

Sisteme cu MicroProcesoare

Cursul 7

Convertorul analog numeric

Conf. Gigel Măceșanu

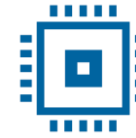


Universitatea
Transilvania
din Brașov

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ
ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR



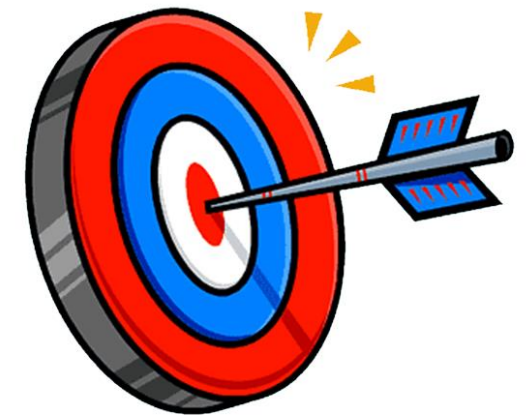
Cuprins



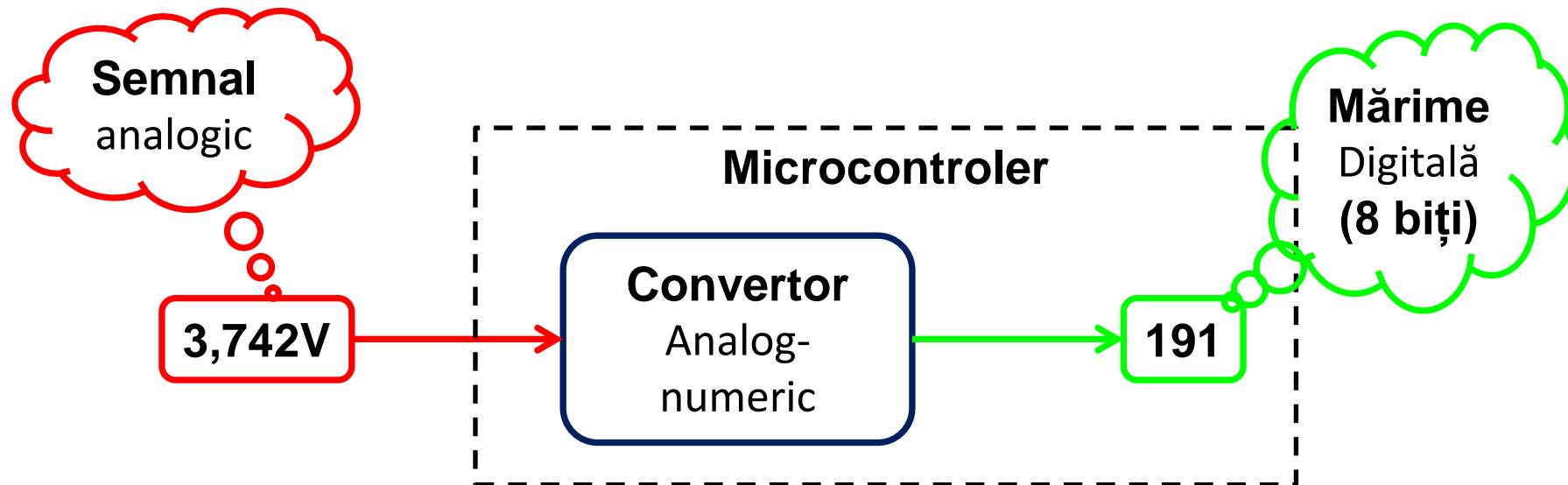
- Introducere
- Caracteristici de performanță
- Etapele procesului de conversie
- Modalități de implementare
- Circuitul de tip comparator
- Erori de calcul la conversia ADC
- Exemplu de implementare

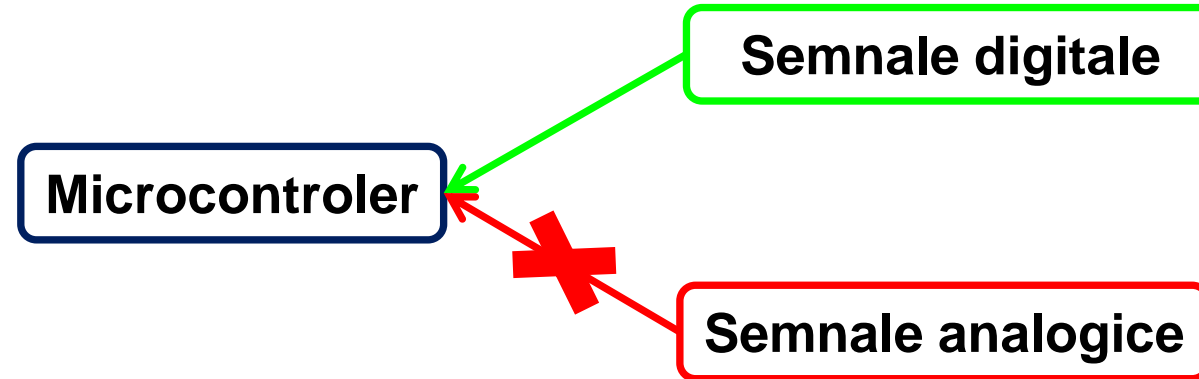
Obiectivul cursului

- Înţelegerea mecanismului de funcţionare şi al parametrilor de performanţă pentru un convertor analog numeric
 - Necesitatea de a utiliza un ADC
 - Înţelegerea celor trei etape principale necesare unei conversii ADC
 - Prezentarea parametrilor de performanţă, care influenţează rezultatul unei conversii
 - Tipuri de ADC
 - Utilizarea în aplicaţii

