelor în informație binară, bazat pe o tabelă specifică. Pentru un CAN pe trei biți, se dau exemplele următoare și tabela:
- Pentru 0001111 codificatorul generează 100
- Pentru 0111111 codificatorul generează 110

VA	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	CBA
$VA < 1V$	0	0	0	0	0	0	0	000
$1 < VA < 2V$	0	0	0	0	0	0	1	001
$2 < VA < 3V$	0	0	0	0	0	1	1	010
$3 < VA < 4V$	0	0	0	0	1	1	1	011
$4 < VA < 5V$	0	0	0	1	1	1	1	100
$5 < VA < 6V$	0	0	1	1	1	1	1	101
$6 < VA < 7V$	0	1	1	1	1	1	1	110
$VA > 7V$	1	1	1	1	1	1	1	111



A 1-bit ADC



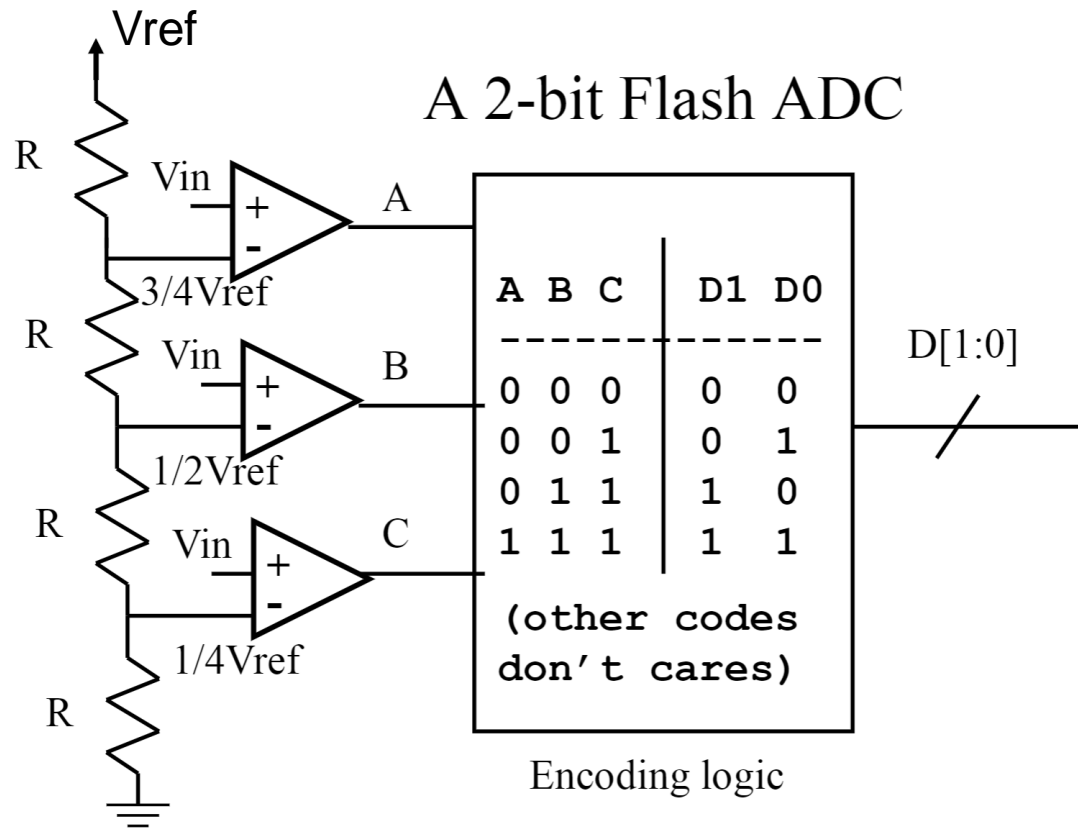
Vin<1/2Vref

$$1/2V_{ref} < V_{in}$$

D=0

D=1

Exemplu CAN 1 bit



$V_{in} < 1/4 V_{ref}$

$ABC = 000$

$D1D0 = 00$

$1/4 V_{ref} < V_{in} < 1/2 V_{ref}$

$ABC = 001$

$D1D0 = 01$

$1/2 V_{ref} < V_{in} < 3/4 V_{ref}$

$ABC = 011$

$D1D0 = 10$

$3/4 V_{ref} < V_{in}$

$ABC = 111$

$D1D0 = 11$

Exemplu CAN 2 biti

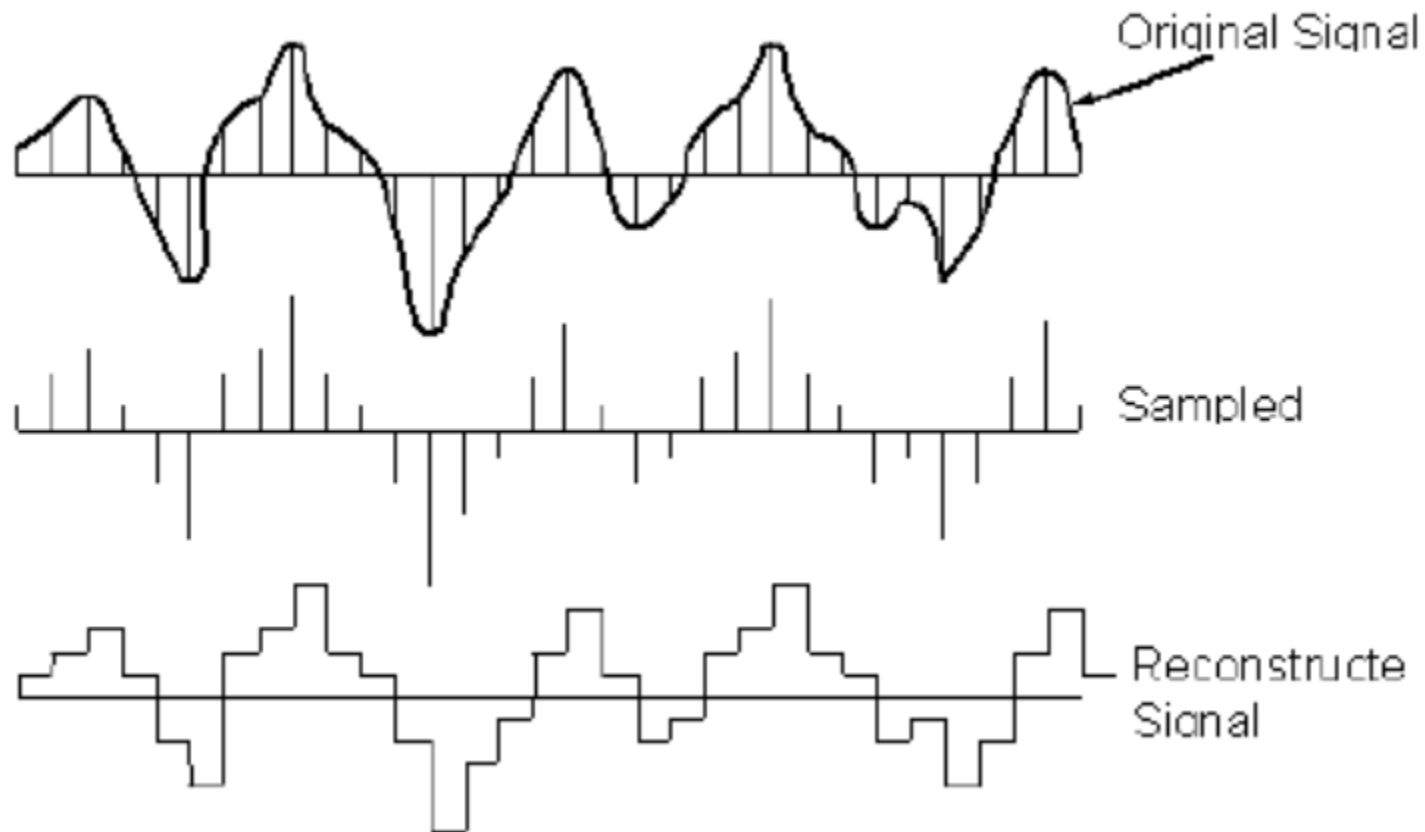
Convertoare Numeric Analogice (CNA)

