

§ 2. Conversoare numeric-analogice

§ 2.1. Codificarea binară a numerelor

- Semnalul de intrare a unui convertor numeric-analogic (CNA) constă dintr-o secvență de variabile binare (biți) b_1, b_2, \dots, b_n , în care:

b_1 este bitul cel mai semnificativ (MSB – Most Significant Bit),

b_n este bitul cel mai puțin semnificativ (LSB – Least Significant Bit).

□ Coduri unipolare

- Valoarea zecimală a secvenței binare b_1, b_2, \dots, b_n corespunzătoare **codificării fracționale (CF)** este:

$$D_{CF} = \sum_{k=1}^n b_k 2^{-k}$$

Valoarea maximă pentru D_{CF} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 1 și este egală cu $1 - 2^{-n}$.

Valoarea minimă pentru D_{CF} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 0 și este egală cu 0.

- Valoarea zecimală a secvenței binare b_1, b_2, \dots, b_n corespunzătoare **codului binar natural (CBN)** este:

$$D_{CBN} = \sum_{k=1}^n b_k 2^{n-k}$$

Valoarea maximă pentru D_{CBN} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 1 și este egală cu $2^n - 1$.

Valoarea minimă pentru D_{CBN} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 0 și este egală cu 0.

- **Observație:** Codurile fracționar și binar natural sunt coduri unipolare, servind la reprezentarea semnalelor de o singură polaritate (semnale pozitive sau semnale negative).

- Valoarea zecimală a secvenței binare b_1, b_2, \dots, b_n corespunzătoare **codului binar deplasat (CBD)** este:

$$D_{CBD} = \sum_{k=1}^n b_k 2^{n-k} - 2^{n-1} = D_{CBN} - 2^{n-1}$$

Valoarea maximă pentru D_{CBD} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 1 și este egală cu $2^{n-1} - 1$.

Valoarea minimă pentru D_{CBD} se obține când toți biții b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt egali cu 0 și este egală cu -2^{n-1} .

- Valoarea zecimală a secvenței binare b_1, b_2, \dots, b_n corespunzătoare **codului complement a lui doi (CCD)** este:

$$\begin{aligned}
 D_{CCD} &= \sum_{k=2}^n b_k 2^{n-k} + \bar{b}_1 2^{n-1} - 2^{n-1} = \sum_{k=2}^n b_k 2^{n-k} + (1-b_1)2^{n-1} - 2^{n-1} \\
 &= \sum_{k=1}^n b_k 2^{n-k} - 2b_1 2^{n-1} = D_{CBN} - b_1 2^n
 \end{aligned}$$

Valoarea maximă pentru D_{CCD} se obține când $b_1 = 0, b_2 = b_3 = \dots b_n = 1$ și este egală cu $2^{n-1} - 1$.

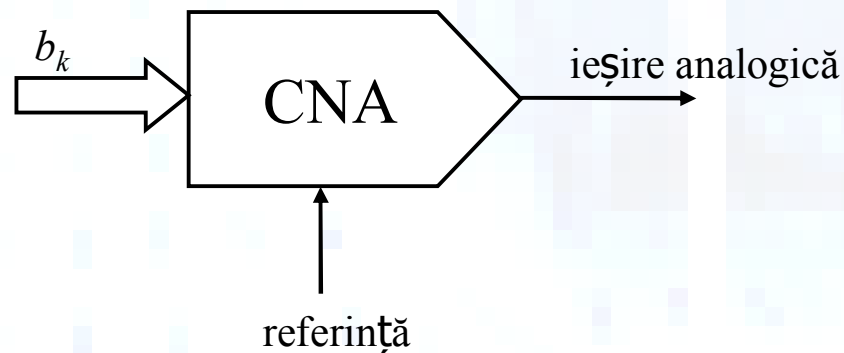
Valoarea minimă pentru D_{CCD} se obține când $b_1 = 1, b_2 = b_3 = \dots b_n = 0$ și este egală cu -2^{n-1} .

- **Observație:** Codurile binar deplasat și complement a lui doi sunt coduri bipolare, servind la reprezentarea semnalelor bipolare (semnale cu două polarități).

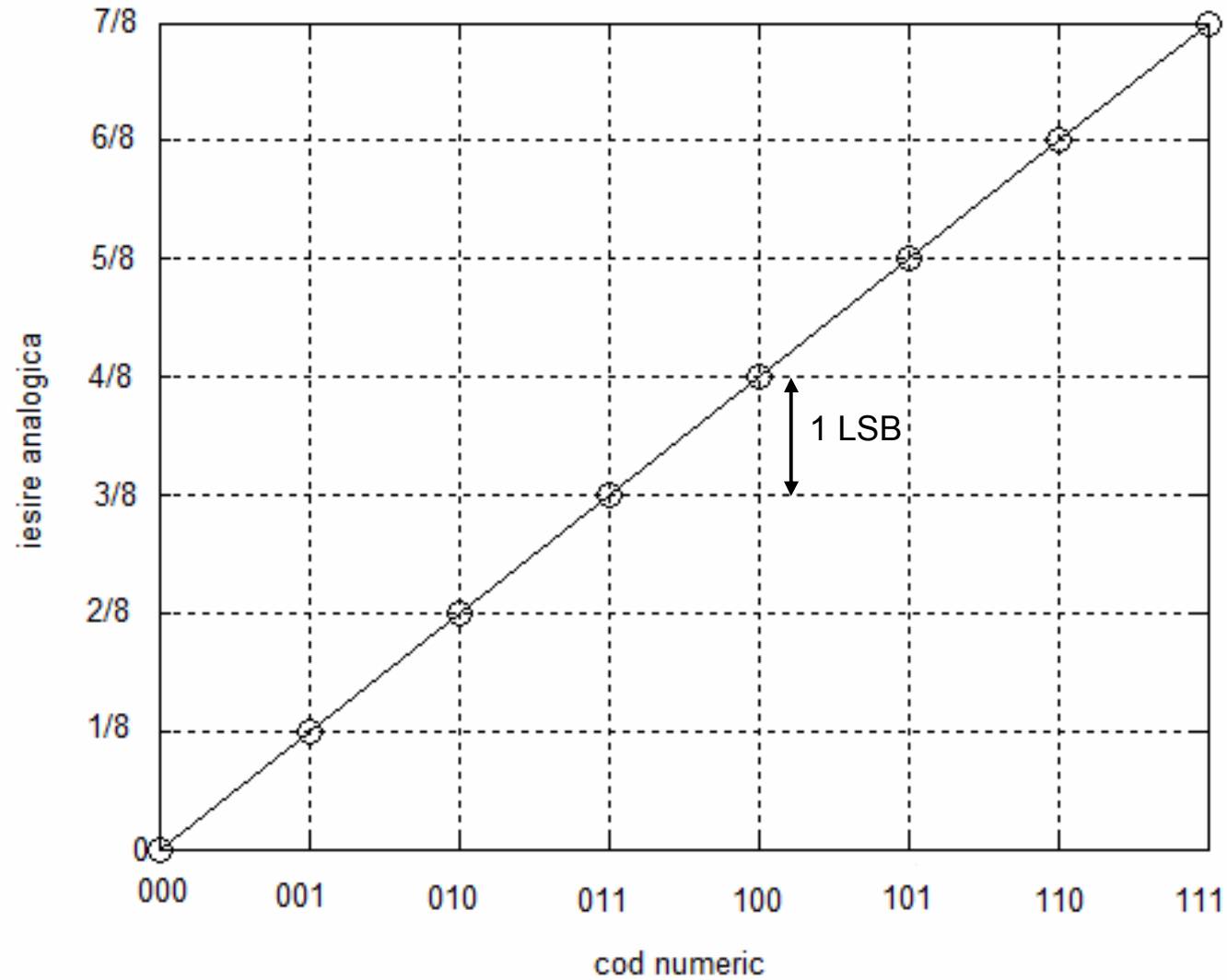
§ 2.2. Parametrii convertoarelor numeric-analogice

- Un CNA are ca semnal de intrare secvența de variabile binare b_1, b_2, \dots, b_n , cu valoarea D_{CF} , corespunzătoare codificării fracționare și furnizează la ieșire un semnal analogic proporțional cu D_{CF} .

