

LUCRARE DE LABORATOR LAB -10

CONVERTOARE NUMERIC-ANALOGICE

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

1. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul prezentei lucrări de laborator este studierea și testarea convertoarelor numeric-analogice – *DAC (Digital to Analog Converter)*. În lucrare se prezintă principiile de funcționare, parametrii electrici principali și o schemă de testare rapidă a unui *DAC* asupra căreia se efectuează partea experimentală.

2. GENERALITĂȚI

Convertorul numeric-analogic este un bloc funcțional de bază din structura unui aparat numeric de măsurare, care realizează conversia unei mărimi exprimată sub formă numerică într-o mărime analogică corespunzătoare. Altfel spus, *DAC* generează la ieșire un semnal analogic dependent de un cod numeric aplicat la intrarea lui, conform relației:

$$X = kN, \quad (1)$$

în care X reprezintă mărimea analogică rezultată la ieșire, N – numărul prezentat la intrare, iar k – o constantă de proporționalitate. Numărul N este un număr zecimal exprimat sub formă binară sau zecimală codată binar, deci constanta k trebuie să aibă aceeași dimensiune ca și mărimea analogică X .

Exprimarea binară a unui număr zecimal nu este obligatorie, dar în practică este utilizată din motive de tehnologie a conversiei, cât și a efectuării operațiilor matematice în sistemele numerice de calcul.

Expresia binară a unui număr N este de forma:

$$N: \quad a_{n-1} a_{n-2} \dots a_i \dots a_1 a_0, \quad (2)$$

unde s-a considerat că N are n ranguri binare, adică n biți și $\forall a_i \in \{0,1\}$.

Valoarea zecimală a numărului N se poate calcula cu relația:

$$N = a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_i 2^i + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0 = \sum_{i=0}^{i=n-1} a_i 2^i, \quad (3)$$

iar valoarea maximă a numărului N este:

$$N_{\max} = 2^n - 1. \quad (4)$$

De obicei, mărimea analogică de ieșire – X , se exprimă sub formă normată, adică prin valorile ei raportate la o valoare X_0 , corespunzătoare numărului $N_0 = 2^n$:

$$N_0 = 2^n = N_{\max} + 1, \quad \text{deci} \quad X_0 = kN_0. \quad (5)$$

Raportând membru cu membru (1) și (5), se obține:

$$X = X_0 \frac{N}{2^n} = \frac{X_0}{2^n} \sum_{i=0}^{i=n-1} a_i 2^i = X_0 \sum_{i=0}^{i=n-1} a_i 2^{i-n}, \quad (6)$$

sau:

$$X = X_0 (a_{n-1} 2^{-1} + a_{n-2} 2^{-2} + \dots + a_i 2^{i-n} + \dots + a_1 2^{-(n-1)} + a_0 2^{-n}), \quad (7)$$

Inversând numerotarea indicilor coeficienților a_i , începând cu cifra 1, (7) devine:

$$X = X_0 (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_k 2^{-k} + \dots + b_{n-1} 2^{-(n-1)} + b_n 2^{-n}) = \sum_{k=1}^{k=n} b_k 2^{-k}. \quad (8)$$

Din (4) și (6) se poate calcula valoarea maximă pe care o poate atinge mărimea analogică de ieșire:

$$X_{\max} = X_0 \frac{2^{n-1}}{2^n} = X_0 (1 - 2^{-n}). \quad (9)$$

Convertoarele numeric-analogice au la bază diverse principii de funcționare. Principalele metode pentru obținerea unor componente analogice ponderate binar utilizează rețele de rezistențe ponderate binar sau rețele de rezistențe în scară, de tipul R/2R și generatoare de curenți ponderați binar.