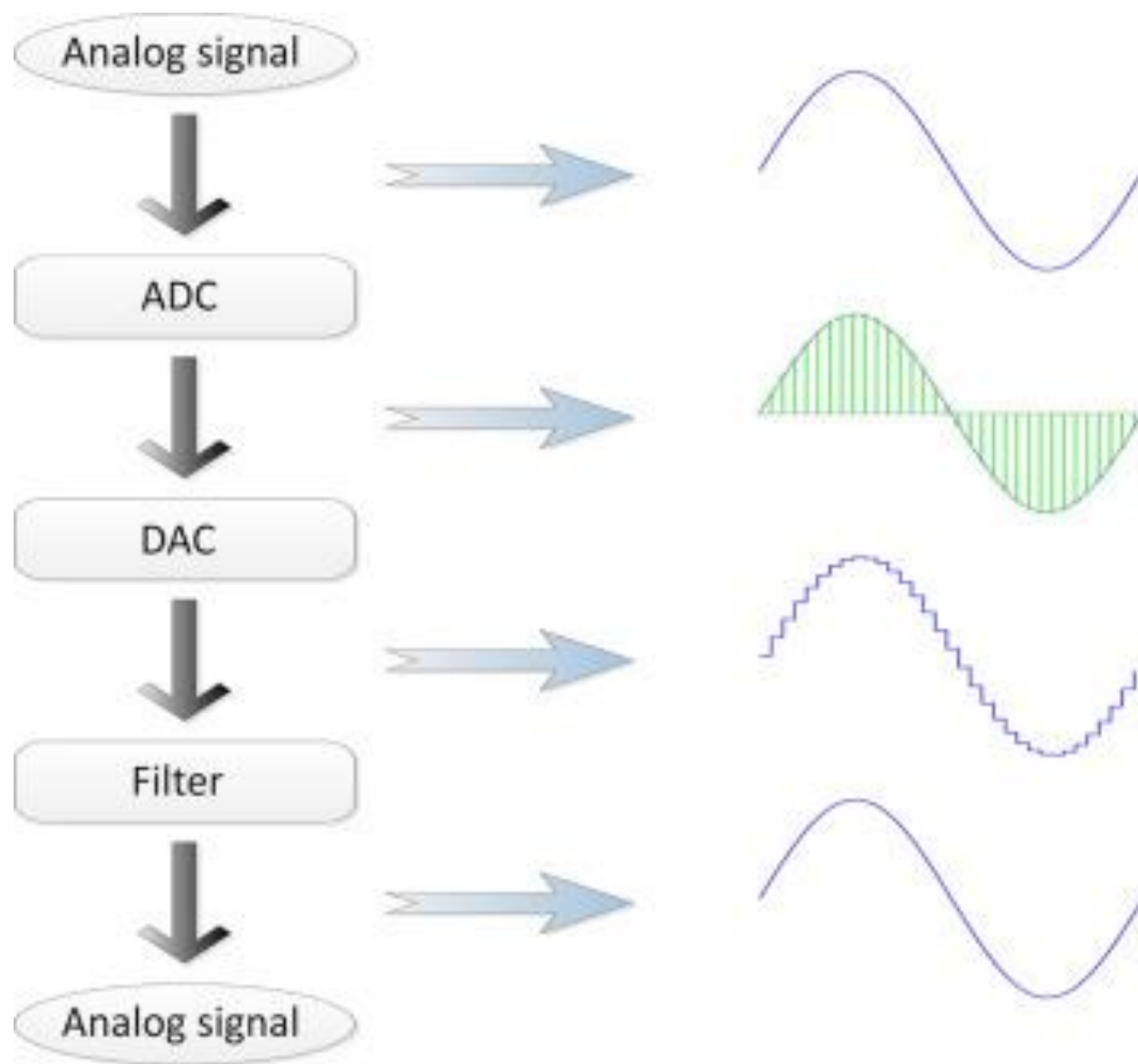
- Are la intrare o mărime numerică (digitală) și generează pe baza ei o ieșire continuă (analogică)
- Tensiunea de la ieșire se constituie ca o sumă de componente de tensiune, fiecare componentă fiind dublul alteia:

$$V_{out} = U_{ref} \cdot \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right)$$

- Performanța convertorului este dată de numărul de eșantioane ce pot fi procesate și numărul de biți folosiți la conversie