Simbolul folosit pentru CNA



Caracteristica de transfer a unui CNA de 3 biți



- Ieșirea CNA poate fi o tensiune sau un curent. Pentru CNA cu ieșire în tensiune, caracteristica de transfer este:

$$U_{out} = k_U \cdot U_{ref} \cdot D_{CF} = k_U \cdot U_{ref} \cdot \sum_{k=1}^n b_k \cdot 2^{-k},$$

unde k_U este o constantă de scară, iar U_{ref} este tensiunea de referință.

- Pentru CNA cu ieșire în curent caracteristica de transfer este:

$$I_{out} = k_I \cdot I_{ref} \cdot D_{CF},$$

unde k_I este o constantă de scară, iar I_{ref} este curentul de referință.

- U_{out} sau I_{out} pot fi văzute ca rezultatul înmulțirii dintre semnalul de referință analogic și intrarea numerică. Când semnalul de referință variază, atunci CNA se numește **cu multiplicare** (MCNA). MCNA poate funcționa în două cadrane când intrarea numerică este unipolară și semnalul de referință este bipolar sau când intrarea numerică este bipolară și semnalul de referință este unipolar. De asemenea, MCNA poate funcționa în patru cadrane când intrarea numerică și semnalul de referință sunt bipolare.
- Mărimea $U_{FSR} = k_U \cdot U_{ref}$ se numește **interval de variație a tensiunii analogice de ieșire** și se notează cu **FSR** (Full Scale Range). Valori tipice pentru FSR : 2,5 V, 5 V și 10 V. Pentru CNA cu ieșire în curent valoarea tipică pentru FSR : 2 mA.
- În funcție de secvența de intrare U_{out} poate lua 2^n valori diferite între 0 și $(1 - 2^{-n}) \cdot U_{FSR}$. Mărimea $(1 - 2^{-n}) \cdot U_{FSR}$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii de ieșire.

- Contribuția bitului MSB la U_{out} este $U_{FSR}/2$, iar contribuția bitului LSB este $U_{FSR}/2^n$. Mărimea $U_{FSR}/2^n$ se numește **rezoluția CNA** sau **1 LSB**. Diferența dintre două tensiuni ideale de ieșire consecutive este egală cu 1 LSB.
- Mărimea $20\lg(2^n)$ se numește **domeniu dinamic**.
- CNA disponibile pe piață au între 6 – 24 de biți. Cele de 6 – 14 biți sunt relativ ușor de realizat. Cele cu mai mult de 14 biți sunt mai greu de realizat, necesitând utilizarea unor metode și tehnici speciale.

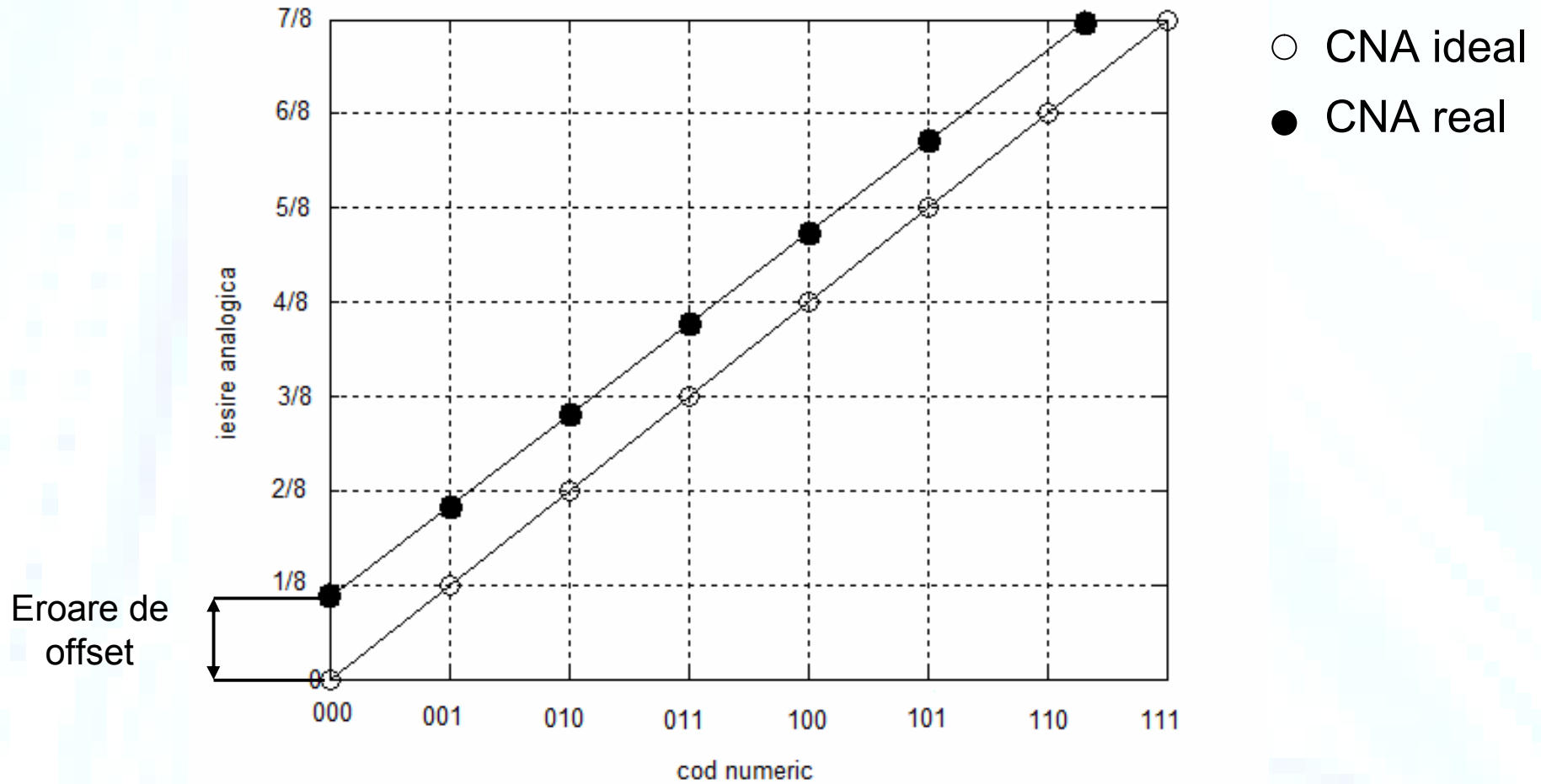
- Fiind în cea mai mare parte analogice circuitele interne ale CNA sunt afectate de neidentitatea, variația, îmbătrânirea, zgomotul componentelor, precum și de alte surse de erori care au ca efect degradarea procesului de conversie N/A.
- **Eroarea (precizia) absolută a unui CNA** este dată de diferența maximă între ieșirea reală a CNA și ieșirea ideală. Se exprimă în fracțiuni de 1 LSB.
- Erorile CNA se clasifică în **erori statice** și **erori dinamice**.

