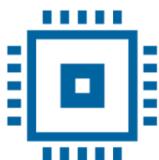


Sisteme cu MicroProcesoare

Cursul 7

Convertorul analog numeric

Conf. Gigel Măceșanu

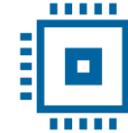


Universitatea
Transilvania
din Brașov

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ
ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR

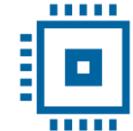


Cuprins



- Introducere
- Caracteristici de performanță
- Etapele procesului de conversie
- Modalități de implementare
- Circuitul de tip comparator
- Erori de calcul la conversia ADC
- Exemplu de implementare

Obiectivul cursului

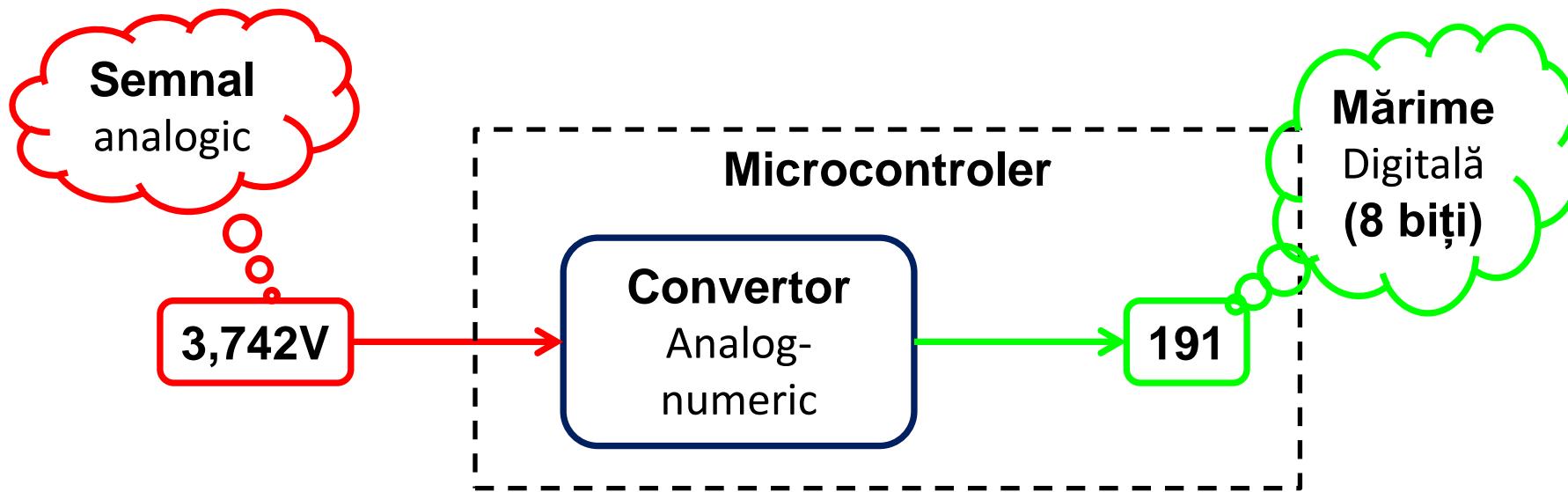


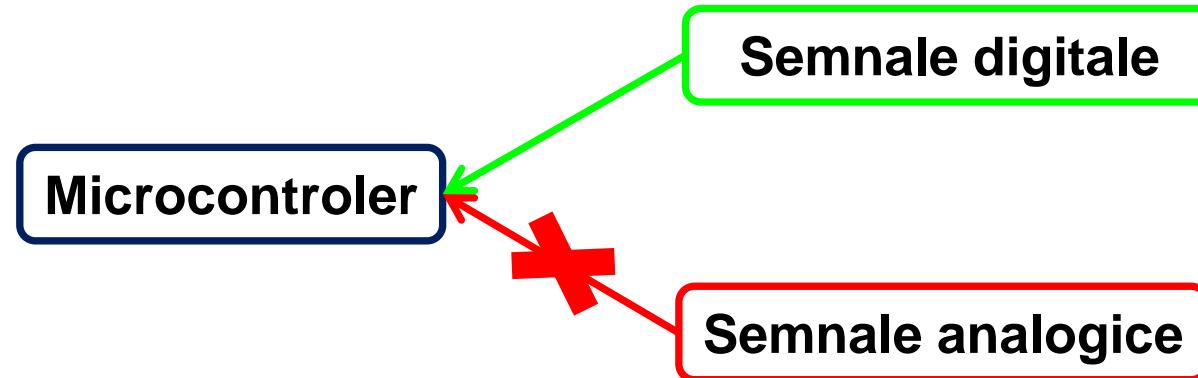
■ Înțelegerea mecanismului de funcționare și al parametrilor de performanță pentru un convertor analog numeric

- Necesitatea de a utiliza un ADC
- Înțelegerea celor trei etape principale necesare unei conversii ADC
- Prezentarea parametrilor de performanță, care influențează rezultatul unei conversii
- Tipuri de ADC
- Utilizarea în aplicații

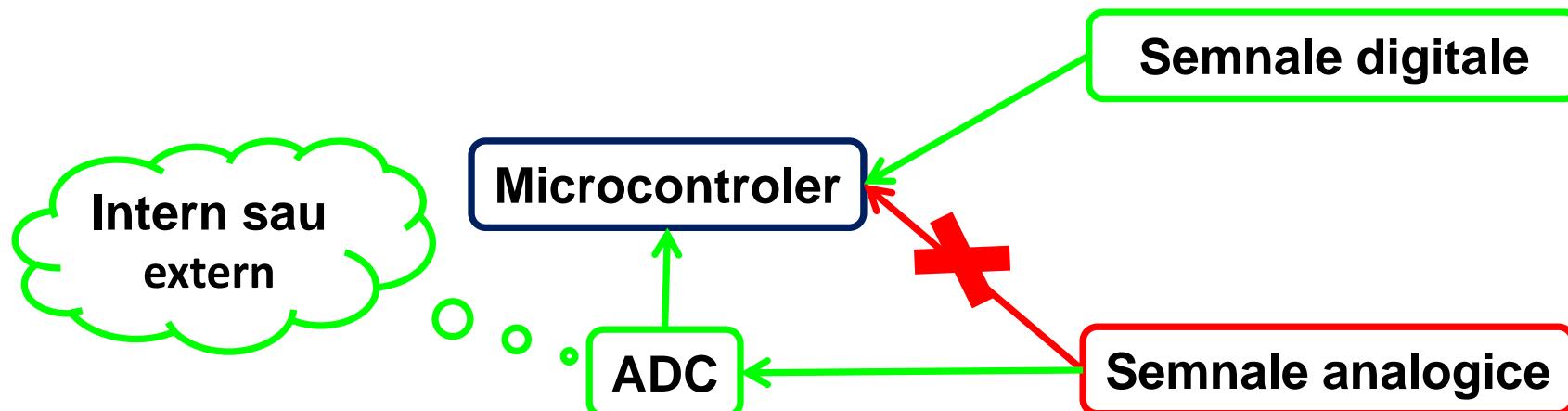


- ADC este un modul care transformă un semnal analogic (de obicei o tensiune) într-o valoare numerică pe care un microcontroler o poate interpreta și procesa
- Reprezentarea digitală poate fi interpretată de MC și utilizată în aplicații
- ADC-ul este esențial pentru integrarea senzorilor și altor dispozitive analogice în sisteme digitale

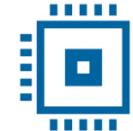




- Este necesară utilizarea unui bloc de conversia analog-numerică (ADC)



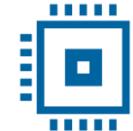
Caracteristici ale performanței unui ADC



■ Performanța unui ADC este caracterizată în principal de:

- **lățimea sa de bandă**: se referă la intervalul de frecvențe al semnalului analogic pe care ADC-ul poate să-l măsoare și să-l convertească în mod eficient, fără a introduce distorsiuni semnificative
 - Dependent de rata de eşantionare
- **raportul semnal-zgomot (SNR)**: este o măsură a calității semnalului digitalizat, exprimând raportul dintre puterea semnalului util și puterea zgomotului (sau erorilor) introduse în timpul procesului de conversie. SNR-ul este de obicei exprimat în decibeli (dB)
 - Dependent de rezoluție, cuantizare
- **timpul de conversie**: este intervalul de timp necesar pentru ca ADC-ul să convertească un singur eşantion de semnal analogic într-o valoare digitală
- **tensiunea de referință**: intervalul de tensiune pe care ADC-ul îl poate măsura
- **erori specifice de conversie**