Indiferent de principiu de realizare, mărimea de ieșire – X este de obicei curent, sau tensiune, iar valoarea X_0 este fixată printr-un curent sau o tensiune de referință. Astfel, în cazul unui DAC de 4 biți (4 ranguri binare), considerat a fi realizat cu generatoare de curenți ponderați și cu ieșirea în curent, (7) și (8) devin:

$$I_0 = a_3 \frac{I_r}{2} + a_2 \frac{I_r}{4} + a_1 \frac{I_r}{8} + a_0 \frac{I_r}{16}; \quad (10)$$

$$I_0 = b_1 \frac{I_r}{2} + b_2 \frac{I_r}{4} + b_3 \frac{I_r}{8} + b_4 \frac{I_r}{16}; \quad (11)$$

în care s-a notat cu I_0 ($I_0 = X$) curentul de ieșire și cu I_r ($I_r = X_0$) curentul de referință.

Dacă numărul de convertit este $N_{(10)} = 10$, în binar capătă forma:

$$N_{(2)} = a_3 a_2 a_1 a_0 = 1010; \quad (12)$$

iar curentul de ieșire al DAC va avea valoarea:

$$I_0 = 1 \frac{I_r}{2} + 0 \frac{I_r}{4} + 1 \frac{I_r}{8} + 0 \frac{I_r}{16} = \frac{10}{16} I_r; \quad (13)$$

Din (10), (11) și (13) se observă că la ieșirea DAC se obține un curent egal cu o combinație liniară de curenți ponderați cu valorile $I_r/2$, $I_r/4$, $I_r/8$, $I_r/16$, în funcție de valoarea binară a biților asociați fiecărui generator de curent.

Plecând de la (6)...(9) se poate scrie expresia generală a (10) și (11), valabilă pentru cazul unui DAC cu n biți:

$$I_0 = I_r \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^{i-n} = I_r \sum_{k=1}^n b_k 2^{-k} \quad \text{și} \quad I_{0\max} = \frac{2^n - 1}{2^n} I_r = (1 - 2^{-n}) I_r; \quad (14)$$

unde valorile coeficienților a_i și b_k sunt date de valorile biților de rang corespunzător.

Biții extremi, cu ponderea cea mai mare și cea mai mică, sunt denumiți *cel mai semnificativ bit* – **MSB** (**M**ost **S**ignificant **B**it), respectiv *cel mai puțin semnificativ bit* – **LSB** (**L**east **S**ignificant **B**it). În cazul DAC denumirile **MSB** și **LSB** pot fi atribuite atât biților respectivi din codul numeric al intrării, cât și valorilor corespunzătoare ale mărimii de ieșire. Semnificația biților **LSB** și **MSB** este următoarea:

- **LSB** – reprezintă cea mai mică variație a mărimii analogice de ieșire a DAC, ce se poate obține la variația între stările 0/1 a unui singur bit din codul digital al intrării. Această variație a mărimii de ieșire este produsă de bitul cu ponderea cea mai mică (a_0 sau b_n) și are valoarea:

$$LSB = I_r / 2^n. \quad (15)$$

Valoarea bitului **LSB** este utilizată uzual pentru exprimarea preciziei, rezoluției sau neliniarității, sub forma unui anumit procent din **LSB**.

- **MSB** – reprezintă cea mai mare variație a mărimii analogice de ieșire a DAC, ce se poate obține la variația între stările 0/1 a unui singur bit din codul digital al intrării. Această variație a mărimii de ieșire este produsă de bitul cu ponderea cea mai mare (a_{n-1} sau b_1) și are valoarea:

$$MSB = I_r / 2. \quad (16)$$

3. PARAMETRII CARACTERISTICI PRINCIPALI AI DAC

3.1. Codul numeric acceptat la intrare. În conversiile numeric-analogice și analog-numerice se utilizează mai multe tipuri de coduri binare unipolare (*binar natural*, *BCD*, *Gray*) și bipolare (*semn-modul*, *binar deplasat*, *complement față de 2*, *complement față de 1*, *inversat analogic*).