□ Erori statice

○ Eroarea de decalaj (offset)

Este diferența față de valoarea zero a tensiunii de la ieșirea CNA obținută când intrarea numerică este zero. Are ca efect translatarea caracteristicii de transfer în sus sau în jos. Această eroare este produsă de tensiunile sau curenții de offset ai amplificatoarelor. Se exprimă în fracțiuni de LSB sau în procente din *FSR*.

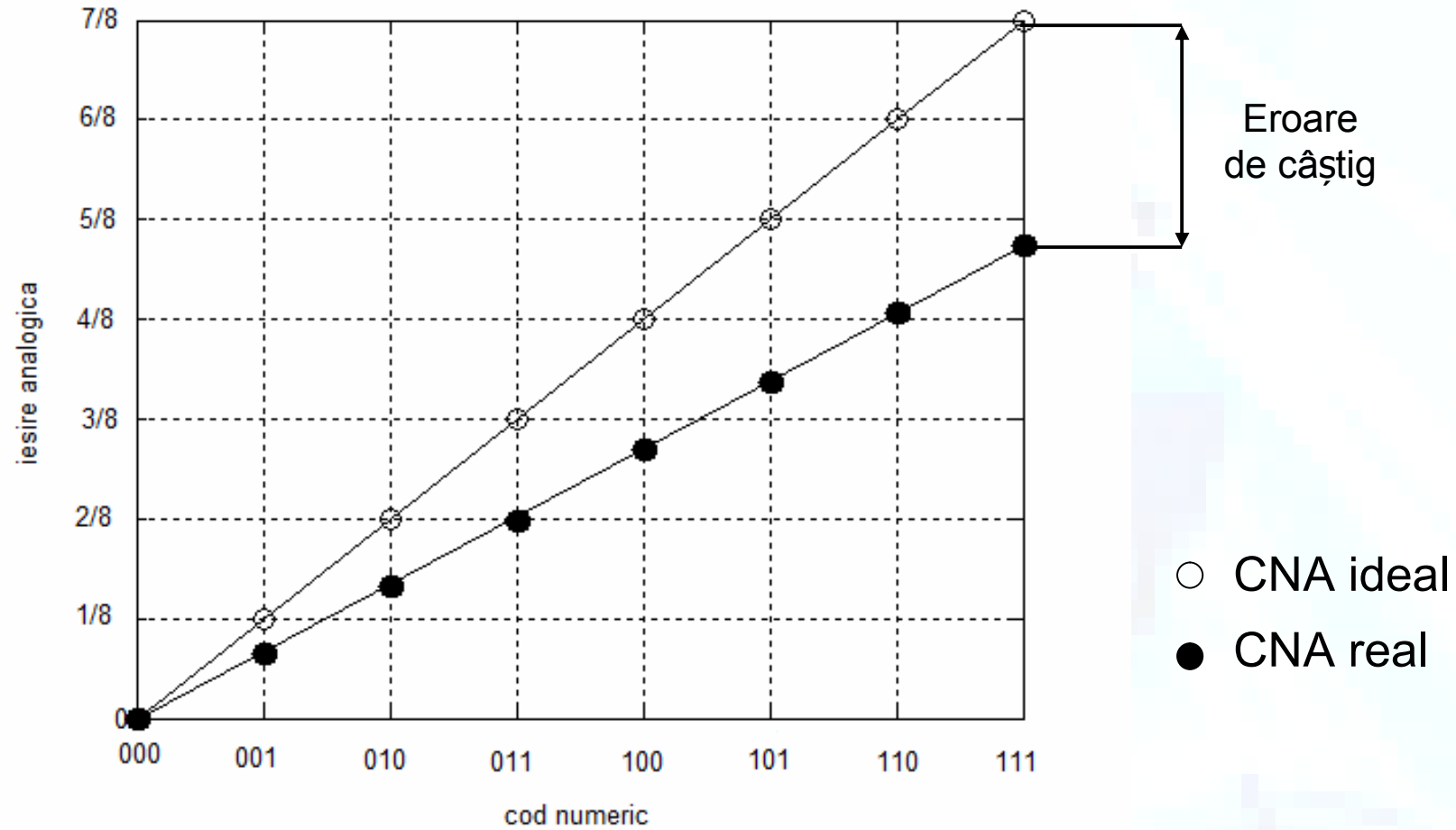
CNA de 3 biți cu eroare de decalaj



○ Eroarea de câștig (gain)

Este dată de diferența dintre valorile maxime reală și ideală ale ieșirii CNA după ce eroarea de decalaj a fost eliminată. Are ca efect rotirea caracteristicii de transfer în jurul originii. Se exprimă în fracțiuni de LSB sau în procente din *FSR*.