Etapele procesului de conversie

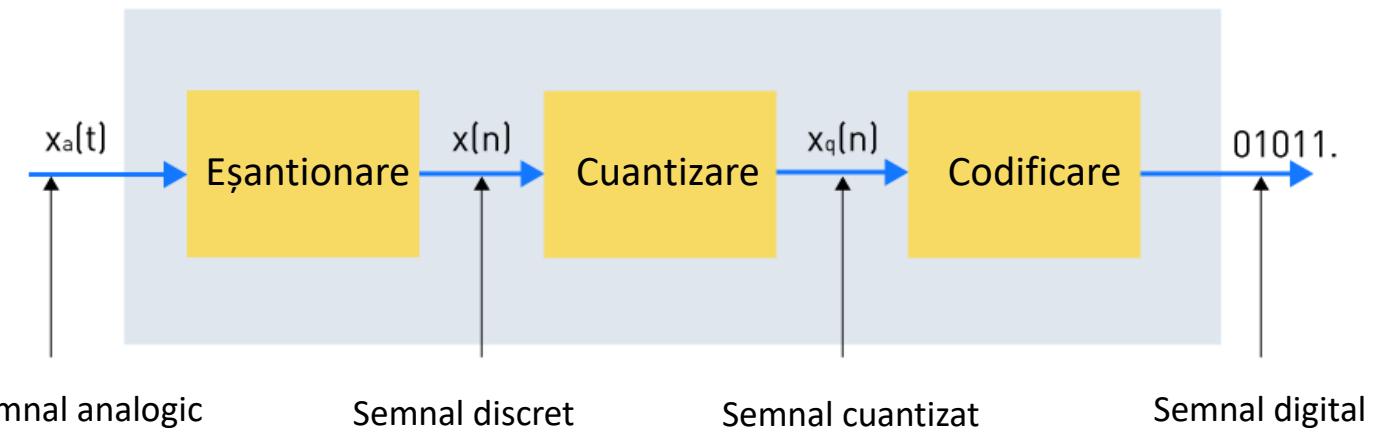


■ Procesul de conversie analog-numeric (ADC) al unui microcontroler implică mai multe etape. Trei dintre acestea sunt esențiale:

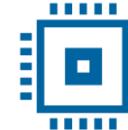
- **Eșantionare**: semnalul analogic continuu este prelevat la intervale de timp discrete
- **Cuantizare**: valoarea menținută este convertită într-o valoare digitală discretă
- **Codificare și stocare**: valoarea cuantizată este convertită în cod binar și stocată într-un registru intern

■ Cele trei etape sunt dependente de aspecte precum:

- Rată de eșantionare
- Fenomenul de aliasing
- Timpul de conversie



Etapa de eşantionare

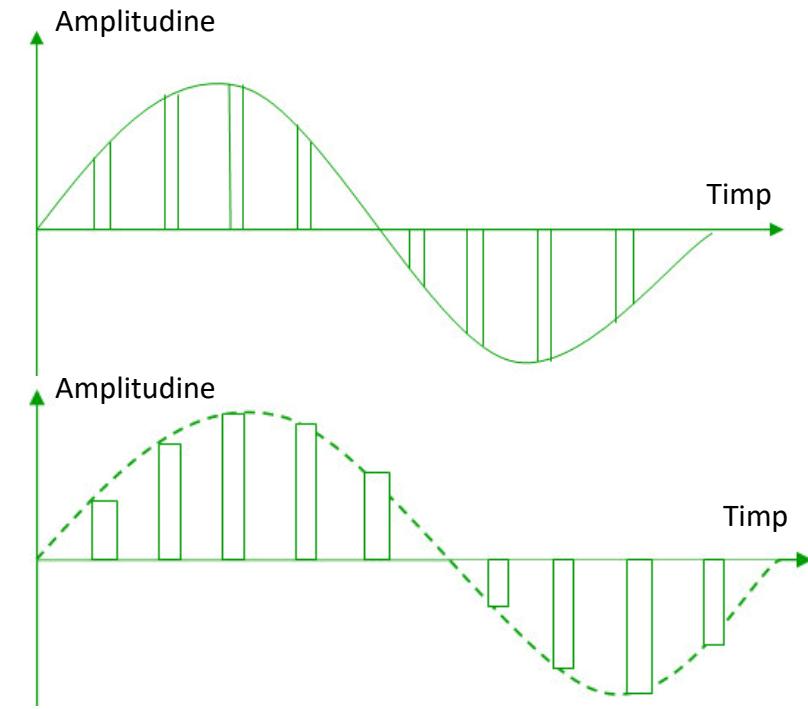


■ Procesul de eşantionare se referă la măsurarea semnalului analogic la intervale discrete de timp pentru a obține valori care pot fi ulterior cuantizate și convertite în format digital

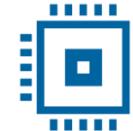
- Scopul eşantionării este de a captura valorile semnalului analogic la momente specifice, transformând semnalul continuu într-o serie de valori discrete
- Eşantionarea se face printr-un circuit de eşantionare și menținere (sample-and-hold circuit), care preia valoarea semnalului analogic și o menține constantă pentru perioada necesară conversiei.

■ Metode prin care se poate realiza:

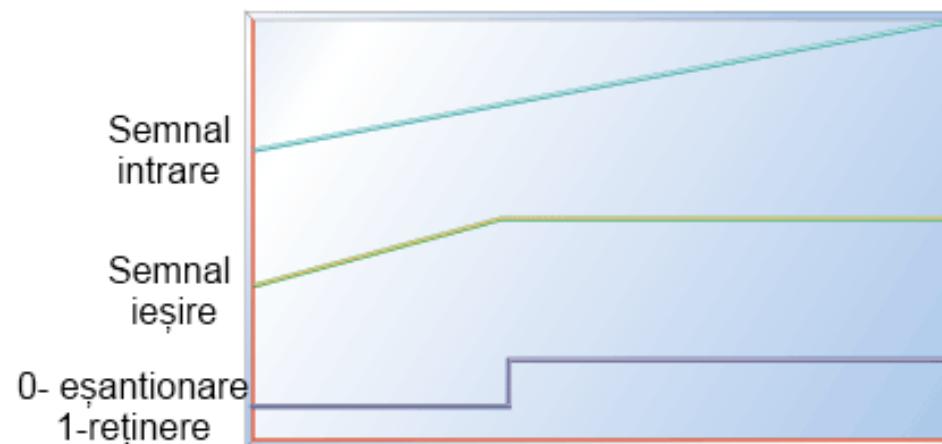
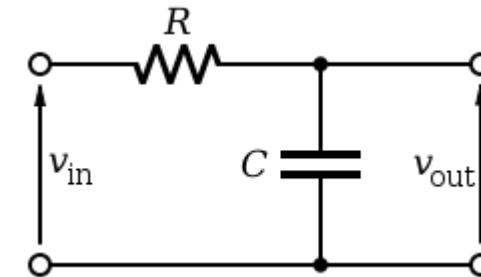
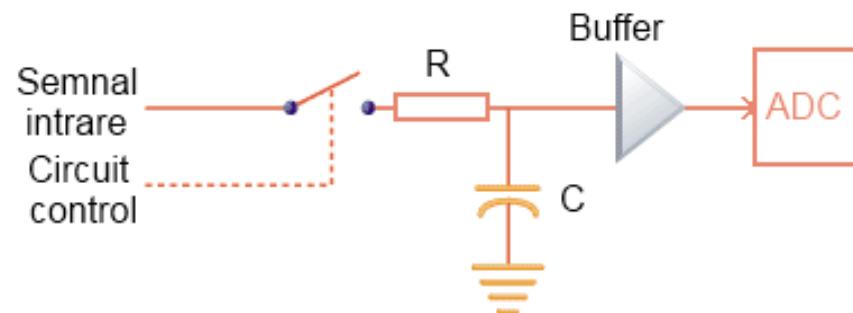
- **Eşantionare naturală:** semnalul analogic este eşantionat folosind pulsuri cu o lățime finită, egală cu intervalul de eşantionare T . În această metodă, fiecare puls de eşantionare are o formă care reflectă conturul semnalului analogic
- **Eşantionare cu vârf plat:** vârful fiecărui puls de eşantionare este plat, adică valoarea semnalului rămâne constantă la vârful fiecărui puls. Acest lucru se realizează de obicei prin utilizarea unui circuit special de menținere a eşantionului (sample-and-hold circuit).