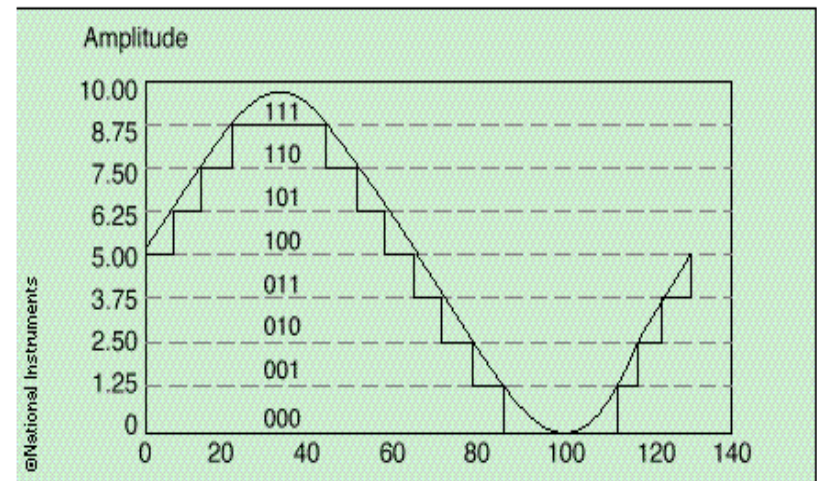
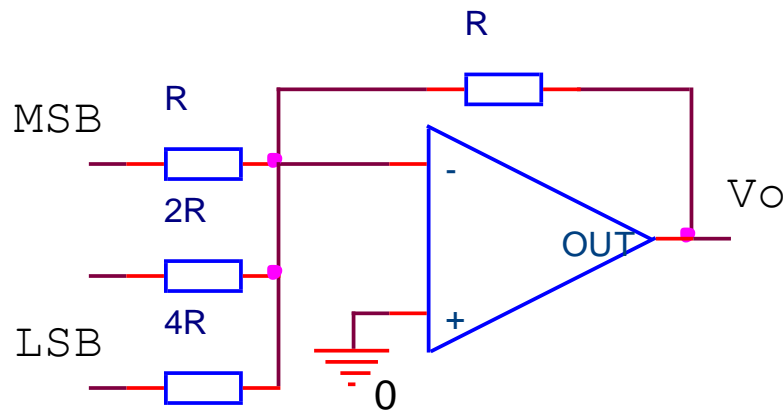
- Principalele tipuri de CNA:
 - cu rezistențe ponderate
 - cu rețea de rezistențe R-2R
 - modulator de lățime a impulsului (PWM - pulse width modulator)





CNA cu rezistențe ponderate

- Bazat pe un circuit amplificator operațional sumator
- Fiecare rezistor de intrare este dublu ca valoare față de anteriorul
- Intrările prezintă mărimi (ponderate) care depind de rezistoarele aferente
- Rezistorul R, care este cel de valoare minimă, afectează bitul cel mai semnificativ MSB și trebuie să prezinte precizie maximă. Dacă numărul de biți folosiți N este mare, convertorul devine nepractic, deoarece un număr mare de rezistoare (de valori R, 2R, 3R ...) trebuie să fie fabricate cu precizie, deci apar dificultăți în procesul de integrare. Valoarea tensiunii analogice de la ieșire se obține după formula:
- $V_o = -(V_R + 0.5V_{2R} + 0.25V_{4R} + 0.125V_{8R} + \dots)$