CNA de 3 biți cu eroare de câștig

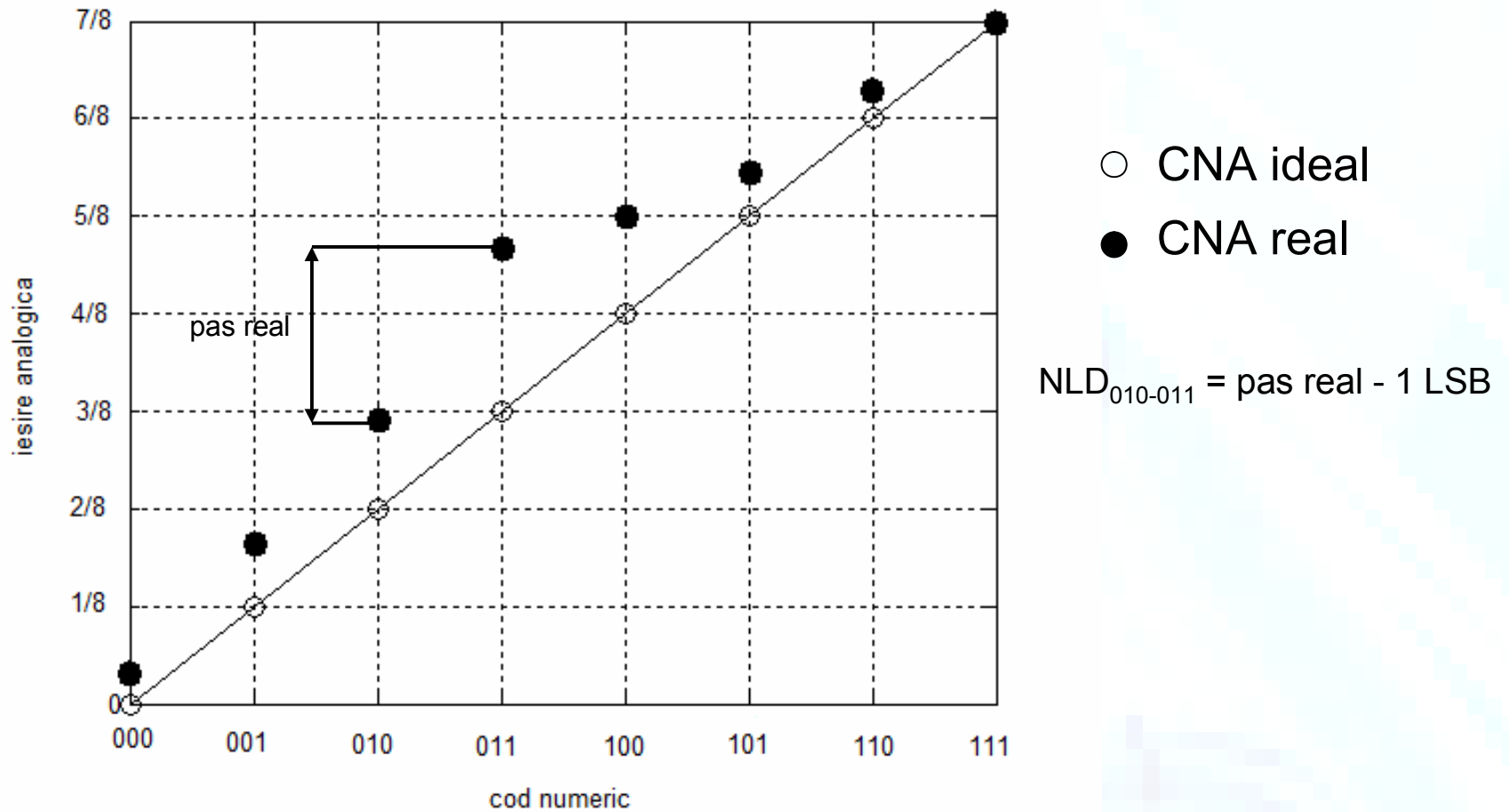


○ Neliniaritate diferențială (eroare de liniaritate diferențială)

Neliniaritatea diferențială (*NLD*) corespunzătoare tranziției de la un cod de intrare la următorul este diferența dintre valoarea reală a pasului și cea ideală, egală cu 1LSB. *NLD* se exprimă în fracțiuni de 1 LSB.

Este important ca neliniaritățile diferențiale în modul să nu depășească 1 LSB, deoarece în acest caz există posibilitatea ca CNA să devină nemonoton. Un CNA este nemonoton atunci când valoarea semnalului de ieșire scade la creșterea codului de intrare. Utilizarea unui CNA nemonoton într-un sistem de achiziție și control poate conduce la instabilitate.

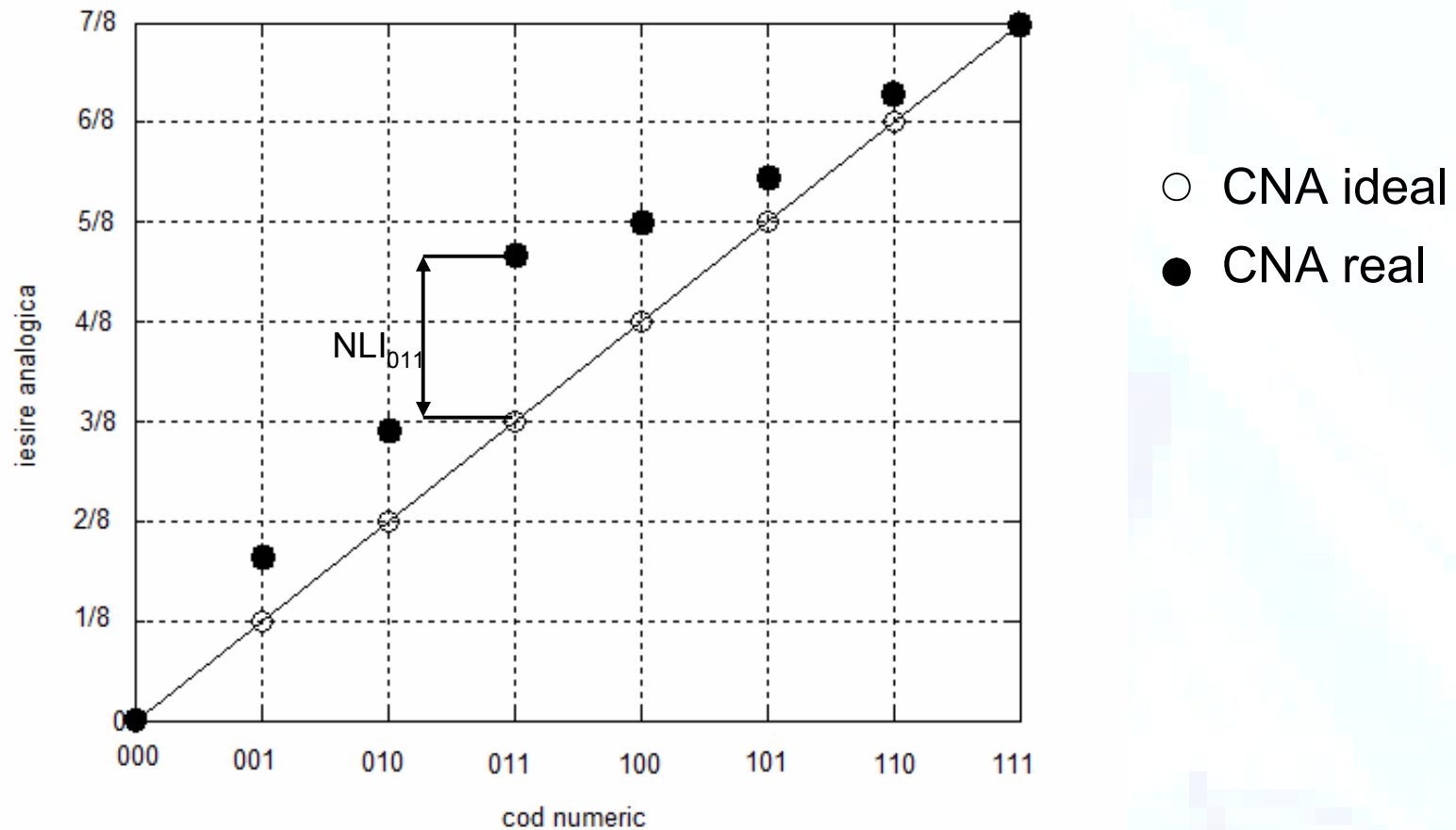
CNA de 3 biți cu erori diferențiale



○ Neliniaritate integrală (eroare de liniaritate integrală)

Neliniaritatea integrală (*NLI*) corespunzătoare unui cod de intrare este diferența dintre valorile de pe caracteristica de transfer reală și cea ideală. Dreapta considerată caracteristica de transfer ideală poate fi cea corespunzătoare liniei drepte optime (*best straight line*) sau cea obținută prin unirea punctelor de început și de sfârșit ale caracteristicii de transfer după ce erorile de decalaj și de câștig au fost eliminate. *NLI* se exprimă în fracțiuni de 1 LSB.