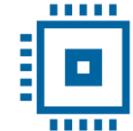
Etapa de eşantionare – reținerea



- Reținerea este procesul prin care valoarea unui eşantion este menținută constantă pe durata necesară ADC-ului să realizeze conversia în format digital, pentru a preveni deteriorarea rezultatului
- Semnalul analogic poate varia în continuare, dar circuitul de reținere asigură că ADC-ul lucrează cu o valoare fixă și stabilă în timpul conversiei
- Se poate implementa:
 - Utilizând un filtru trece jos (RC)
 - Utilizând un circuit specializat:



Rată de eșantionare



- Rata de eșantionare definește numărul de probe (eșantioane) pe care un ADC-ul le poate captura într-o anumită perioadă de timp
- Se măsoară în Hz (hertz) și este, în esență, frecvența la care semnalul analogic este preluat și convertit într-un semnal digital
- Rata de eșantionare maximă care poate fi procesată de ADC are în vedere teorema eșantionării lui Shannon (criteriul Nyquist): rata de eșantionare trebuie să fie de cel puțin două ori mai mare decât frecvența maximă a semnalului de intrare pentru a evita aliasing-ului (suprapunerea frecvențelor)

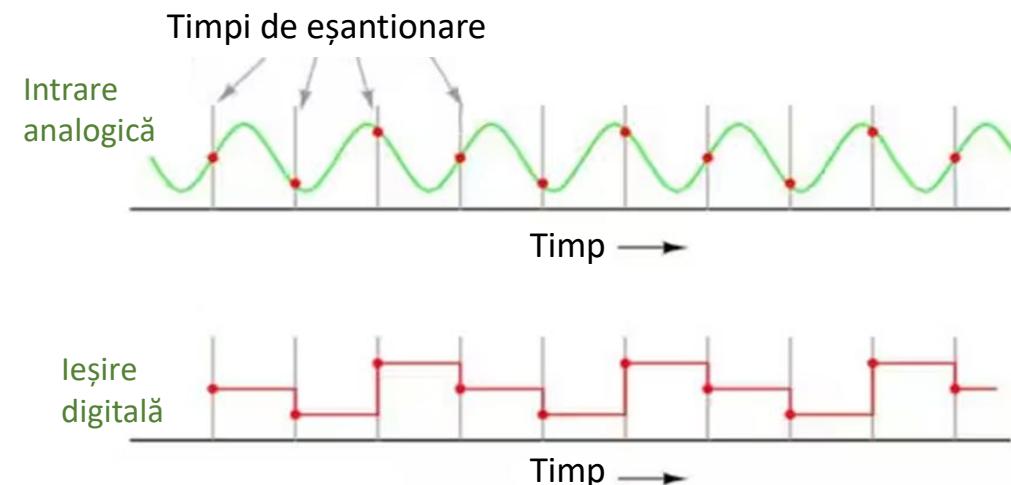
$$f_{max} < \frac{f_s}{2}$$

- f_{max} este frecvența maximă de intrare,
- f_s reprezintă frecvența de eșantionare

- Rata de eșantionare depinde de timpul de conversie: cu cât timpul de conversie este mai scurt, cu atât rata de eșantionare poate fi mai mare.
Formula generală pentru rata de eșantionare este:

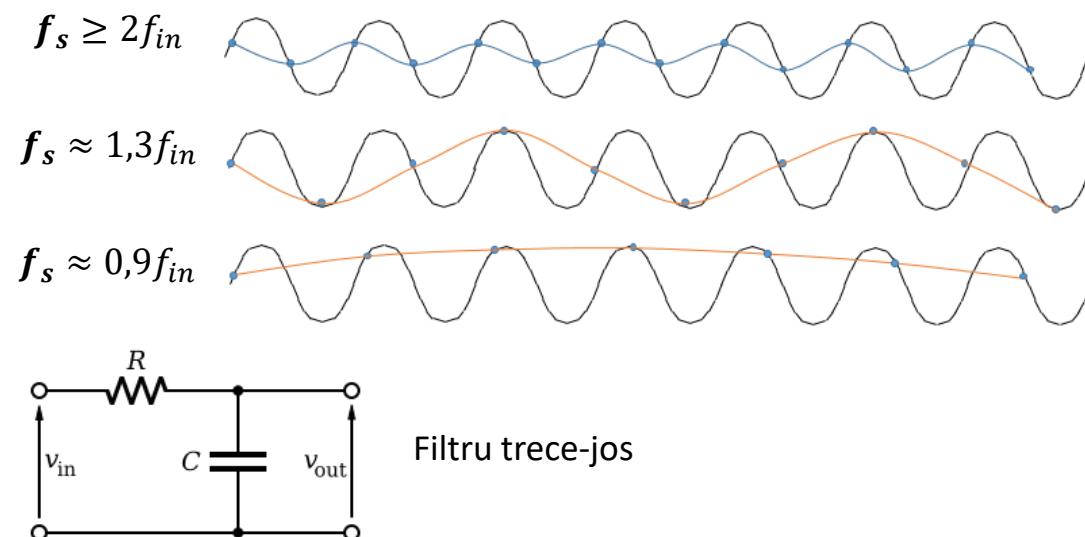
$$\text{Rata de eșantionare } (R_e) = \frac{1}{\text{Timpul de conversie } (T_c)}$$

- Relații între R_e și T_c :
 - Un timp de conversie mai mic duce la o rată de eșantionare mai mare, permitând astfel ADC-ului să preia mai multe date într-un interval de timp mai scurt.
 - Un microcontroler poate avea nevoie de o rată de eșantionare ridicată pentru a captura detaliu fine ale semnalului, cum ar fi în procesarea semnalelor audio sau în achiziția de date din senzori rapizi.