- 3.2. Capăt de scală (Full Scale – FS)** – reprezintă valoarea mărimii de ieșire $X_0 = kN_0 = k(N_{\max} + 1) = k2^n$. Această valoare nu poate fi atinsă niciodată de mărimea de ieșire.
- 3.3. Domeniul maxim al ieșirii (Full Output Range – FR)** – reprezintă valoarea mărimii de ieșire a DAC, când la intrare se aplică valoarea maximă a codului digital: $X_{\max} = kN_{\max} = k(2^n - 1) = X_0(2^n - 1)/2^n = X_0(1 - 2^{-n})$.
- 3.4. Eroarea de offset** – reprezintă valoarea mărimii analogice de ieșire când codul digital de intrare corespunde unei valori a mărimii de ieșire egală cu zero. Se exprimă în fracțiuni din FS, ppm, fracțiuni din LSB, μA sau mV.
- 3.5. Rezoluția (Resolution – R)** – reprezintă numărul de stări distincte ale mărimii de ieșire. În cazul ideal $R = 2^n$. Rezoluția se mai poate exprima și în număr de biți, exemplu $R = n$ (n = numărul de biți).
- 3.6. Neliniaritatea** – reprezintă abaterea maximă a mărimii de ieșire față de linia dreaptă trasată prin punctele extreme ale caracteristicii de transfer a DAC (pentru toți biții egali cu 0 respectiv 1). Se exprimă prin procente din capăt de scală (%FS) sau prin fracțiuni din LSB.
- 3.7. Precizia** – se exprimă funcție de abaterea maximă a mărimii de ieșire de la caracteristica ideală. Include toți termenii de eroare și se exprimă în procente din capăt de scală (%FS) sau fracțiuni din LSB.
- 3.8. Monotonia** – este proprietatea mărimii de ieșire a DAC, de a avea o variație pozitivă sau cel puțin nulă, la modificarea codului numeric în sens crescător, între două stări succesive.
- 3.9. Excursia de tensiune a ieșirii** – se referă la ieșirea în curent a DAC și reprezintă excursia de tensiune care produce pentru același cod numeric o variație a curentului de ieșire de $\pm 1/2LSB$.
- 3.10. Rejecția tensiunilor de alimentare** – se exprimă prin variația mărimii de ieșire corespunzătoare unei anumite variații a tensiunilor de alimentare.
- 3.11. Coeficientul de variație cu temperatura al capătului de scală** – se determină prin raport între variația capătului de scală la o anumită temperatură, față de temperatura de 25 °C și se exprimă în ppm/°C.
- 3.12. Timpul de stabilire** – este intervalul de timp necesar mărimii de ieșire pentru a atinge valoarea de regim staționar. De obicei, se specifică pentru variația de la zero la valoarea maximă a codului numeric de intrare și se acceptă o eroare dinamică de $1/2LSB$.

3.13. Viteza de creștere a mărimii de ieșire (*Slew-rate*) – se definește ca viteza de creștere a mărimii de ieșire atunci când se modifică mărimea de referință, pentru același cod numeric de intrare.

3.14. Cuplajul intrare-ieșire – definește, în cazul unui *DAC* multiplicator, frecvența pentru care la ieșire apare un semnal alternativ de $1/2LSB$ (*vârf-vârf*), atunci când la intrarea de referință există semnal alternativ și codul numeric este zero.

4. SCHEMA CIRCUITULUI DE TESTARE RAPID A DAC

Testarea completă a unui *DAC* necesită scheme de test complexe și se execută în mod obișnuit sub controlul unui calculator. Pe de altă parte, utilizatorul de *DAC* trebuie să verifice funcționarea acestor circuite în scheme de aplicații uzuale. În acest scop, se utilizează scheme de test mai simple, care să permită verificarea parametrilor principali sau a unor parametri specifici care sunt critici într-o aplicație concretă. În *Fig.1* este reprezentată o schemă de testare minimală a convertorului numeric-analogic $\beta DAC-08$, de 8 biți, fabricat o vreme și în țara noastră.