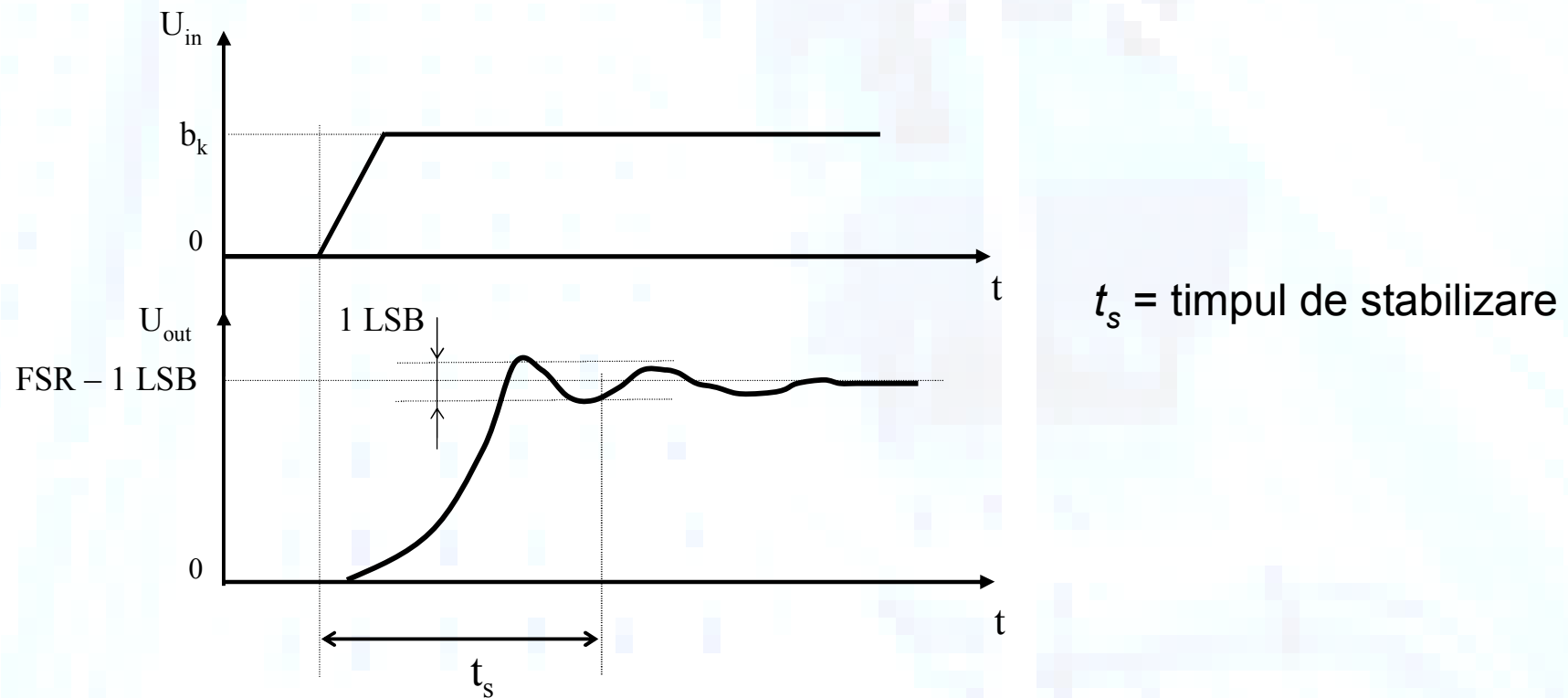
CNA de 3 biți cu erori integrale



□ Erori dinamice

○ Timpul de stabilizare

Este cel mai important parametru dinamic al CNA. Timpul de stabilizare reprezintă intervalul de timp necesar ca ieșirea CNA să se stabilizeze la valoarea sa finală cu o eroare de $\pm 0,5$ LSB.



Timpul de stabilizare se determină în condițiile modificării semnalului de ieșire între valorile extreme.

Acest parametru este determinat de timpii de comutare corespunzători circuitului logic intern, precum și de timpii de tranziție datorati inductanțelor și capacităților parazite.

Timpii de stabilizare variază în domeniul 100 ns – 10 μ s în funcție de numărul de biți ai CNA, precum și de tehnologia cu care este realizat și de arhitectura sa.

○ Impuls parazit (glitch)

Impulsurile parazite (*glitches*) apar la tranzițiile majore ale codurilor de intrare. Aceste impulsuri sunt cauzate de un răspuns neuniform al circuitului intern la modificările biților de intrare și de o sincronizare neadecvată la modificările biților.

De exemplu, în cazul unui CNA unipolar, în cadrul tranziției de la codul 011...11 la codul 100...00, bitul MSB ia valoarea 1 înainte (după) ca (ce) toți biții să treacă pe zero. Ca urmare, ieșirea va trece momentan la valoarea maximă (sau la valoarea zero) conducând, astfel, la apariția unui *glitch* în cadrul ieșirii.

Impulsurile parazite prezintă o importanță deosebită în cazul în care semnalul de ieșire al CNA este folosit pentru afișare pe tub catodic.

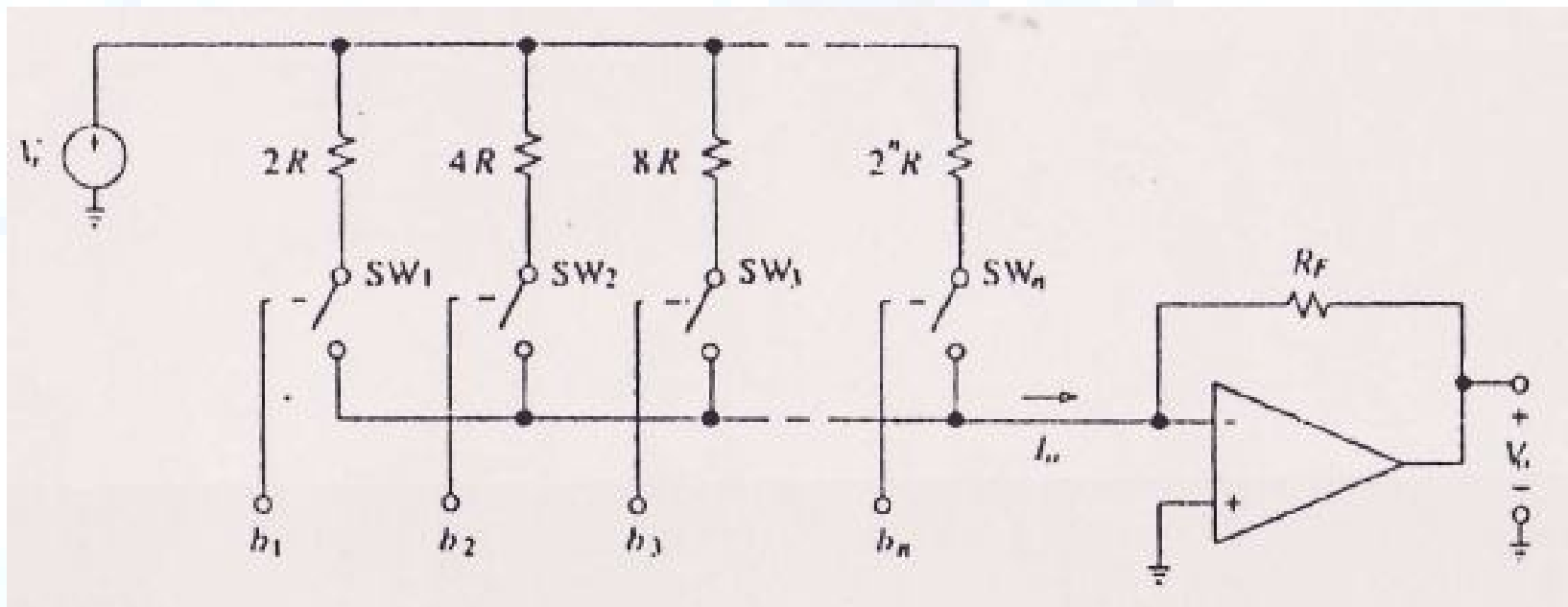
Utilizarea unui filtru trece-jos la ieșirea CNA nu rezolvă problema impulsurilor parazite deoarece acesta realizează integrarea acestor impulsuri, conducând la afectarea și a treptelor următoare ale ieșirii.