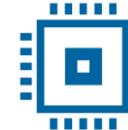


Fenomenul de aliasing

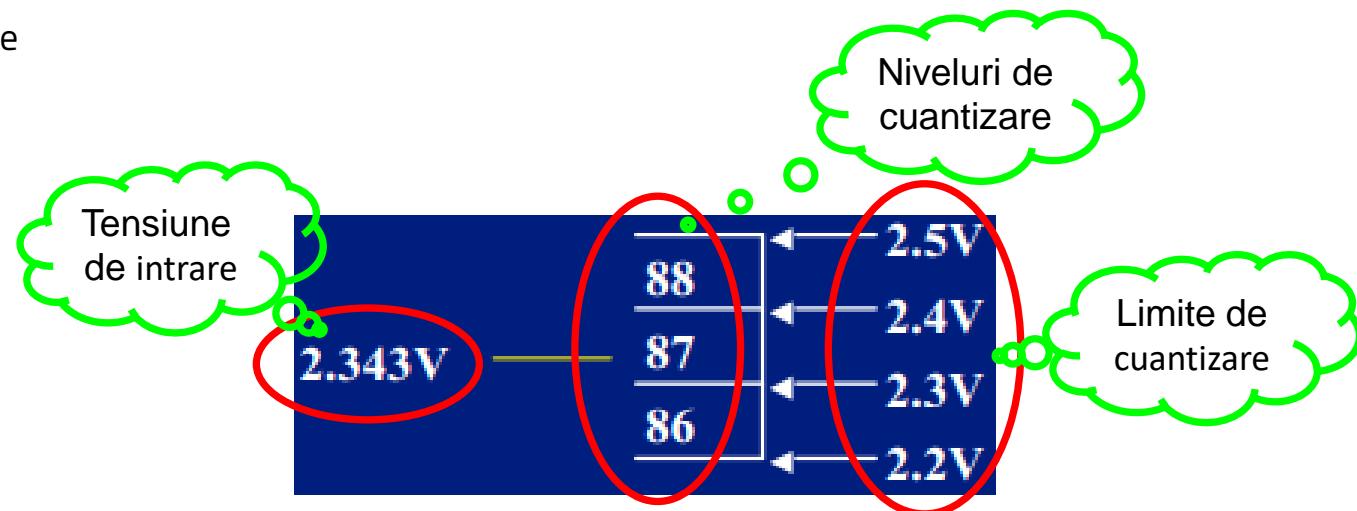
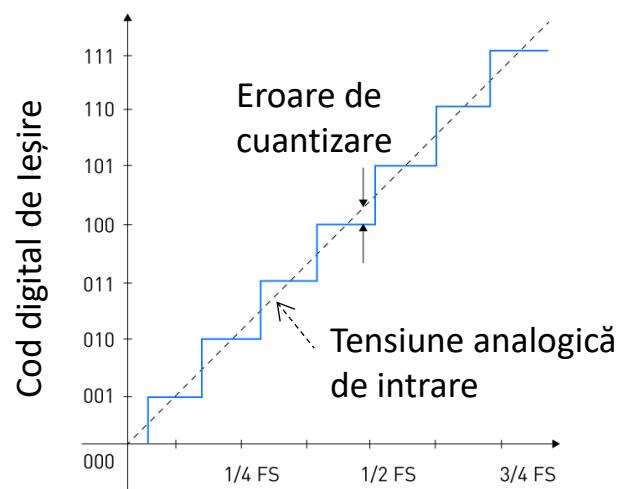
- Acest fenomen apare în momentul în care un semnal este eșantionat la o rată insuficientă, ceea ce face ca semnalele cu frecvențe înalte să fie „confundate” cu semnale cu frecvențe mai joase, ducând la o reprezentare incorectă a semnalului în domeniul digital
- Consecințe:
 - **Distorsiuni:** Semnalul digital nu mai reprezintă semnalul analogic inițial, introducând erori semnificative.
 - **Informații pierdute:** O parte din frecvențele semnalului sunt complet pierdute, fiind „comasate” cu frecvențe mai mici.
 - **Dificultăți în reconstrucția semnalului original:** Odată ce fenomenul apare, este imposibil să se recupereze informațiile originale doar din datele eșantionate.
- Metode de prevenire a acestui fenomen:
 - **Creșterea ratei de eșantionare:** Conform teoremei Nyquist, o rată de eșantionare cel puțin dublă față de frecvența maximă a semnalului
 - **Utilizarea filtrelor trece-jos:** poate fi aplicat la intrare înainte de eșantionare pentru a elimina componente de frecvență înaltă ale semnalului care ar putea provoca fenomenul de aliasing.



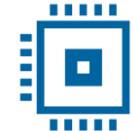
Etapa de cuantizarea



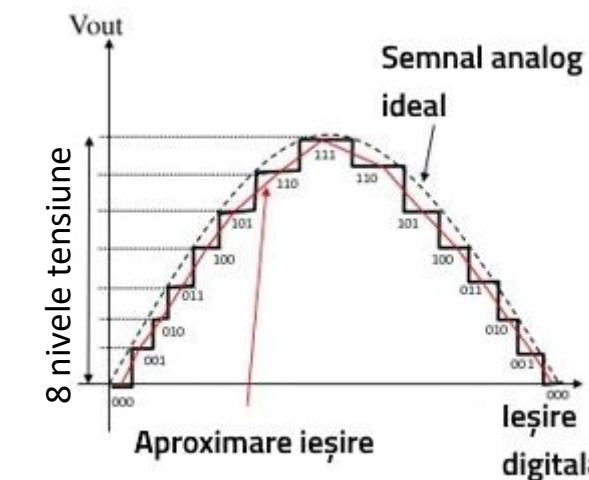
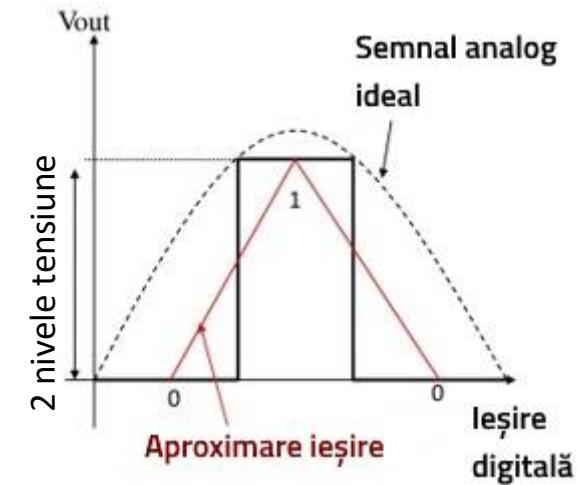
- Cuantizarea este procesul prin care valorile eșantionate ale semnalului analogic de intrare sunt mapate la nivelurile discrete disponibile
- Semnalul rezultat după conversie este o cuantizare a semnalului analogic de intrare, prin împărțirea în unități egale (increment fix)
- Etape ale procesului:
 - **Stabilirea nivelurilor de cuantizare:** în funcție de rezoluția ADC, se stabilesc numărul total de niveluri discrete în care semnalul analogic va fi reprezentat. De exemplu, un ADC de 8 biți are 256 niveluri discrete
 - **Maparea valorilor eșantionate:** Fiecare valoare eșantionată este comparată cu nivelurile discrete prestabilite. Semnalele analogice eșantionate sunt mapate la cel mai apropiat nivel de cuantizare
 - **Codificarea valorilor cuantizate:** valorile mapate sunt convertite în coduri binare care pot fi procesate digital
- Introduce eroare de cuantizare: rotunjirea mărimii de intrare



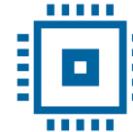
Rezoluția ADC



- Rezoluția unui ADC se referă la numărul de biți folosiți pentru a reprezenta semnalul digitalizat.
- O rezoluție mai mare permite o măsurare mai fină și mai precisă a semnalului analogic.
- De exemplu: 2^r stări posibile, r numărul de biți ai convertorului:
 - **r=8** convertorul are $2^8=256$ de stări
 - **r=10** convertorul are $2^{10}=1024$ de stări
 - **r=12** convertorul are $2^{12}=4096$ de stări
- Schimbarea de tensiune necesară pentru a garanta o modificare a nivelului codului de ieșire numește **tensiunea celui mai puțin semnificativ bit (LSB)**
 - Rezoluția Q a ADC-ului este egală cu tensiunea LSB
- Rezoluția R a unui ADC (în voltă) este determinată de intervalul maxim de măsurare a tensiunii (E_{mt}) împărțit la numărul de intervale de tensiune:
$$R = \frac{E_{mt}}{2^M - 1} \text{ voltă}$$
 - unde M este rezoluția în biți a ADC-ului iar E_{mt} este diferența dintre tensiunea maximă și tensiunea minimă pe care convertorul o poate măsura.

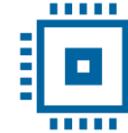


Etapa de codificare și stocare



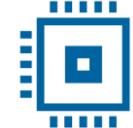
- Aceasta etapă implică codificarea și stocarea valorilor cuantizate într-o formă digitală, pentru ca acestea să poată fi procesate sau stocate de sistemul digital
- Valorile cuantizate, care sunt deja rotunjite la un anumit nivel discret, sunt convertite într-un cod binar
- Stocarea este procesul de plasare a valorilor codificate (codurile binare) într-o memorie digitală, unde pot fi accesate pentru procesare ulterioară sau păstrate pentru utilizare viitoare
- Valorile binare rezultate din procesul de codificare sunt stocate în registre, sau în memoria RAM a microcontrolerului, pentru a putea fi utilizate ulterior