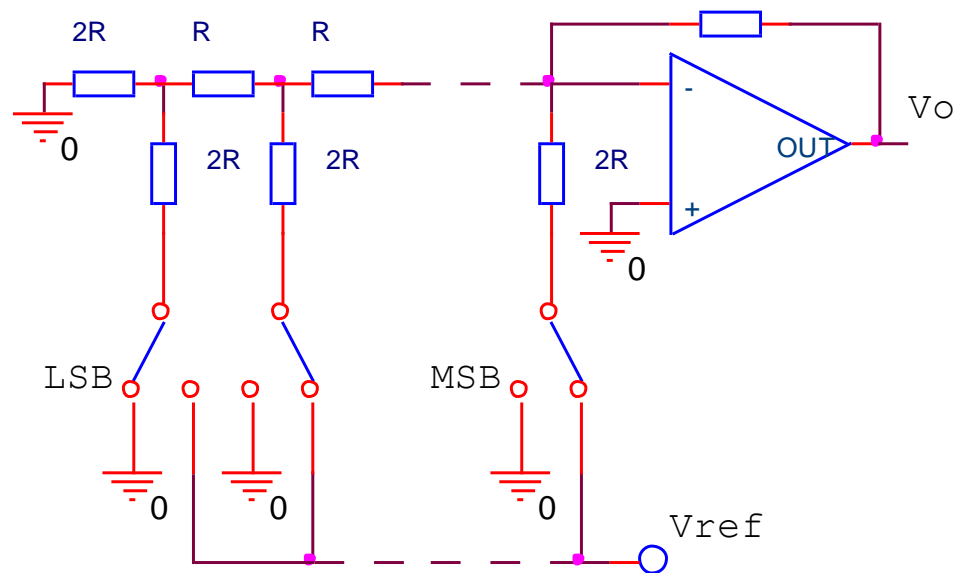


4-bit Binary Weighted D/A Converter Output

Digital Inputs				V _{OUT} Expression	V _{OUT}
D	C	B	A	$1 \cdot V_D + \frac{1}{2} \cdot V_C + \frac{1}{4} \cdot V_B + \frac{1}{8} \cdot V_A$	in Volts
0	0	0	0	$0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5$	0
0	0	0	1	$0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-0.625
0	0	1	0	$0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-1.25
0	0	1	1	$0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-1.875
0	1	0	0	$0 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-2.50
0	1	0	1	$0 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-3.125
0	1	1	0	$0 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-3.75
0	1	1	1	$0 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-4.375
1	0	0	0	$1 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-5.00
1	0	0	1	$1 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-5.625
1	0	1	0	$1 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-6.25
1	0	1	1	$1 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-6.875
1	1	0	0	$1 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-7.50
1	1	0	1	$1 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + 0 \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-8.125
1	1	1	0	$1 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + 0 \cdot 5$	-8.75
1	1	1	1	$1 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 5 + \frac{1}{4} \cdot 5 + \frac{1}{8} \cdot 5$	-9.375

CNA cu rețea de rezistențe R-2R

- Bazat pe rezistori cu valori similare, deci prezintă avantaje pentru integrare.
- Mod de operare:
- Când bitul k este 1, comutatorul corespunzător este conectat la tensiunea de referință V_{REF}
- Când bitul k este 0, comutatorul corespunzător este conectat la masă GND
- Exemplu: dacă se presupune că toate liniile, cu excepția uneia sunt conectate la masă:
- Linia conectată la V_{REF} va genera un curent ce va circula către intrarea invertoare a amplificatorului operațional
- Acest curent este înjumătățit la fiecare nod al rețelei de rezistențe
- Astfel contribuția fiecărei intrări este dată de poziția bitului aferent în cadrul configurației binare