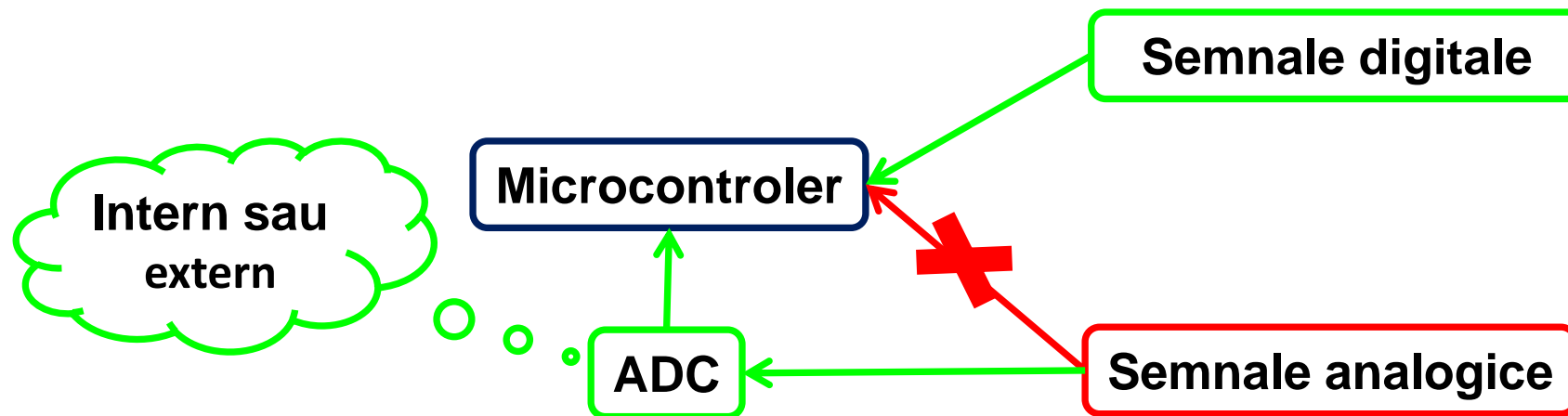


- ADC este un modul care transformă un semnal analogic (de obicei o tensiune) într-o valoare numerică pe care un microcontroler o poate interpreta şi procesa
- Reprezentarea digitală poate fi interpretată de MC şi utilizată în aplicaţii
- ADC-ul este esenţial pentru integrarea senzorilor şi altor dispozitive 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 eșantionare
- **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 eșantion de semnal analogic într-o valoare digitală
- **tensiunea de referință:** intervalul de tensiune pe care ADC-ul îl poate măsura
- **erori specifice de conversie**

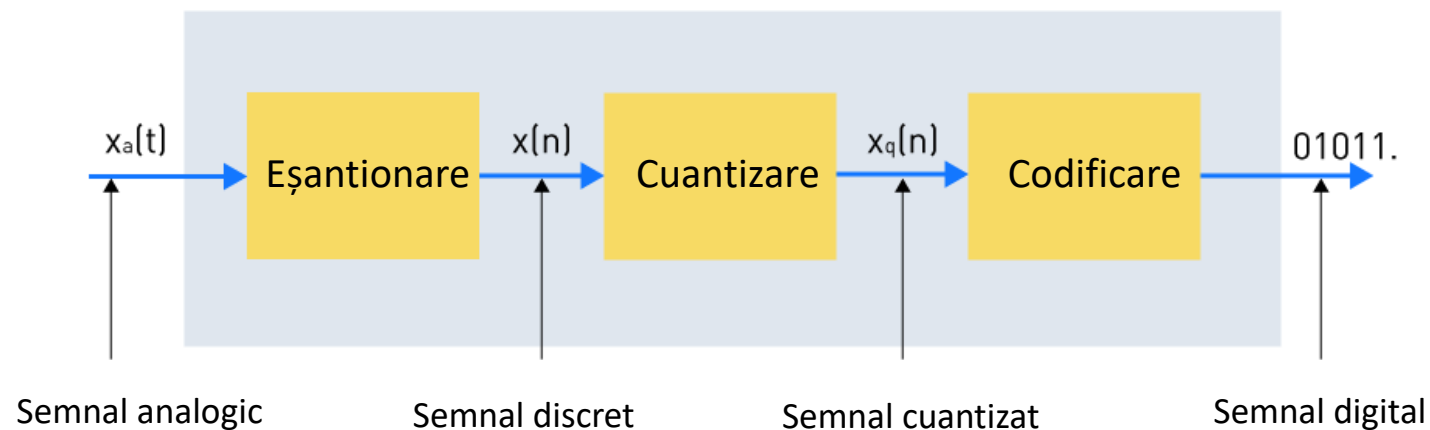
Etapele procesului de conversie

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

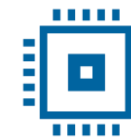
- **Eşantionare:** semnalul analogic continuu este prelevat la intervale de timp discrete
- **Cuantizare:** valoarea menţinută este convertită într-o valoare digitală discretă
- **Codificare şi stocare:** valoarea cuantizată este convertită în cod binar şi stocată într-un registru intern

■ Cele trei etape sunt dependente de aspecte precum:

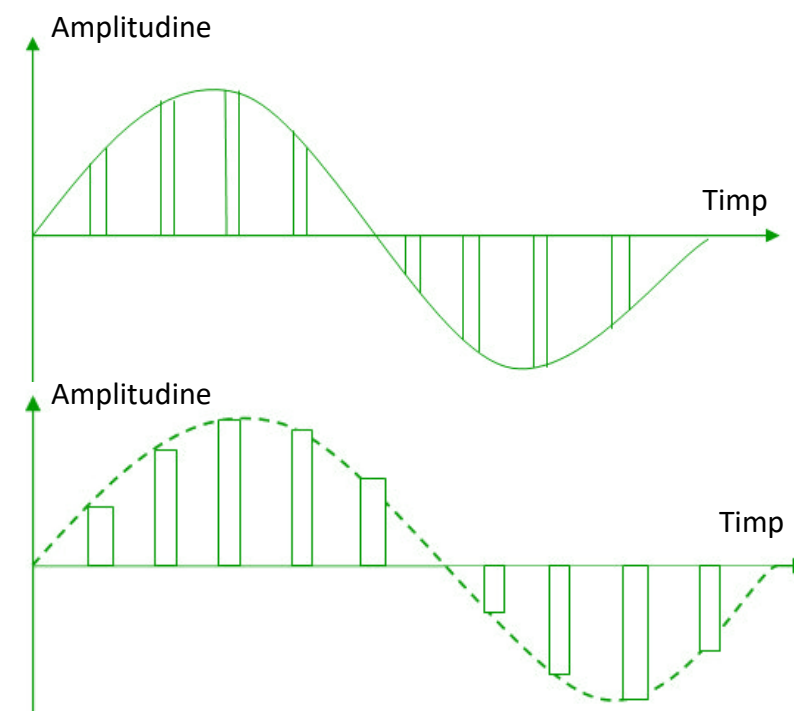
- Rată de eşantionare
- Fenomenul de aliasing
- Timpul de conversie



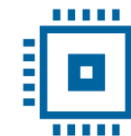
Etapa de eșantionare



- Procesul de eșantionare 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 eșantionării este de a captura valorile semnalului analogic la momente specifice, transformând semnalul continuu într-o serie de valori discrete
 - Eșantionarea se face printr-un circuit de eșantionare 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:
 - **Eșantionare naturală:** semnalul analogic este eșantionat folosind pulsuri cu o lățime finită, egală cu intervalul de eșantionare T . În această metodă, fiecare puls de eșantionare are o formă care reflectă conturul semnalului analogic
 - **Eșantionare cu vârf plat:** vârful fiecărui puls de eșantionare 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 eșantionului (sample-and-hold circuit).