Timpul de conversie



- Reprezintă intervalul de timp de la începutul conversiei până când rezultatul conversiei este disponibil
- Acest timp este critic, deoarece determină cât de repede poate răspunde sistemul la modificările semnalului de intrare
- Este dependent de:
 - Numărul de biți de rezoluție al ADC-ului (de exemplu, un ADC de 10 biți va avea nevoie de mai multe cicluri de conversie decât unul de 8 biți)
 - Tipul de ADC: influențează timpul de conversie
 - Frecvența de tact a ADC-ului (clock frequency), care afectează cât de rapid sunt procesate eșantioanele.
- Timpul de conversie poate fi scris astfel: $T_c = \tau_{ADC} \cdot r + \alpha \cdot \tau_{sistem}$
 - τ_{ADC} - perioada de conversie: timpul necesar pentru a procesa un singur bit din conversie
 - r - nr. de biți conversie: rezoluția ADC-ului, exprimată în biți
 - α - constantă: reprezinta un factor de ajustare sau corecție pentru procesul de conversie în funcție de tipul de ADC și de implementarea hardware specifică
 - τ_{sistem} perioada semnal ceas: Este perioada ciclului de ceas al sistemului, care sincronizează funcționarea ADC-ului și a întregului microcontroler

Tensiunea de referință



- Este utilizată în procesul de conversie (intervalul de conversie)
- Este exprimată prin două valori: V_{ref-} și V_{ref+}
- În general o tensiune V_{ref-} devine după conversie 0 iar V_{ref+} devine 2^{r-1} (r rezoluția)
- O mărime analogică cu valoarea de αV este convertită în digital:

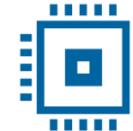
$$(2^r - 1) \cdot \frac{\alpha V}{V_{ref+} - V_{ref-}}$$

- O mărime digitală cu valoarea de α corespunde unui semnal analogic de intrare:

$$\beta V = V_{ref-} + \frac{\alpha(V_{ref+} - V_{ref-})}{2^r}$$

- Problemă: Să se verifice ce tensiune de intrare este dacă $\alpha = 100$, $r = 10$

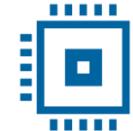
ADC- arhitecturi de implementare



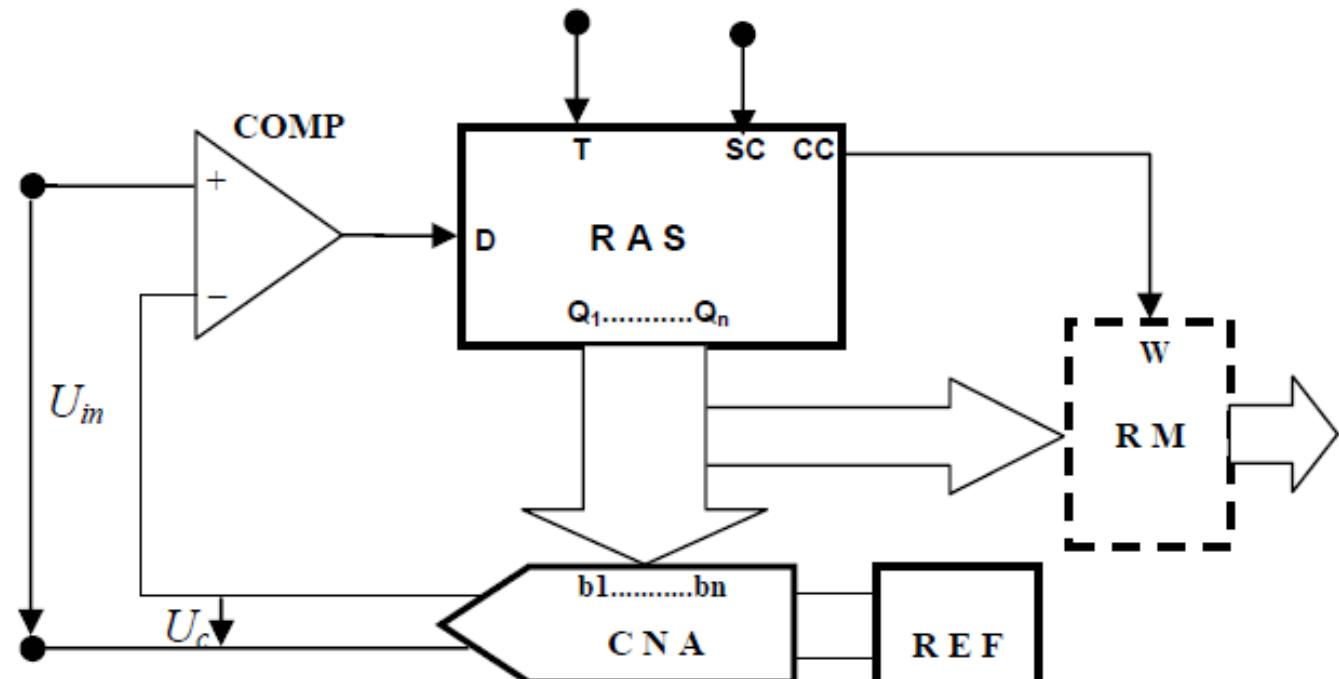
- Există mai multe tipuri de convertoare analog-digital (ADC), fiecare cu avantaje și dezavantaje în funcție de aplicație:
 - Cu aproximări succesive
 - Delta – Sigma ADC
 - Flash ADC



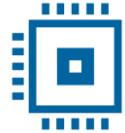
ADC cu aproximări succesive



- Funcționează pe baza unui registru de aproximare succesivă, care testează fiecare bit al codului digital începând cu cel mai semnificativ (MSB), pentru a găsi cea mai bună aproximatie a semnalului analogic
- Caracteristici:
 - Performanță bună (viteză medie-înaltă)
 - Rezoluție medie-înaltă
 - Consum redus de putere
- RAS – registru comparații succesive
- CNA – convertor analog numeric
- REF – referință ADC
- COMP – comparator
- RM – registru memorie

