

CIRCUITE DE CONDIȚIONARE A SEMNALELOR

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

II.3. AMPLIFICATOARE PENTRU SAPD

II.3.1. AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE

Amplificatorul operațional (AO) este un circuit integrat de bază, indispensabil în majoritatea aplicațiilor care implică prelucrarea analogică a semnalelor, regăsindu-se inclusiv în structura circuitelor de eșantionare-memorare, conversie analog-numerică și numeric-analogică.

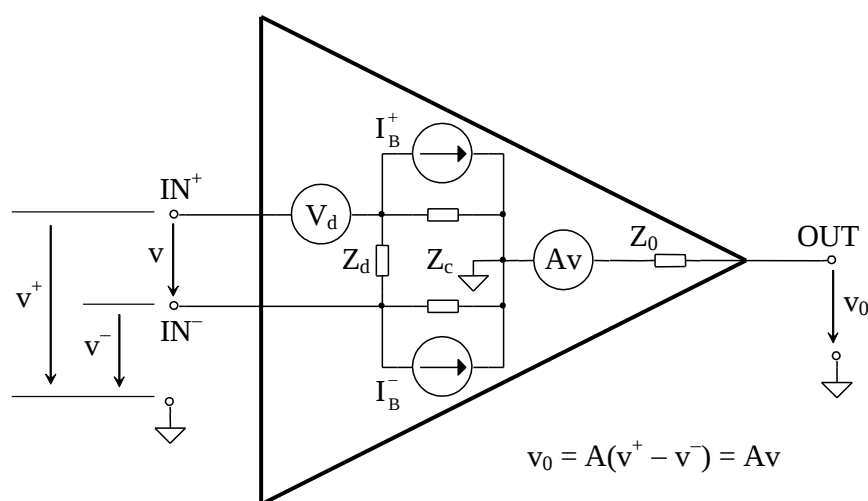


Fig.II.4. Schema echivalentă a unui amplificator operațional real.

AO este un amplificator diferențial constituit din mai multe etaje de amplificare, realizate cu tranzistoare bipolare sau cu efect de câmp, fiind caracterizat în regim static de parametrii principali conform schemei echivalente, unde V_d reprezintă tensiunea de decalaj la intrare ($10\text{-}25\ \mu\text{V}\dots 1\text{-}2\ \text{mV}$), I_B^+ , I_B^- – curenții de intrare ($0,003\dots 200\ \text{nA}$), A – amplificarea ($10^4\dots 10^7$), Z_d – impedanța de mod diferențial ($10^8\dots 10^{12}\ \Omega$), Z_c – impedanțele de mod comun ($10^9\dots 10^{12}\ \Omega$), Z_0 – impedanța de ieșire (zeci-sute de Ω). În plus, în funcție de aplicație, mai pot fi considerați și parametrii de zgomot care în schema echivalentă pot fi reprezentați printr-o sursă tensiune de zgomot (v_n) în serie cu V_d și două generatoare de curent de zgomot (i_n^+ , i_n^-) plasate în paralel cu I_B^+ , I_B^- .

AO nu se utilizează în buclă deschisă decât ca comparator. În rest, AO se utilizează în buclă închisă, adică cu reacție negativă în aplicațiile de amplificare sau cu reacție pozitivă în oscilatoare.

În cazul schemelor cu reacție este foarte complicat să se ia în considerare toți parametrii reali ai unui AO, motiv pentru care se operează cu noțiunea de AO ideal. Prin idealizare se neglijează toți parametrii AO real, considerând A , Z_d , $Z_c = \infty$ și V_d , I_B^+ , I_B^- , i_n^+ , i_n^- , $Z_0 = 0$, deoarece pe de o parte valorile parametrilor AO real permit așa ceva, iar pe de altă parte reacția negativă acționează în același sens. În cazul în care, într-o anumită aplicație, unul sau mai mulți parametri ai AO real devin critici și nu pot fi neglijați, se consideră în calcul, pe rând, numai câte unul și apoi se sumează efectele, în baza principiului *metodei superpoziției* sau *suprapunerii efectelor*.