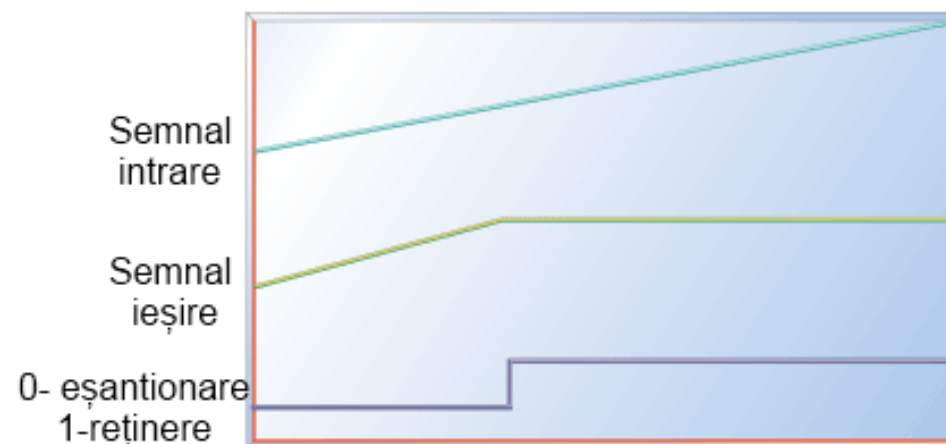
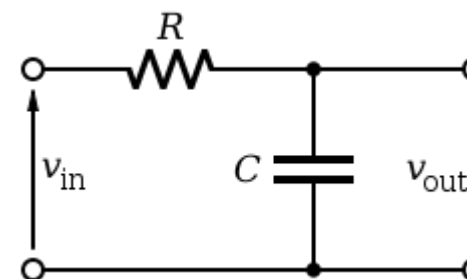
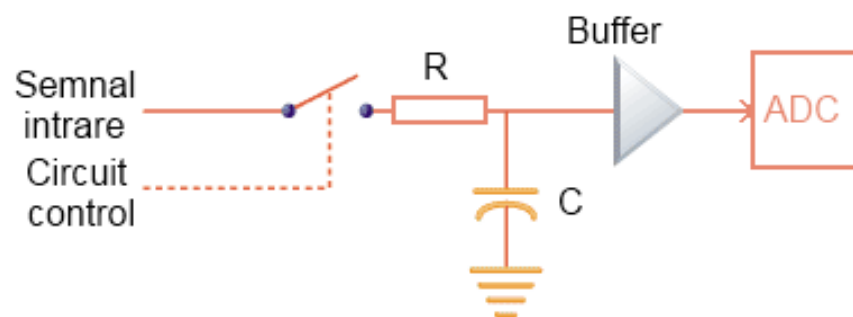
Etapa de eșantionare – reținerea



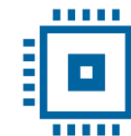
- Reținerea este procesul prin care valoarea unui eșantion este menținută constantă pe durata necesară ADC-ului să realizeze conversia în format digital, pentru a preveni deteriorarea rezultatului
- Semnalul analogic poate varia în continuare, dar circuitul de reținere asigură că ADC-ul lucrează cu o valoare fixă și stabilă în timpul conversiei

- Se poate implementa:

- Utilizând un filtru trece jos (RC)
- Utiliznd 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-ul (suprapunerea frecvențelor)

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

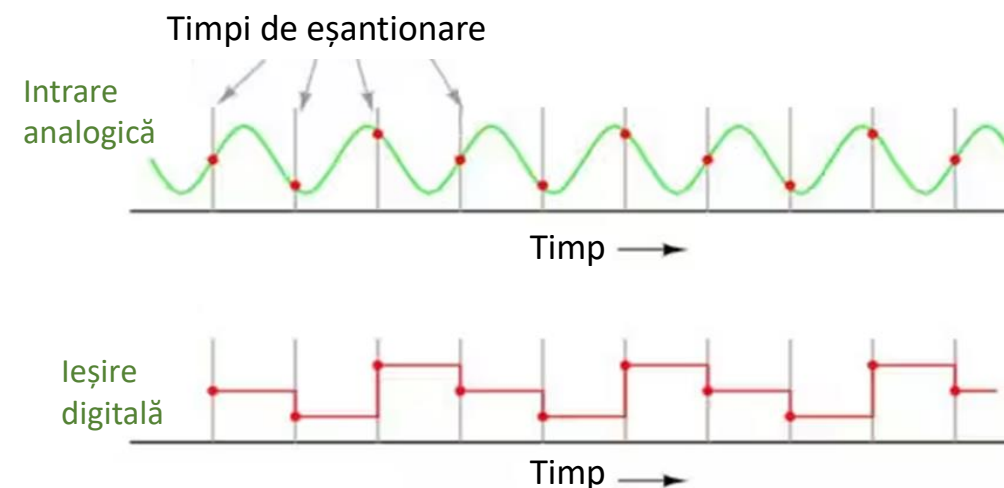
- f_{max} este frecvența maximă de intrare,
- f_s reprezintă frecvența de eșantionare

- 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:

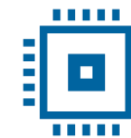
$$\text{Rata de eșantionare } (R_e) = \frac{1}{\text{Timpul de conversie } (T_c)}$$

- Relații între R_e și T_c :

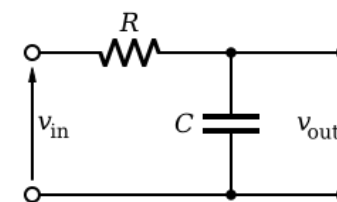
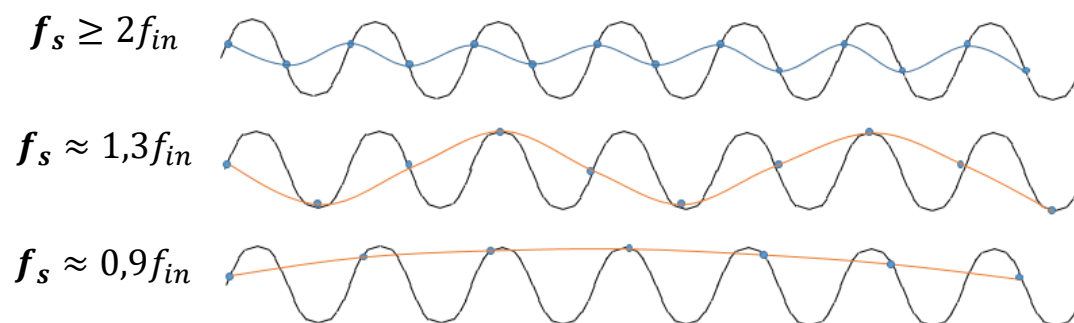
- Un timp de conversie mai mic duce la o rată de eșantionare mai mare, permițând astfel ADC-ului să preia mai multe date într-un interval de timp mai scurt.
- Un microcontroler poate avea nevoie de o rată de eșantionare ridicată pentru a captura detalii fine ale semnalului, cum ar fi în procesarea semnalelor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