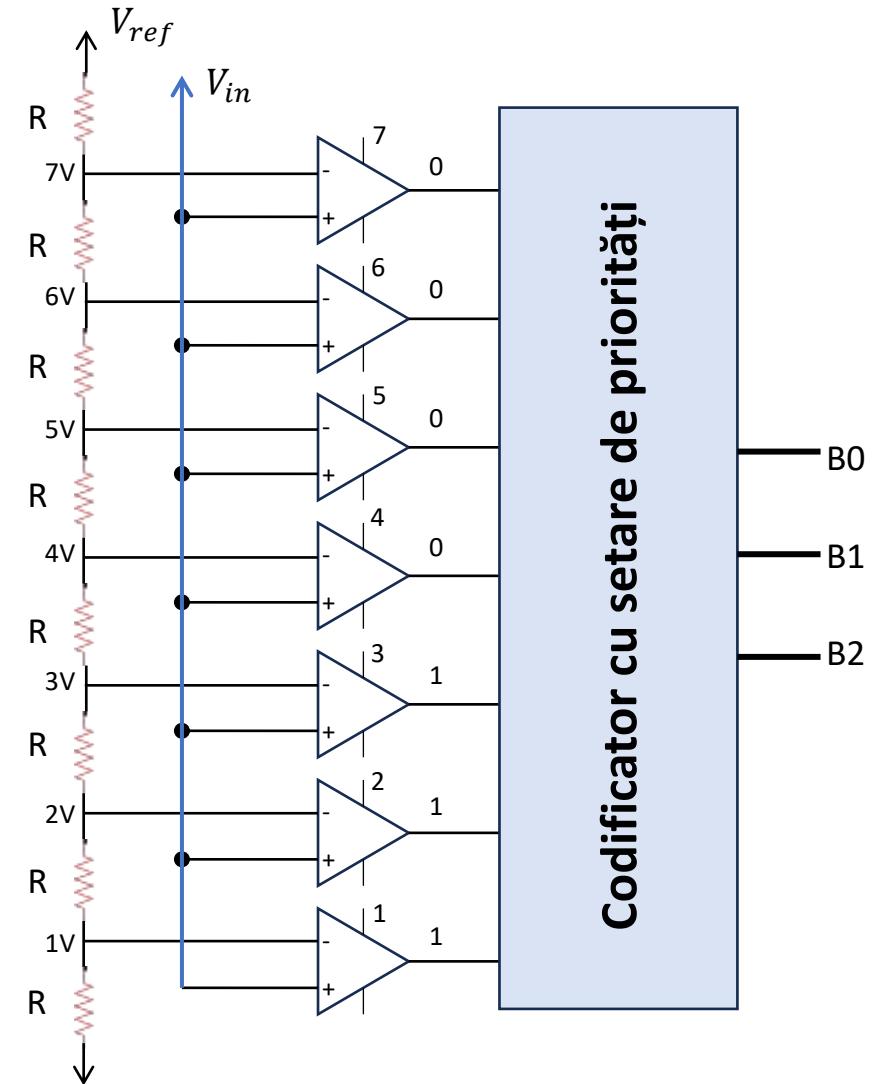


Flash ADC

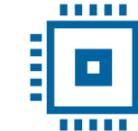


- Utilizează un set de comparatoare pentru a compara simultan semnalul de intrare cu toate valorile de referință. Fiecare comparator generează un bit în codul de ieșire
- Caracteristici:
 - Foarte rapid (cel mai rapid tip de ADC)
 - Rezoluție mică (de obicei 8 biți sau mai puțin)
 - Consum mare de putere și complexitate ridicată din cauza numărului mare de comparatoare
- Pentru un convertor de 3 biți, $V_{ref}=8$ și $V_{in}=3.3V$
 - $V_1 = \frac{R \times 8V_{ref}}{R+7R} = \frac{8V_{ref}}{8} = 1V_{ref}$ similar $V_2 = 2V_{ref}, V_3 = 3V, etc$
 - Tensiunea analogică de intrare a comparatorului se compară cu V_{in}
 - $\{V_1, V_2, V_3\} < V_{in} \rightarrow \text{comparator}_{out} = 1$
 - Pentru că trei linii de la comparatoare sunt pe 1 în același timp, prioritatea este dată celei de a treia intrare și codul binar corespunzător cifrei 3 e generat la ieșire:

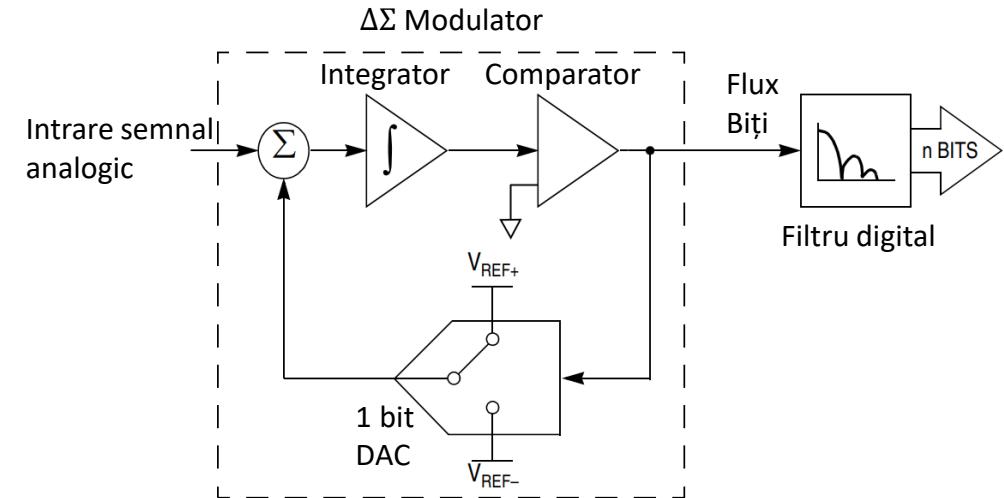
$$B_0 = 1, B_1 = 1, B_2 = 0$$



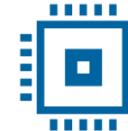
Delta – Sigma ADC



- Se bazează pe supraviețuire și filtrare digitală pentru a realiza conversia semnalului analogic într-un semnal digital de înaltă rezoluție
- Este foarte precis și este utilizat în aplicații ce necesită măsurători precise la frecvențe relativ scăzute (pot atinge rezoluții de 16, 24 sau chiar 32 de biți)
- Etape de funcționare:
 - Ieșirea unui DAC de 1b este scăzută din tensiunea de intrare
 - Tensiunea obținută este integrată și apoi comparată (obținem 1 dacă după integrare avem o valoare ≥ 0)
 - Sumatorul primește un V_{ref+} sau V_{ref-} în funcție de ieșirea comparatorului
 - Fluxul de '1' și '0' rezultat este filtrat digital pentru a produce un flux redus
- Caracteristici:
 - Rezoluție extrem de înaltă
 - Cost redus și eficiență energetică
 - Viteză mai mică: deoarece implică supraviețuire și filtrare digitală
 - Poate apărea o latență în răspunsul final de la procesul de filtrare



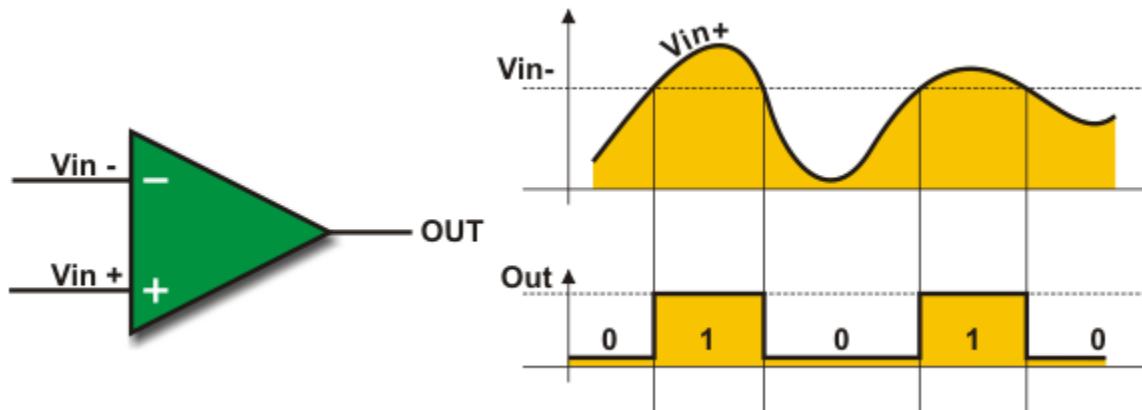
Circuit de tip comparator



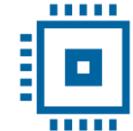
- Este un circuit electronic utilizat pentru a realiza compararea a două semnale sau un semnal și o mărime de referință
- Este alcătuit din 2 intrări analogice și o ieșire digitală

$$\begin{cases} V_{in-} > V_{in+} \text{ atunci } Out = 1 \\ V_{in-} \leq V_{in+} \text{ atunci } Out = 0 \end{cases}$$

- Semnalele de intrare: externe sau generate intern (de ex. Vin+ se poate conecta la o sursă de tensiune)
- Poate exista o întrerupere care marchează modificarea ieșirii
- Este considerat și un ADC de 1 bit