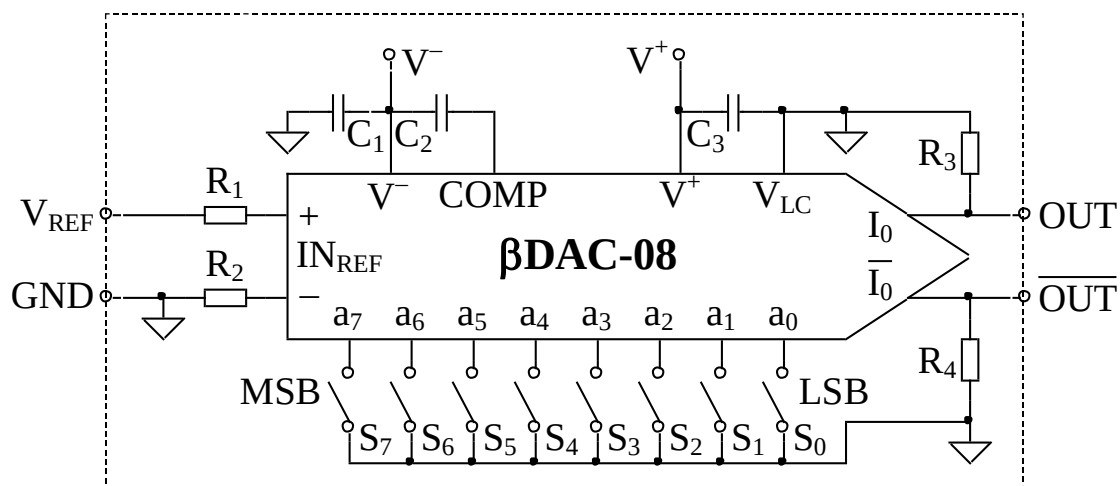


Fig.1. Schema circuitului de testare minimală a circuitului $\beta DAC-08$.

Valorile componentelor electronice sunt următoarele:

- $R_1, R_2 = 5 \text{ k}\Omega \pm 1\%$; $R_3, R_4 = 100 \Omega \pm 1\%$;
- $C_1, C_3 = 100 \text{ nF}$; $C_2 = 10 \text{ nF}$.

Convertorul $\beta DAC-08$ este constituit dintr-un generator de curent de referință cu valoarea $I_r = 256I$, care prescrie curenții prin cele 8 generatoare de curenți ponderați corespunzătoare celor 8 biți, care au valorile: $I_r/2 = 128I$, $I_r/4 = 64I \dots I_r/256 = I$. Aceste

generatoare sunt realizate cu tranzistoare având în emitor o rețea de rezistențe ponderată $R/2R$. Valoarea curentului I_r este fixată prin tensiunea de referință V_{REF} și rezistența R_1 , având valoarea nominală de 2 mA ($V_{REF} = 10$ V, $R_1 = 5$ k Ω). Rezistența R_2 , egală cu R_1 , are rolul de a compensa curenții de intrare ai amplificatorului de eroare al generatorului de curent de referință.

Fiecare bit al codului numeric de intrare comandă câte un comutator de curent, care conectează generatorul de curent ponderat corespunzător la ieșirea I_0 dacă bitul respectiv are valoarea logică 1 sau la ieșirea $non-I_0$ dacă bitul are valoarea logică 0. Astfel, curentul de ieșire rezultă o combinație liniară de curenți ponderați binar, conform (14).

Circuitul poate funcționa și cu tensiune de referință variabilă, caz în care se obține un DAC multiplicator, al cărui curent de ieșire este proporțional cu produsul dintre V_{REF} și codul numeric de intrare.

Condensatoarele C_1 și C_3 au rol de filtrare a tensiunilor de alimentare, iar C_2 de compensare cu frecvența a amplificatorului de eroare.