Fenomenul de aliasing



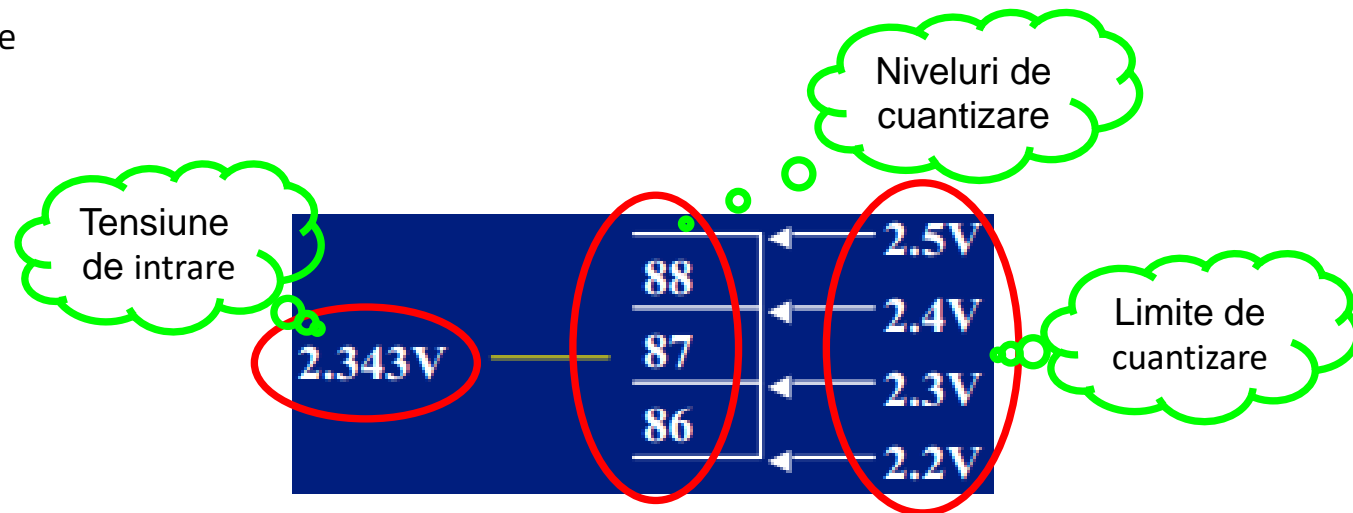
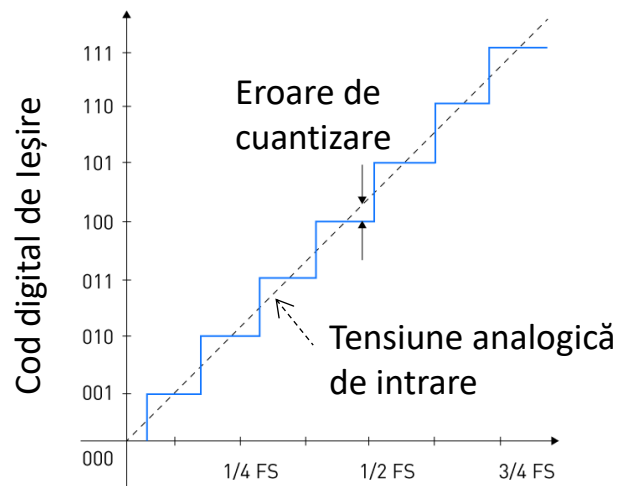
- Acest fenomen apare în momentul în care un semnal este eșantionat la o rată insuficientă, ceea ce face ca semnalele cu frecvențe înalte să fie „confundate” cu semnale cu frecvențe mai joase, ducând la o reprezentare incorectă a semnalului în domeniul digital
- Consecințe:
 - **Distorsiuni:** Semnalul 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 componentele de frecvență înaltă ale semnalului care ar putea provoca fenomenul de aliasing.



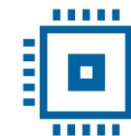
Filtru trece-jos

Etapa de cuantizarea

- Cuantizarea este procesul prin care valorile eşantionate ale semnalului analogic de intrare sunt mapate la nivelurile discrete disponibile
- Semnalul rezultat după conversie este o cuantizare a semnalului analogic de intrare, prin împărţirea în unităţi egale (increment fix)
- Etape ale procesului:
 - **Stabilirea nivelurilor de cuantizare:** în funcţie de rezoluţia ADC, se stabilesc numărul total de niveluri discrete în care semnalul analogic va fi reprezentat. De exemplu, un ADC de 8 biţi are 256 niveluri discrete
 - **Maparea valorilor eşantionate:** Fiecare valoare eşantionată este comparată cu nivelurile discrete prestabilite. Semnalele analogice eşantionate 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



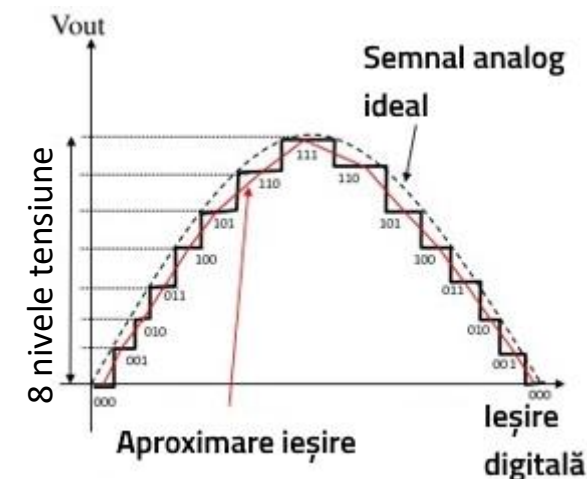
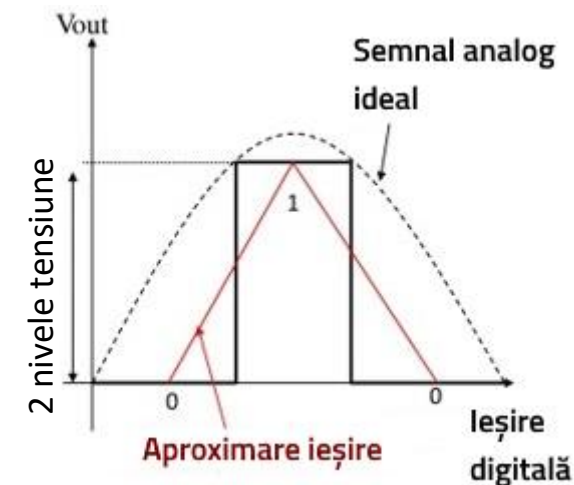
Rezoluția ADC



- 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 volți) este determinată de intervalul maxim de măsurare a tensiunii (E_{mt}) împărțit la numărul de intervale de tensiune:

$$R = \frac{E_{mt}}{2^M - 1} \text{ volți}$$

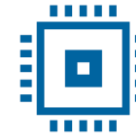
- unde M este rezoluția în biți a ADC-ului iar E_{mt} este diferența dintre tensiunea maximă și tensiunea minimă pe care convertorul o poate măsura.