- Ecuatia generalizata a CNA R-2R

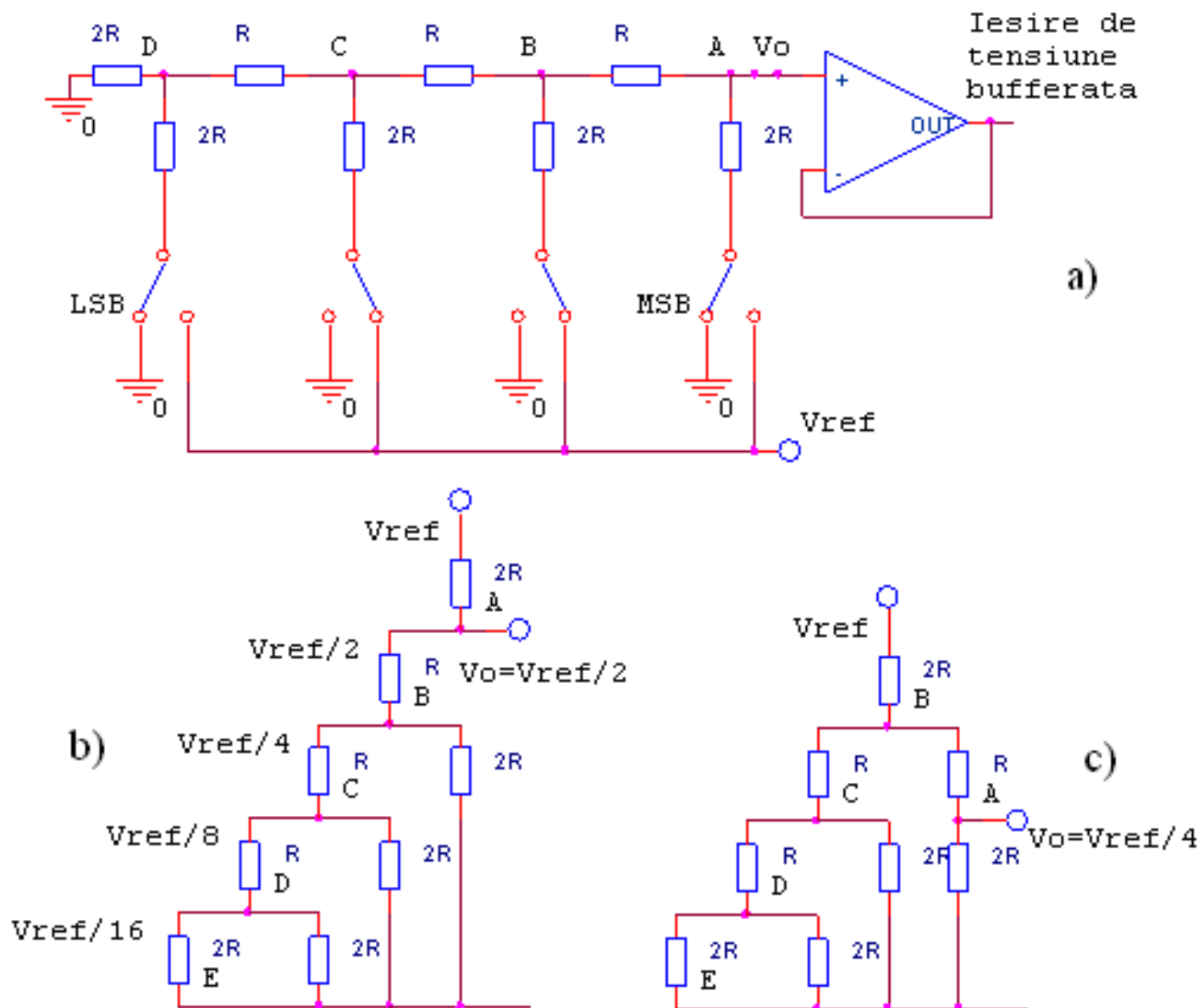
$$V_{OUT} = \frac{V_A + 2V_B + 4V_C + 8V_D + 16V_E + 32V_F + \dots etc}{2^n}$$

CNA R-2R, 4 biti

- n – numarul de intrarii digitale
- $V_{LSB} = V_{IN} / 2^n$

Digital Inputs				V _{OUT} Expression	V _{OUT}
D	C	B	A	$(8 \cdot V_D + 4 \cdot V_C + 2 \cdot V_B + 1 \cdot V_A) / 2^4$	in Volts
0	0	0	0	$(0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	0
0	0	0	1	$(0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	0.3125
0	0	1	0	$(0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	0.6250
0	0	1	1	$(0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	0.9375
0	1	0	0	$(0 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	1.2500
0	1	0	1	$(0 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	1.5625
0	1	1	0	$(0 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	1.8750
0	1	1	1	$(0 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	2.1875
1	0	0	0	$(8 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	2.5000
1	0	0	1	$(8 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	2.8125
1	0	1	0	$(8 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	3.1250
1	0	1	1	$(8 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	3.4375
1	1	0	0	$(8 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	3.7500
1	1	0	1	$(8 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 0 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	4.0625
1	1	1	0	$(8 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 0 \cdot 5) / 16$	4.3750
1	1	1	1	$(8 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 5) / 16$	4.6875

- În figura (b) doar MSB este ON
- În figura (c) doar penultimul bit este ON



Probleme propuse

- Un semnal analogic avand frecventa maxima de 20kHz este convertit in semnal digital. Care este frecventa minima cu care trebuie esantionat acest semnal.

$$f_N = 2 * f_m = 40\text{kHz}$$

- Un CAN pe 8 biti cuantifica un semnal analogic intre limitele $V_{\min} = 0\text{V}$ si $V_{\max} = 10\text{V}$. Sa se calculeze pasul de cuantificare.

$$Q_s = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^N - 1} = \frac{10\text{V} - 0\text{V}}{2^8 - 1} = \frac{10}{255} \approx 0.039$$