5. PROBLEME TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

5.1. Verificarea liniarității:

- se efectuează atât pentru ieșirea directă (I_0 , OUT), cât și pentru ieșirea complementară ($non-I_0$, $non-OUT$); pentru simplitate, se consideră, conform (1), (2) și (3), că tensiunea de ieșire este dată de o relația de forma:

$$v_0 = k(a_7 2^7 + a_6 2^6 + a_5 2^5 + a_4 2^4 + a_3 2^3 + a_2 2^2 + a_1 2^1 + a_0 2^0), \quad (17)$$

- pentru valoarea maximă a codului numeric de intrare se reglează V_{REF} , astfel ca $v_{0max} = 0,1995$ V, adică:

$$k = \frac{v_{0max}}{255}; \quad v_0 = \frac{v_{0max}}{255} \sum_{i=0}^{i=7} a_i 2^i; \quad (18)$$

- se dă codului numeric de intrare 5...7 valori echidistante și se măsoară valorile corespunzătoare ale tensiunii de ieșire – v_{0k}^* ;
- se calculează eroarea de neliniaritate – ϵ_n , plecând de la relația:

$$\Delta v_{0k} = v_{0k}^* - v_{0k}; \quad \epsilon_n = \frac{\Delta v_{0max}}{v_{0max}}; \quad (19)$$

- unde v_{0k} sunt valorile tensiunii de ieșire calculate cu (18);
- datele experimentale se trec într-un tabel, conform modelului de mai jos.

Tabel 1. Verificarea liniarității DAC.

Cod zecimal	Cod binar	v_0^*	v_0	Δv_0	ε_n
0	00000000	v_{01}^*	v_{01}	Δv_{01}	$\Delta v_{0\max} = ?$ $\varepsilon_n = ?$
:	:	:	:	:	
255	11111111	v_{0n}^*	v_{0n}	Δv_{0n}	

5.2. Verificarea monotoniei:

Observații:

1. Monotonia unui DAC se verifică automat, baleind codul numeric de intrare cu un numărător și comparând valoarea actuală a mărimii de ieșire cu valoarea anterioară reținută cu un circuit de eșantionare-memorare. Evident, această operație nu poate fi efectuată manual, din cauza consumului mare de timp.
2. În cazul unui DAC cu generatoare de curenți ponderați, monotonia este determinată de semnul și valoarea erorii fiecărui generator. Dacă unele generatoare au erori pozitive iar altele negative, este posibil ca la creșterea codului numeric cu o unitate, mărimea de ieșire să scadă în loc să crească, dacă suma erorilor negative depășește în modul pe cea a erorilor pozitive.
3. Având în vedere cele menționate anterior, se poate observa că tranzițiile cele mai probabile să afecteze monotonia sunt cele de forma 0...01...1/0...10...0, adică cele care determină înlocuirea sumei unui anumit număr de curenți ponderați cu curentul de pondere imediat superioară. În formă desfășurată, pentru un DAC de 8 biți, aceste tranziții sunt următoarele:
 - 0000 0000/0000 0001;
 - 0000 0001/0000 0010;
 - 0000 0011/0000 0100;
 - 0000 0111/0000 1000;
 - 0000 1111/0001 0000;
 - 0001 1111/0010 0000;
 - 0011 1111/0100 0000;
 - 0111 1111/1000 0000.

Probabilitatea de a afecta monotonia crește de la prima tranziție spre ultima tranziție, fiindcă erorile se cumulează pas cu pas.

- se va verifica monotonia *DAC* din Fig.1, conform procedeului simplificat menționat mai sus.

5.3. Verificarea *Slew-Rate*:

- pentru valoarea maximă a codului numeric de intrare, se aplică la borna V_{REF} impulsuri dreptunghiulare și se măsoară *Slew-Rate* pe ecranul unui osciloscop catodic (Vezi *LUCRARE DE LABORATOR CCSM-02*, pct.4.2.4).

6. ÎNTREBĂRI

- 6.1. Care este principiul de funcționare al *DAC*, în general, și al celor cu generatoare de curenți ponderați, în particular?
- 6.2. Ce relație trebuie să existe între erorile relative și absolute ale celor n (n = număr biți) generatoare de curent ale unui *DAC*, pentru ca să fie asigurată cu certitudine monotonia?