Etapa de codificare și stocare

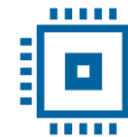
- Aceasta etapă implică codificarea și stocarea valorilor cuantizate într-o formă digitală, pentru ca acestea să poată fi procesate sau stocate de sistemul digital
- Valorile cuantizate, care sunt deja rotunjite la un anumit nivel discret, sunt convertite într-un cod binar
- Stocarea este procesul de 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: reprezenta 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 $\alpha = 100$, $r = 10$

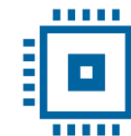
ADC- arhitecturi de implementare

■ Există mai multe tipuri de convertoare analog-digital (ADC), fiecare cu avantaje şi dezavantaje în funcţie de aplicaţie:

- 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 aproximație a semnalului analogic

- Caracteristici:

- Performanță bună (viteză medie-înaltă)
- Rezoluție medie-înaltă
- Consum redus de putere

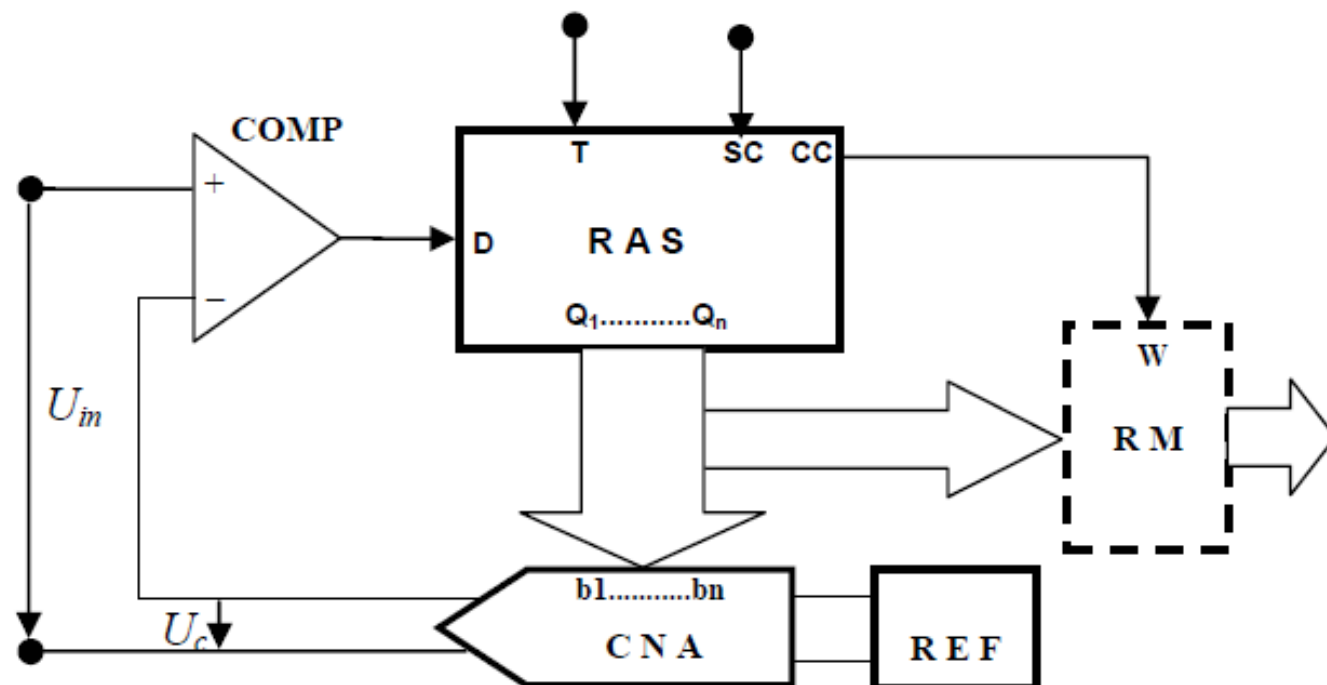
■ RAS – registru comparații succesive

■ CNA – convertor analog numeric

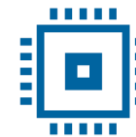
■ REF – referință ADC

■ COMP – comparator

■ RM – registru memorie

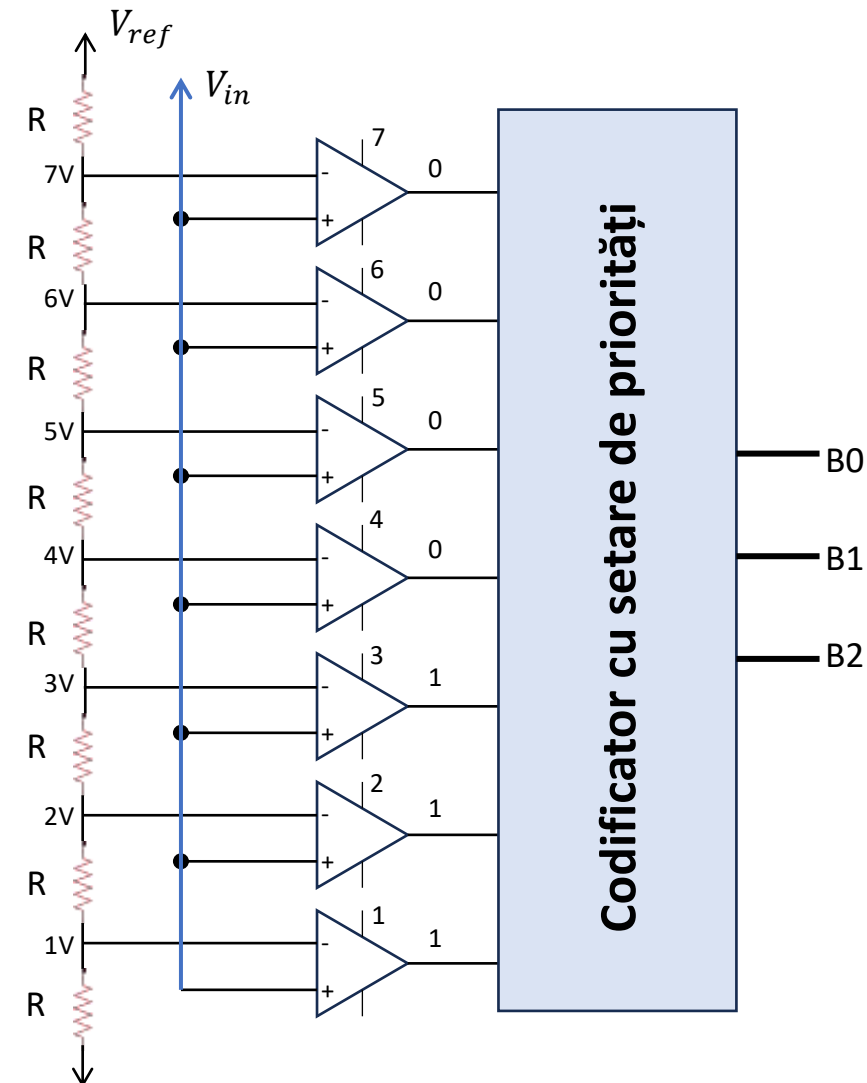