Reducerea impulsurilor parazite se poate realiza prin comutarea sincronă a biților secvenței de intrare sau prin utilizarea unui circuit de eșantionare/memorare (CEM), conectat la ieșirea CNA. CEM este comandat în starea de memorare chiar înainte de modificarea codului de intrare și este comandat în starea de eșantionare numai după ce ieșirea CNA s-a stabilizat la noua valoare.

§ 2.3. Arhitecturi de convertoare numeric-analogice

□ CNA cu rețea de rezistențe de valori ponderate

Structura CNA cu rețea de rezistențe de valori ponderate



○ Funcția de transfer a CNA este:

$$U_{out} = -\frac{R_F}{R} \cdot U_{ref} \cdot (b_1 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + \dots + b_n \cdot 2^{-n}) = k_U \cdot U_{ref} \cdot D_{CF},$$

unde $k_U = -R_F/R$ este constanta de scară. Ea poate fi calibrată prin modificarea rezistenței R_F .

○ Deoarece comutatoarelor SW_i ($i = 1, 2, \dots, n$) sunt de tipul cu masă virtuală ele pot fi realizate folosind tranzistoare JFET cu canal p.

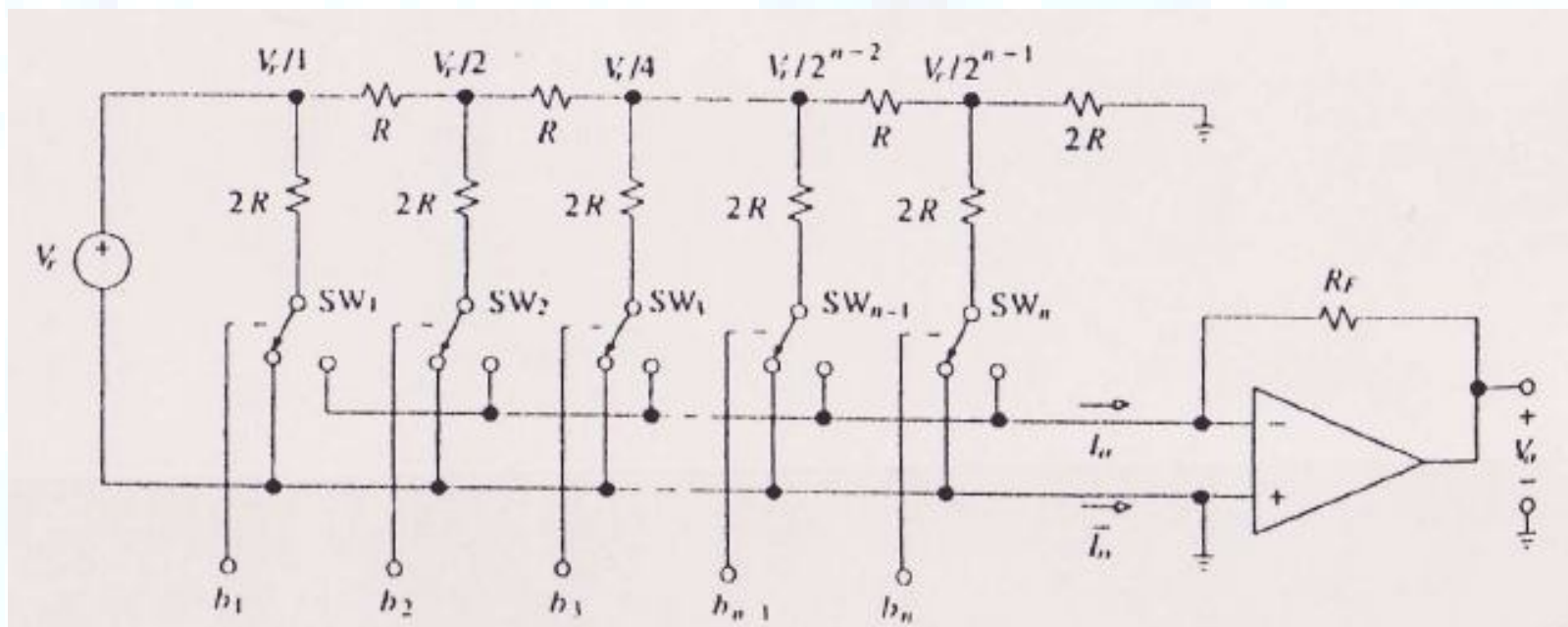
- Simplitatea conceptuală a acestor CNA este afectată de două limitari:
 - valoarea finită a rezistenței comutatorului SW_i , $r_{ds(on)}$;
 - domeniul de valori foarte mare necesar pentru rezistențe.

- Rezistența $r_{ds(on)} \neq 0$ afectează relația de ponderare aferentă curenților, în special în porțiunile aferente celor mai semnificativi biți, în care rezistențele sunt de valori mici. Valorile acestor rezistențe pot fi făcute suficient de mari în raport cu $r_{ds(on)}$, dar în acest caz valorile rezistențelor corespunzătoare pozițiilor cel mai puțin semnificative devin extrem de mari (raportul dintre cea mai mare rezistență și cea mai mică este de $1:2^n - 1$). Datorită acest fapt CNA monolitice pot fi realizate până la maximum 8 biți (raportul este 1:128).

□ CNA cu rețea de rezistențe R-2R

- Dezavantajul datorat utilizării unor rezistențe de valori ridicate în cadrul structurii CNA cu rețea de rezistențe de valori ponderate este eliminat prin utilizarea unei structuri R-2R.

Structura CNA cu rețea de rezistențe R-2R



- În cadrul acestui CNA se utilizează o rețea de rezistențe R-2R pentru ponderarea (divizarea) tensiunilor și, implicit, a curenților. Așa cum se vede în figură tensiunile în nodurile rețelei sunt ponderate binar: U_{ref} , $U_{ref}/2$, $U_{ref}/4$, ..., $U_{ref}/2^{n-1}$. Ca urmare, începând de la stânga se obțin curenții: $I_1 = U_{ref}/(2R)$, $I_2 = U_{ref}/(4R) = I_1/2$, $I_3 = U_{ref}/(8R) = I_1/4$, ..., $I_n = U_{ref}/(2^n R) = I_1/2^{n-1}$. În funcție de poziția comutatoarelor SW_i ($i = 1, 2, \dots, n$) fiecare curent I_i este transmis către masă (I_{out}) sau către masa virtuală (I_{out}). Utilizând bitul b_i pentru a identifica starea comutatorului SW_i se obține:

$$U_{out} = -\frac{R_F}{R} \cdot U_{ref} \cdot (b_1 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + \dots + b_n \cdot 2^{-n}) = k_U \cdot U_{ref} \cdot D_{CF},$$

unde $k_U = -R_F/R$ este constanta de scară. Ea poate fi calibrată prin modificarea rezistenței R_F .