Erori de conversie

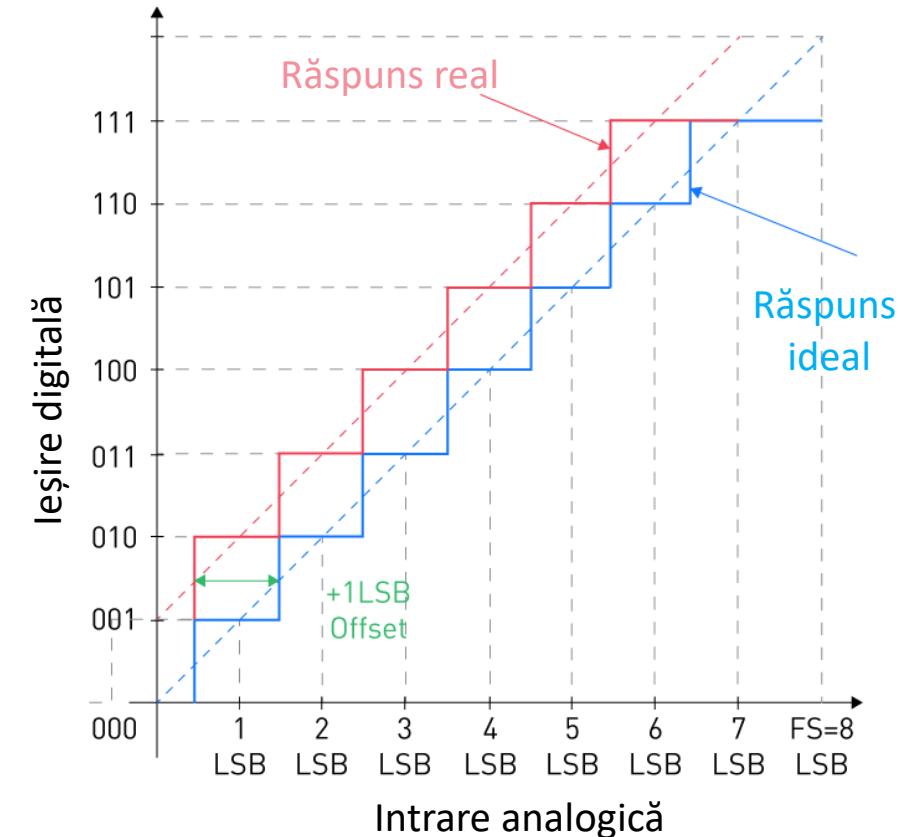


- Precizia convertoarelor analog-digital (ADC) are o importanță deosebită, deoarece stabilește cât de apropiat este rezultatul digital obținut de la un ADC față de valoarea reală a semnalului analogic de intrare
- Principalele surse de erori sunt:
 - Eroarea de offset
 - Eroarea de amplificare (Gain Error)
 - Eroarea de neliniaritate diferențială/Integrală (Differential/Integral Non-Linearity - DNL)
 - Eroarea de cuantizare (Quantization Error):
 - Apare din cauza faptului că un ADC convertește un semnal continuu într-un semnal discret, cu un număr finit de trepte (niveluri de cuantizare).
 - Diferența dintre valoarea analogică reală și valoarea digitală convertită reprezintă eroarea de cuantizare

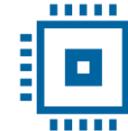
Erori de conversie

■ Eroarea de offset:

- Eroarea de offset apare atunci când ieșirea ADC nu începe de la zero pentru o intrare analogică de zero
- Această eroare poate apărea din cauza:
 - Caracteristicilor interne ale componentelor electronice din ADC, cum ar fi condensatoare, tranzistoare sau amplificatoare
 - Schimbărilor de temperatură, ce afectează unele componente
 - Variații ale tensiunii de alimentare
- Metode pentru măsurarea erorii de offset:
 - **Măsurarea directă:** Inițiază ADC-ul cu o intrare minimă (de obicei tensiune zero) și înregistrează rezultatul digital obținut. Discrepanța dintre această citire și valoarea ideală (de obicei zero) indică eroarea de offset
 - **Metoda liniei de ajustare optimă:** Utilizează un set de tensiuni de intrare cunoscute pentru ADC și construiește un grafic cu valorile de ieșire corespunzătoare

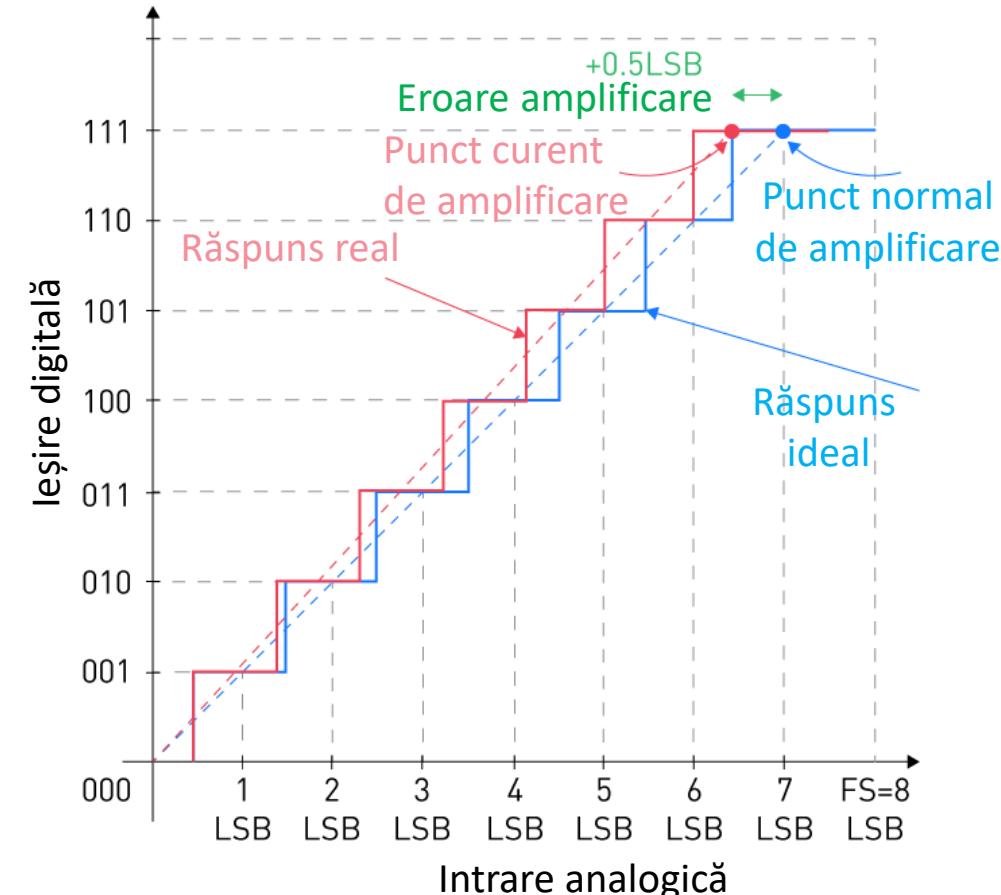


Erori de conversie



■ Eroarea de amplificare:

- Eroarea de câștig apare atunci când panta curbei de ieșire a ADC diferă de panta ideală. Chiar dacă offsetul este corect, eroarea de câștig afectează acuratețea conversiei pe toată gama de măsurători
- Această eroare poate apărea din cauza:
 - Tensiuni de referință inexacte sau de imperfecțiuni ale amplificatoarelor de intrare
 - Variații ale toleranțelor pentru condensatoare și rezistențe din ADC
- Metode pentru măsurarea erorii de amplificare:
 - **Metoda punctelor de capăt:** Această abordare presupune introducerea a două tensiuni cunoscute în ADC, una la limita inferioară a intervalului de intrare (de obicei zero) și alta la limita superioară
 - **Metoda liniei de ajustare optimă:** similar ca la offset



Erori de conversie

■ Eroarea de neliniaritate diferențială/Integrală :

- Eroarea de neliniaritate diferențială apare atunci când diferența de tensiune între două niveluri de cuantizare adiacente nu este constantă.

Se calculează cu formula:

$$DNL(n) = \frac{W(n) - 1LSB}{1LSB}, \text{ unde } W_n \text{ este lățimea codului de pe poziția } n$$