Flash ADC

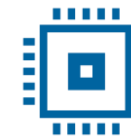


- Utilizează un set de comparatoare pentru a compara simultan semnalul de intrare cu toate valorile de referință. Fiecare comparator generează un bit în codul de ieșire
- Caracteristici:
 - Foarte rapid (cel mai rapid tip de ADC)
 - Rezoluție mică (de obicei 8 biți sau mai puțin)
 - Consum mare de putere 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}
 - $\{V_1, V_2, V_3\} < V_{in} \rightarrow comparator_{out} = 1$
 - 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:

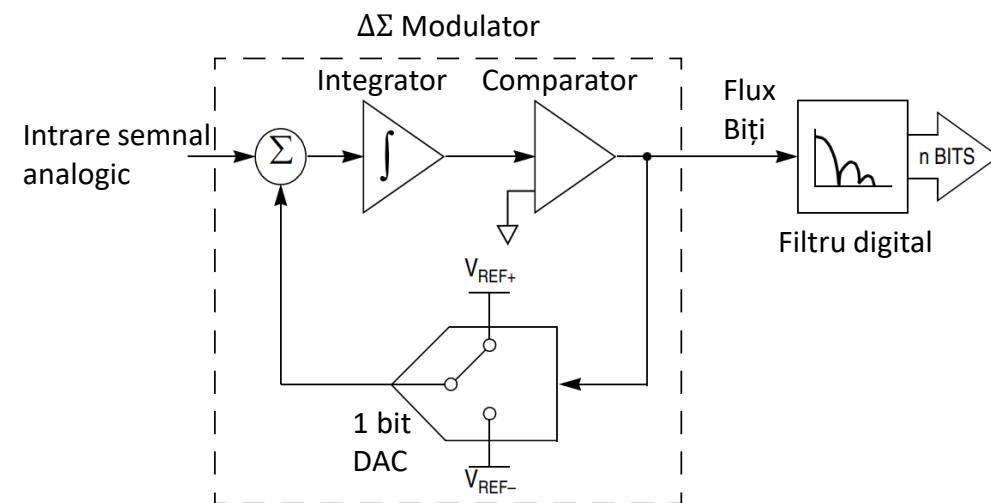
$$B_0 = 1, B_1 = 1, B_2 = 0$$



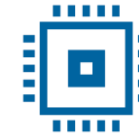
Delta – Sigma ADC



- Se bazează pe supraeșantionare 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 supraeșantionare și filtrare digitală
 - Poate apărea o latență în răspunsul final de la procesul de filtrare



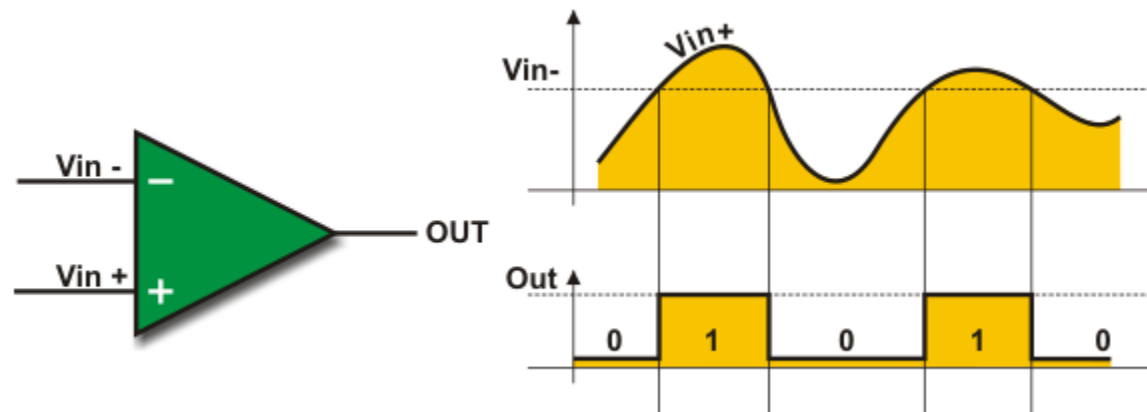
Circuit de tip comparator



- 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

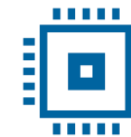
$$\begin{cases} V_{in-} > V_{in+} \text{ atunci } \mathbf{Out} = 1 \\ V_{in-} \leq V_{in+} \text{ atunci } \mathbf{Out} = 0 \end{cases}$$