○ Se observă că:

$$I_{out} + \bar{I}_{out} = \left(1 - 2^{-n}\right) \frac{U_{ref}}{R}.$$

Din acest motiv se spune că \bar{I}_{out} este complementar față de I_{out} .

○ Cu toate că rețeaua R-2R necesită de două ori mai multe rezistențe decât rețeaua folosită la CNA precedent, aceasta evită utilizarea unor rezistențe de valori ridicate, în special în cazul CNA monolitice. La aceste convertoare raportul de rezistențe 2:1, care poate fi realizat cu foarte mare precizie, inclusiv și la variația temperaturii.

- În funcție de rezoluția dorită rezistențe se realizează prin difuzie, prin implantare ionică sau prin tehnica peliculelor subțiri. Rezistențele din pelicule subțiri au avantajul că pot fi ajustate cu o foarte mare precizie prin intermediul laserului. Din acest motiv rețeaua R-2R realizată cu rezistențe din peliculă subțire este utilizată în cadrul CNA de rezoluții ridicate (cu un număr de biți mai mare sau egal cu 12 biți). CNA de rezoluții scăzute sau moderate utilizează rezistențe difuzate sau obținute prin implantare ionică.
- Valoarea tipică pentru R este de 10 k Ω , dar poate varia între 100 k Ω (pentru CNA de putere redusă) și câteva sute de ohmi (pentru CNA de viteză ridicată).

- Deoarece rețeaua R-2R operează pe principiul însumării curenților se spune că aceasta operează în modul curenț. Trebuie specificat faptul că potențialul liniei I_{out} trebuie să fie apropiat de potențialul liniei I_{out} , în caz contrar apar erori de liniaritate. Astfel, în cazul CNA de rezoluții ridicate este necesar ca erorile de decalaj ale A.O. să fie eliminate, iar variații în timp ale acestor să fie foarte mici.
- Un avantaj important al modului de operare în curenț îl constituie faptul că tensiunile în nodurile rețelei rămân constante la modificarea codurilor de intrare, evitând astfel efectul de descărcare lentă (*slowdown*) aferentă capacității parazite. În plus, deoarece comutatoarele sunt de tipul masă virtuală, proiectarea driverului de comutare este mult simplificată.

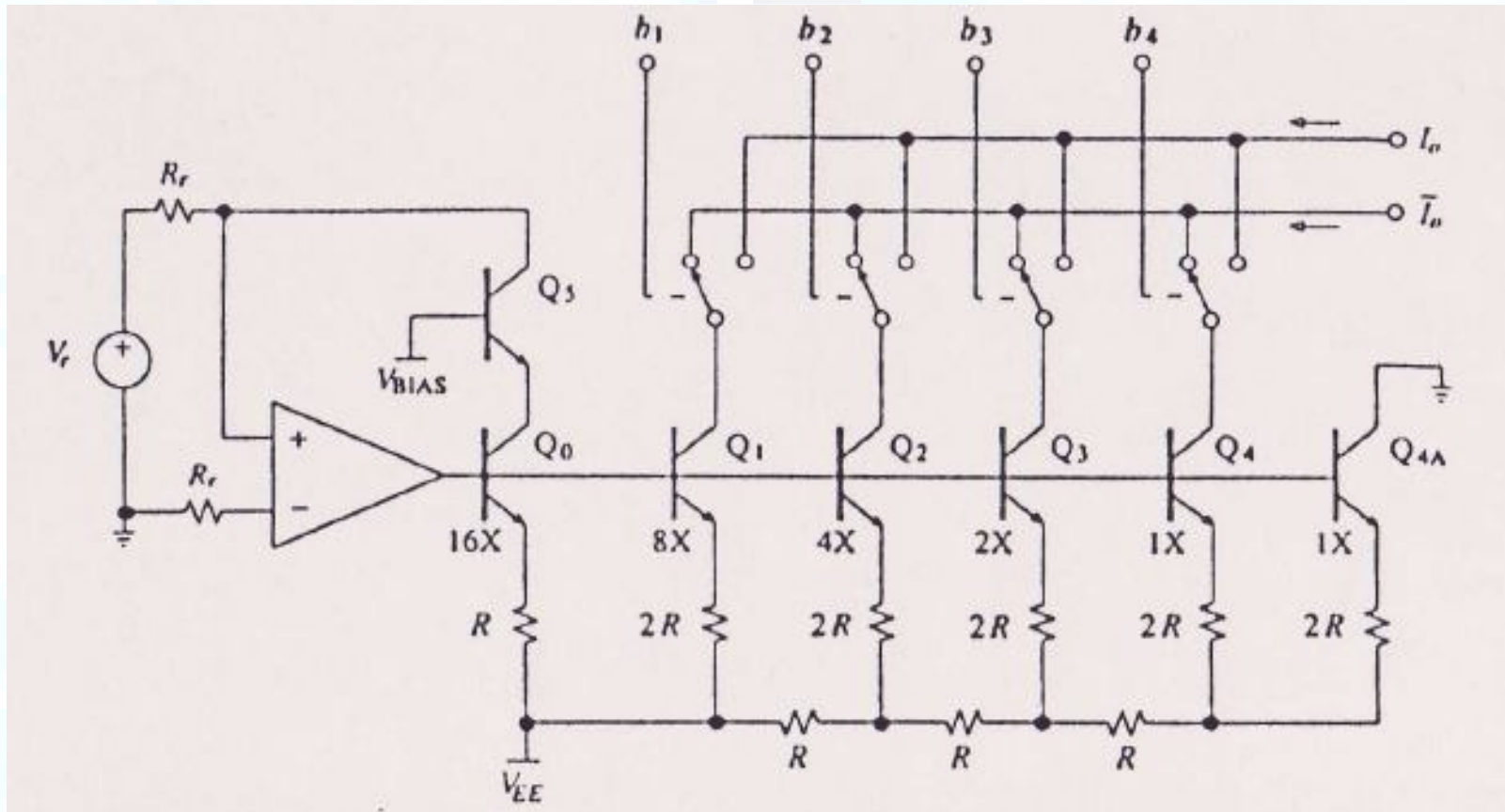
□ CNA bipolare

- CNA bipolare utilizează tranzistare bipolare pentru a realiza comutări rapide în curent și surse sau receptoare de curent pentru curentul de ieșire. Când sunt utilizate în modul de lucru nesaturat în curent tranzistoarele bipolare comută foarte rapid, tipic în câteva ns. În plus, ca surse sau receptoare de curent, ieșirea CNA poate fi convertită în tensiune folosind în acest scop doar o rezistență, evitând astfel apariția unor întârzieri adiționale datorate A.O. din cadrul convertoarelor I-U.