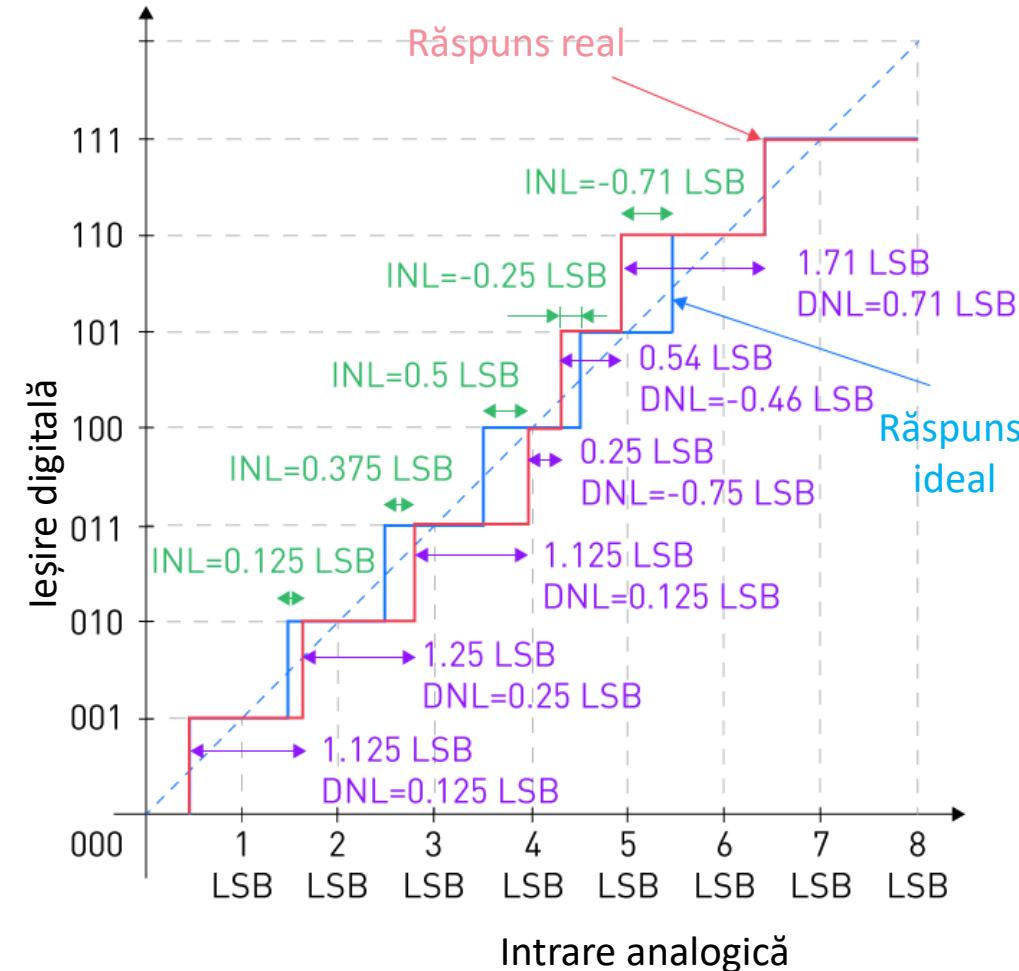
- De ex pentru codul 1 (001) avem:

$$DNL(1) = \frac{W(1) - 1LSB}{1LSB} = \frac{1.125LSB - 1LSB}{1LSB} = 0.125$$

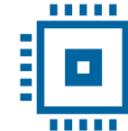
- Eroarea de neliniaritate integrală este diferența maximă dintre curba de transfer ideală și curba de transfer reală a ADC. Aceasta măsoară cât de departe este comportamentul real al ADC de la o linie dreaptă ideală. Se calculează cu formula:

$$INL(n) = \sum DNL(\overline{1, n - 1})$$

$$INL(3) = INL(1) + INL(2) = 0.125LSB + 0.25LSB = 0.375LSB$$

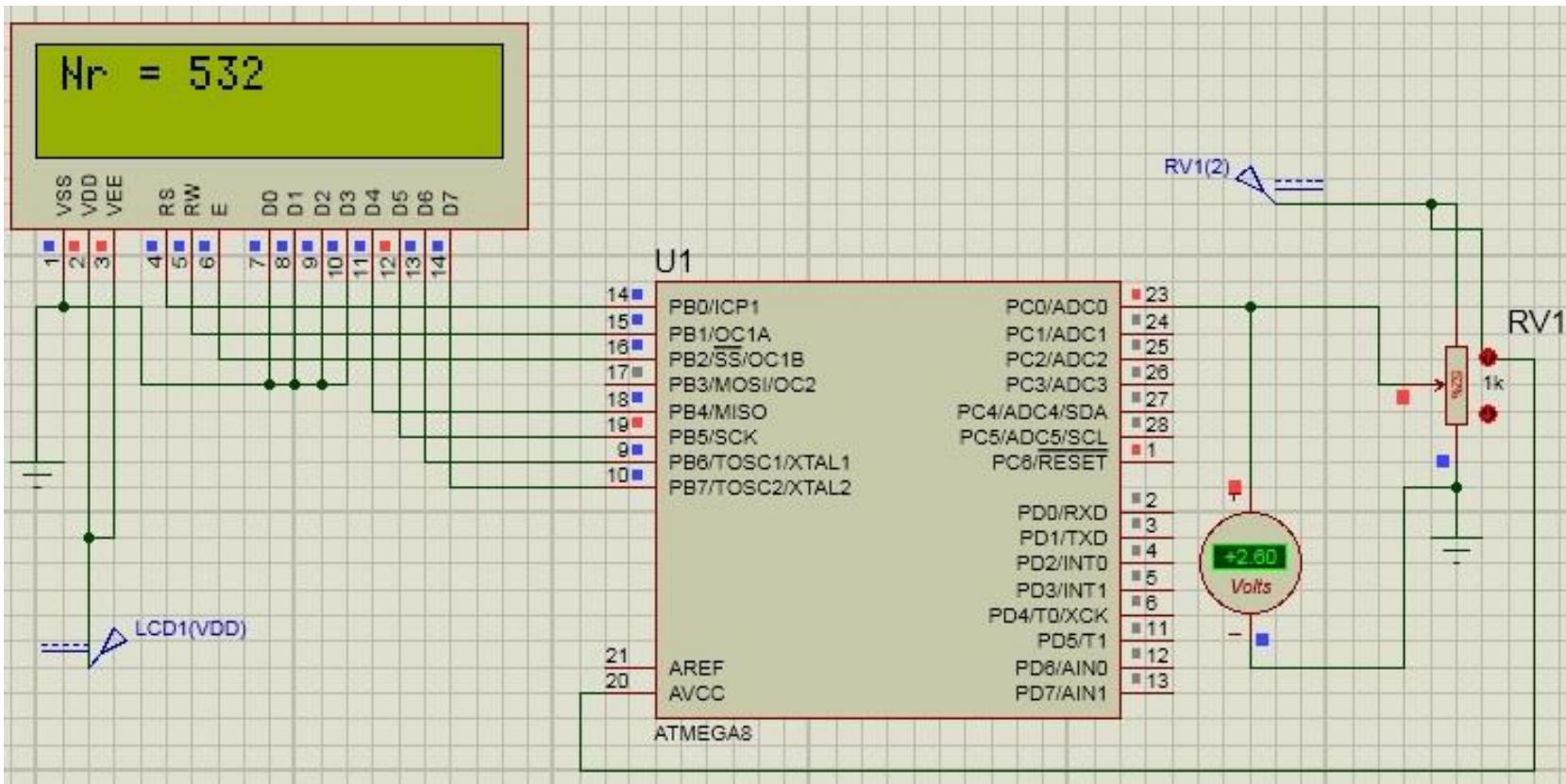


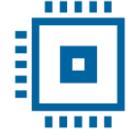
Aplicație - ADC



■ Exemplu de utilizare a unei ADC pentru citirea unei tensiuni

- Cerință: să se implementeze un program care să evidențieze modificarea tensiunii de intrare pe un pin al MC





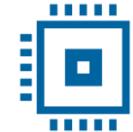
■ Setare tensiune referință

```
// Tensiunea de referință: AVcc pin
#define ADC_VREF_TYPE ((0<<REFS1) | (1<<REFS0) | (0<<ADLAR))
```

■ Definire funcție citire rezultat ADC

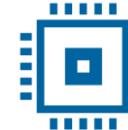
```
// Citire rezultat conversie ADC
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input) {
    ADMUX=adc_input | ADC_VREF_TYPE;
    // Delay necesar pentru stabilizarea tensiunii de intrare în ADC
    delay_us(10);
    // Start conversie ADC
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    // Așteptare finalizare conversie
    while ((ADCSRA & (1<<ADIF))==0);
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return ADCW; }
```

Concluzii



- Convertorul ADC facilitează integrarea senzorilor analogici în sisteme digitale, cum este un MC
- Pentru a se realiza citirea datelor analogice, sunt necesare 3 etape:
 - Eșantionare: semnalul analogic este salvat la intervale de timp discrete
 - Cuantizare: valoarea salvată este convertită într-o valoare digitală discretă
 - Codificare și stocare: valoarea cuantizată este convertită în cod binar și stocată intern
- Procesul de conversie se poate face cu diferite tipuri de ADC (aprox successive, flash)
- Un ADC de 1 bit este numit comparator
- Pot rezulta erori, ce se pot identifica prin diferite metode





Contact:

Email: gigel.macesanu@unitbv.ro

elearning.unitbv.ro - Sisteme cu Microprocesoare