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



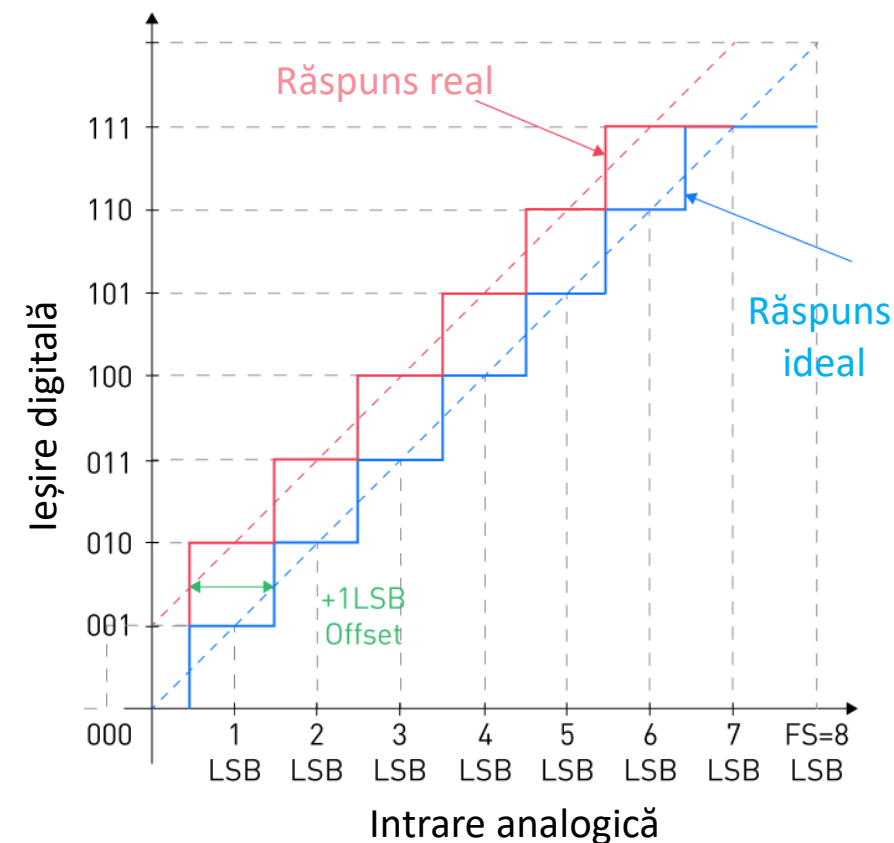
- Precizia convertoarelor analog-digital (ADC) are o importanță deosebită, deoarece stabilește cât de apropiat este rezultatul digital obținut de la un ADC față de valoarea reală a semnalului analogic de intrare
- Principalele surse de erori sunt:
 - Eroarea de offset
 - Eroarea de amplificare (Gain 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

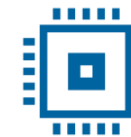


■ Eroarea de offset:

- 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, tranzistoarele sau amplificatoarele
 - 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

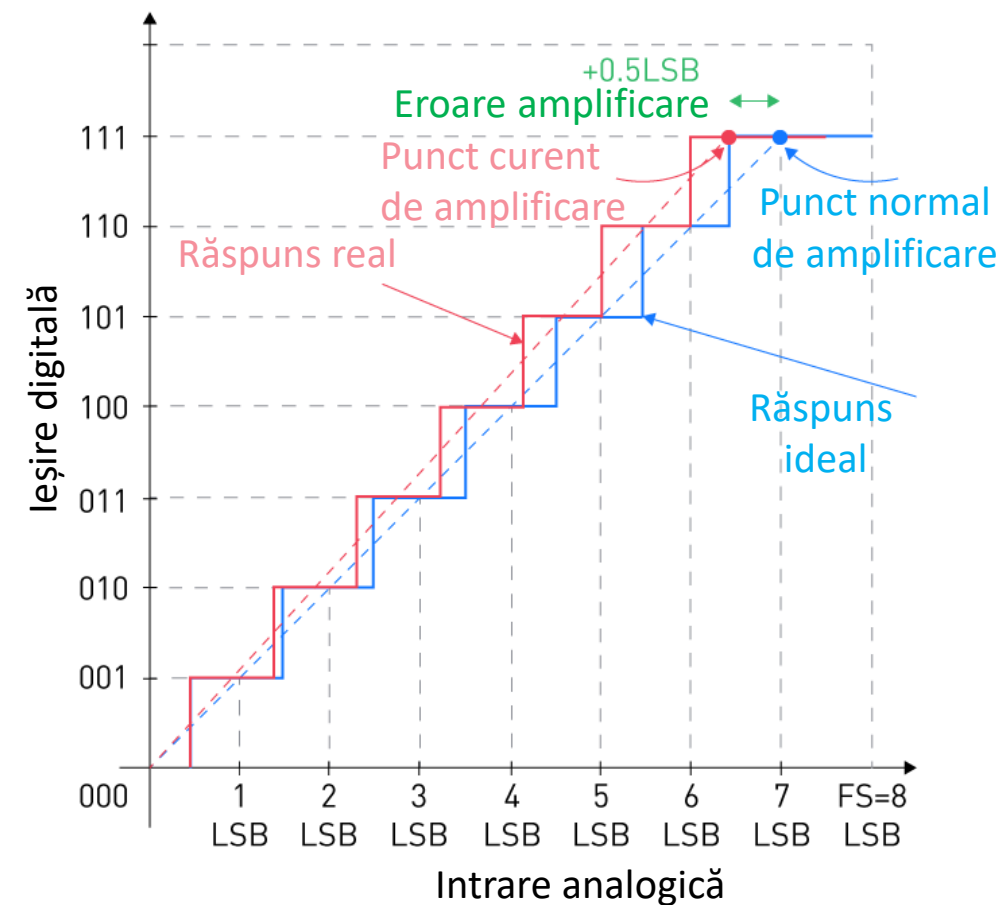


Erori de conversie

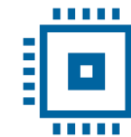


■ Eroarea de amplificare:

- Eroarea de câştig apare atunci când panta curbei de ieşire a ADC diferă de panta ideală. Chiar dacă offsetul este corect, eroarea de câştig afectează acurateţea conversiei pe toată gama de măsurători
- Această eroare poate apărea din cauza:
 - Tensiuni de referinţă inexacte sau de imperfecţiuni ale amplificatoarelor de intrare
 - Variaţii ale toleranţelor pentru condensatoare şi rezistenţe 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) şi 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:

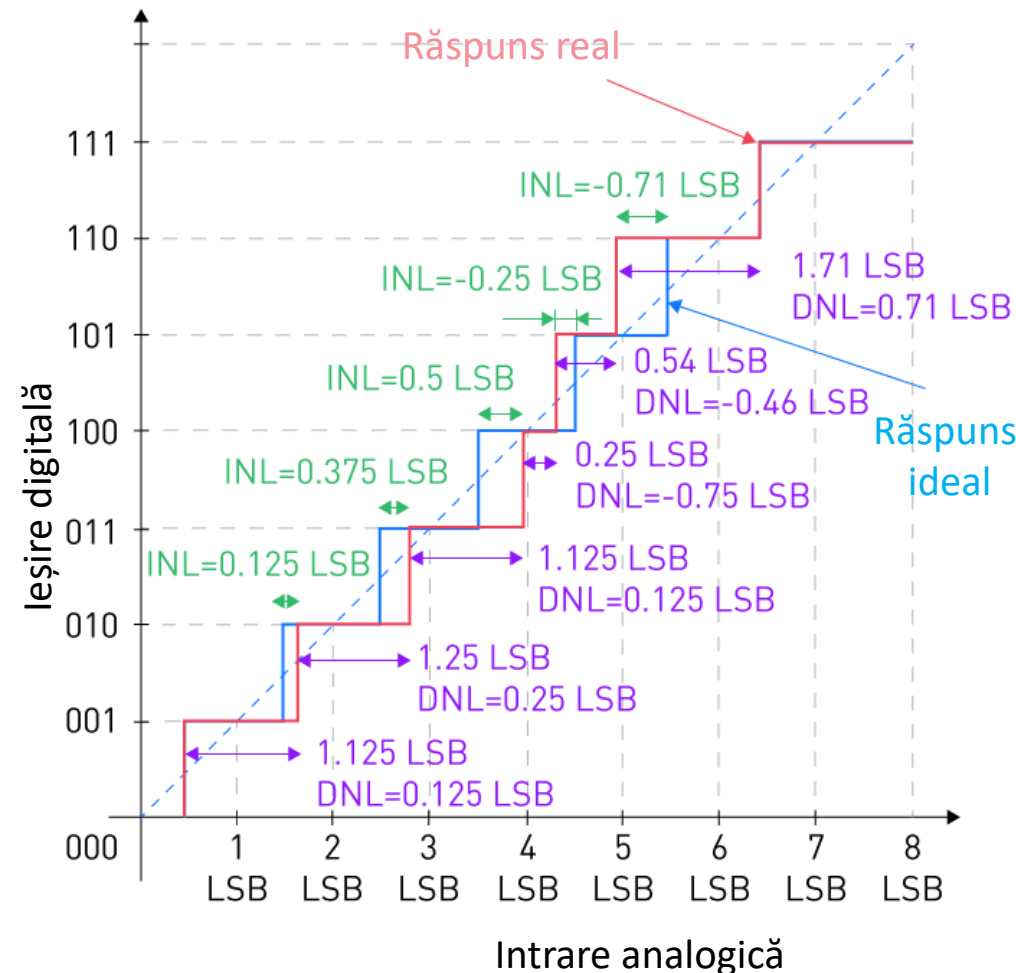
- $DNL(n) = \frac{W(n) - 1LSB}{1LSB}$, unde W_n este lățimea codului de pe poziția n

- De ex pentru codul 1 (001) avem:

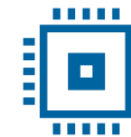
$$DNL(1) = \frac{W(1) - 1LSB}{1LSB} = \frac{1.125LSB - 1LSB}{1LSB} = 0.125$$

- Eroarea de neliniaritate integrala 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:

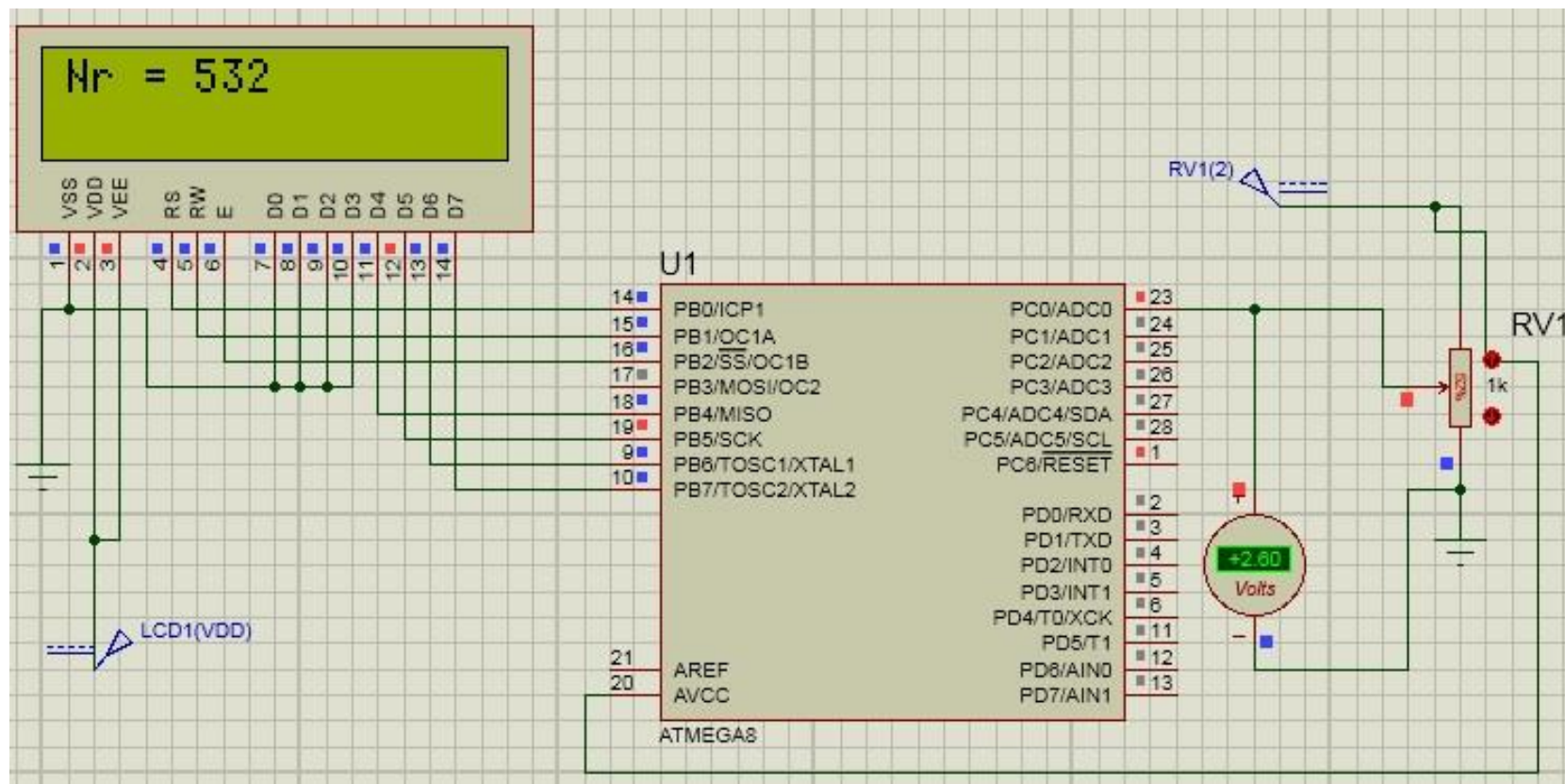
- $INL(n) = \sum DNL(\overline{1, n-1})$
- $INL(3) = INL(1) + INL(2) = 0.125LSB + 0.25LSB = 0.375LSB$



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))
```

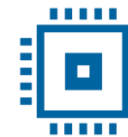
■ Definire funcție citire rezultat ADC

```
// 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:
 - Eşantionare: semnalul analogic este salvat la intervale de timp discrete
 - Cuantizare: valoarea salvată este convertită într-o valoare digitală discretă
 - Codificare şi stocare: valoarea cuantizată este convertită în cod binar şi stocată intern
- Procesul de conversie se poate face cu diferite tipuri de ADC (aprox succesive, 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