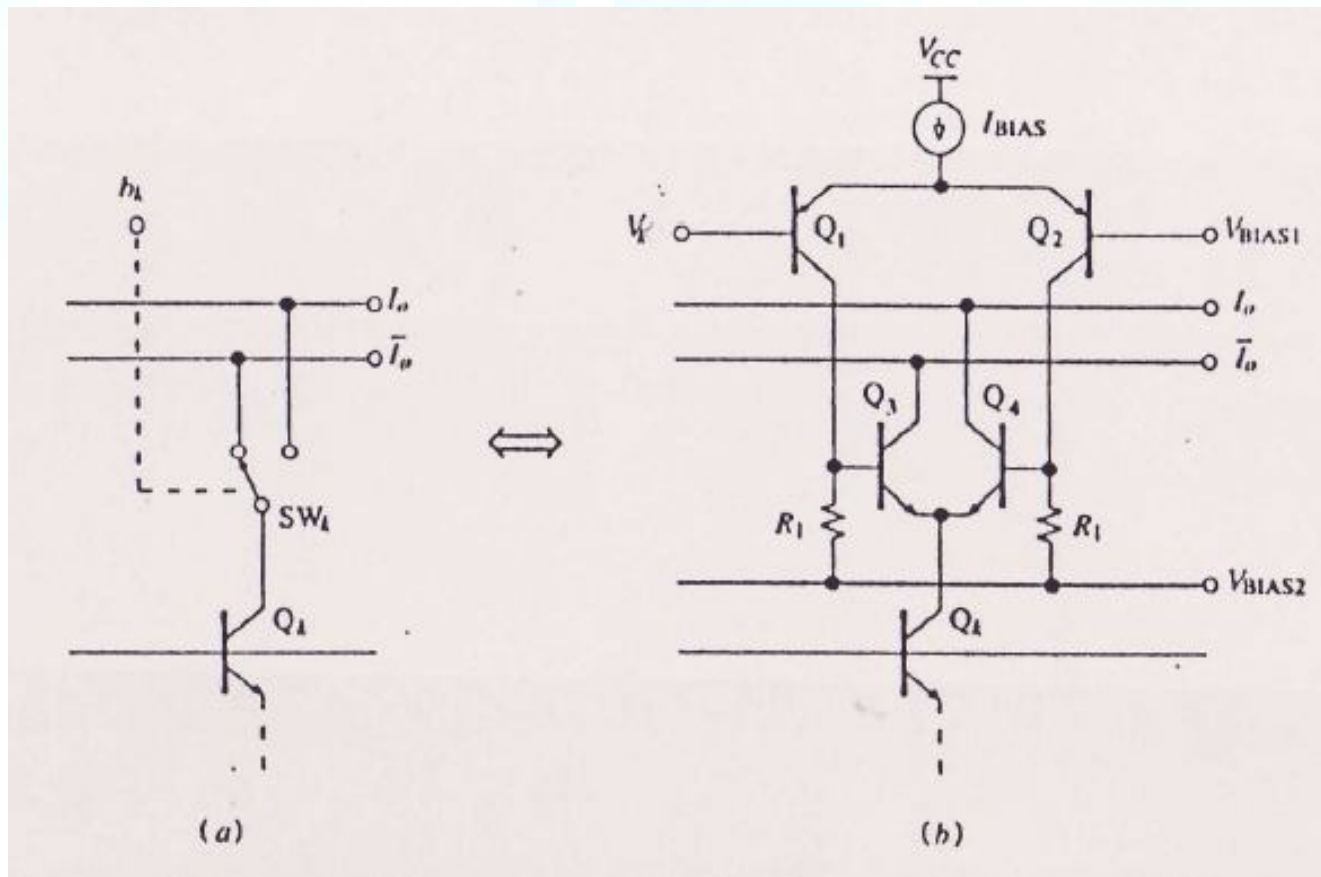
□ Schema bloc de bază a unui CNA bipolar

- Schema de bază a unui CNA bipolar simplu pe 4 biți este prezentată în figura următoare.

Structura CNA bipolar de 4 biți



Comutator în curent diferențial de mare viteză



- Tranzistoarele $Q_1 - Q_4$ formează 4 receptoare de curent ponderate binar. Q_{4A} este tranzistorul cu rolul de terminare a rețelei. Curenții generați de tranzistoarele $Q_1 - Q_4$ sunt transmiși către linia I_{out} sau către linia I_{out} prin intermediul comutatoarelor de curent de tipul celor prezentate în figură. Curenții ponderați binar sunt stabiliți fie prin intermediul unei rețele de rezistențe R-2R (ca în figură) fie prin intermediul unei rețele de rezistențe de valori ponderate.
- Pentru a asigura foarte precis rapoartele curenților emitoarele tranzistoarelor trebuie menținute la același potențial ($U_{BE} = const.$). Această constrângere este realizată prin comanda tuturor bazelor tranzistoarelor cu aceeași tensiune și prin realizarea emitoarelor cu arii diferite 1x, 2x, 4x, 8x.

- Relația dintre tensiunea U_{BE} și curentul I_c este:

$$U_{BE} = U_T \ln\left(\frac{I_c}{I_s}\right),$$

unde U_T este tensiunea termică, iar I_s este curentul de saturație.

- De asemenea, se știe că I_s este proporțional cu aria emitorului. Astfel, utilizând ariile specificate anterior ale emitoarelor și ținând cont de valorile curenților I_c rezultă că emitoarele se află la același potențial.

- Ignorând curentul de bază al tranzistorului Q_5 se obține $I_{c0} = I_{c5} = U_{ref}/R_r$. Datorită rețelei R-2R rezultă $I_{c1} = I_{c0}/2$, $I_{c2} = I_{c0}/4$, $I_{c3} = I_{c0}/8$ și $I_{c4} = I_{c0}/16$. trebuie subliniat faptul că relațiile de mai sus sunt foarte precise datorită caracteristicilor de urmărire și de identitate excelente ale tranzistoarelor bipolare.
- Utilizând bitul b_i pentru a desemna starea comutatorului SW_i se poate scrie:

$$I_{out} = \frac{U_{ref}}{R_r} \cdot (b_1 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + b_3 \cdot 2^{-3} + b_4 \cdot 2^{-4}),$$

în care $I_{FSR} = U_{ref}/R_r$ este intervalul de variație al curentului de ieșire.

- U_{ref} poate fi constantă sau variabilă. În cel de-al doilea caz CNA operează ca un convertor cu multiplicare. Fiindcă tranzistoarele bipolare npn pot fi doar receptoare pentru curentul de colector, U_{ref} trebuie să fie întotdeauna pozitivă. Ca urmare, CNA bipolare pot funcționa doar într-un singur cadran.
- În cadrul comutatorului în curent diferențial dacă $U_k > U_{bias1}$, atunci tranzistorul Q_1 este blocat, iar tranzistorul Q_2 conduce. Aceasta conduce la Q_3 – blocat și la Q_4 – conduce. În această situație curentul de colector al tranzistorului Q_k , I_{ck} este transmis liniei I_{out} . Dacă $U_k < U_{bias1}$, atunci stările tranzistoarelor sunt inversate, iar I_{ck} este transmis liniei I_{out} . Pragul de comutare este stabilit de U_{bias1} (are valoarea tipică de 1,4 V în scopul asigurării compatibilității cu circuitele TTL și CMOS). La anumite CNA, U_{bias1} poate fi stabilită de utilizator.

- Trebuie subliniat faptul că datorită valorii finite a factorului β nu toată valoarea curentului I_{ck} este transmisă liniei I_{out} sau I_{out} , o mică parte din aceasta este transmisă fie bazei tranzistorului Q_3 , fie a tranzistorului Q_4 . Acest lucru conduce la erori importante, în special în cazul celor mai semnificativi biți ai CNA de rezoluție ridicată. Această eroare poate fi compensată prin creșterea curentului I_{ck} cu o valoare egală cu cea pierdută. Această sarcină este îndeplinită de tranzistorul Q_5 . datorită gradului înalt de identitate, curentul pierdut în fiecare comutator este compensat prin curentul în baza tranzistorului Q_5 , asigurând astfel un curent neafectat de erori care se transmite liniei I_{out} sau I_{out} .