În regim dinamic, în principiu, toți parametrii AO real depind de frecvența de lucru. În

general, AO prezintă în buclă deschisă o caracteristică amplificare-frecvență de tipul cu un singur pol, plasat de regulă la frecvența de 5 Hz, conform Fig.II.5. Pentru estimarea benzii de frecvență în buclă închisă se utilizează parametrul numit *bandă de frecvență la amplificarea unitară* sau *produs amplificarea bandă*. De exemplu, dacă banda de frecvență la amplificarea unitară este 1 MHz, iar amplificarea în buclă închisă este $a_{bi} = 10$, rezultă banda în buclă închisă $1 \text{ MHz} / 10 = 100 \text{ kHz}$.

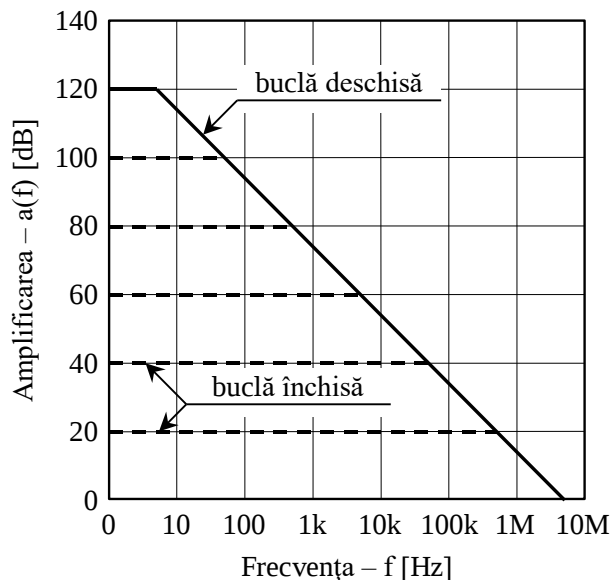


Fig.II.5. Caracteristica tipică amplificare-frecvență a AO.

În concluzie, exceptând funcția de comparator, în restul aplicațiilor AO se utilizează în buclă închisă. Privind funcția de amplificare sunt consacrate 4 configurații tipice de amplificatoare cu AO: inversor, neinversor, repetor și diferențial. În continuare se prezintă doar primele trei configurații de bază, conform Fig.II.6, urmând ca amplificatorul diferențial să fie tratat la pct.II.3.2.1.

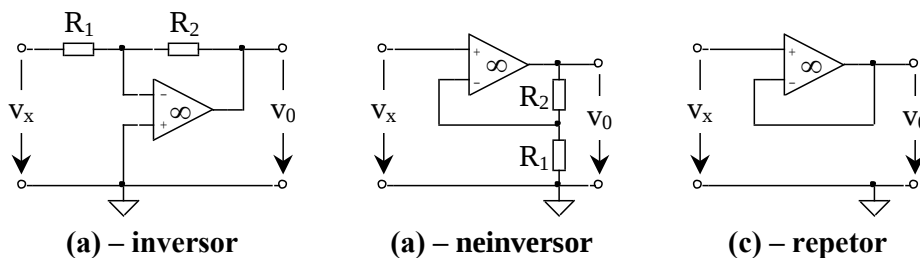


Fig.II.6. Configurații de amplificatoare cu AO.

AO ideal este marcat cu simbolul ∞ , semnificând $A = \infty$. Deci amplificarea fiind considerată infinită rezultă tensiune diferențială zero. Altfel spus intrările AO ideal sunt echipotențiale. În aceste condiții curenții prin R_1 , R_2 fiind egali (curenții de intrare ai AO ideal sunt nuli), rezultă următoarele expresii pentru tensiunile de ieșire, respect pentru factorii de amplificare a celor 3 configurații:

$$(a) - \text{inversor:} \quad \frac{v_x}{R_1} + \frac{v_0}{R_2} = 0 \Rightarrow v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_x \Rightarrow A = \frac{v_0}{v_x} = -\frac{R_2}{R_1}; \quad (\text{II.17})$$

$$(b) - \text{neinversor:} \quad \frac{v_x}{R_1} = \frac{v_0}{R_1 + R_2} \Rightarrow v_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_x \Rightarrow A = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad (\text{II.18})$$

$$(c) - \text{repetor:} \quad v_0 = v_x \Rightarrow A = 1. \quad (\text{II.19})$$

Un alt parametru important care poate fi estimat direct din *Fig.II.6* este rezistența de intrare, (R_{in}), care are valorile: $R_{in} = R_1$ pentru montajul inversor, $R_{in} \approx Z_c$ pentru montajul neinversor și $R_{in} = Z_c$ pentru montajul repetor. Montajul repetor este un caz limită de amplificator neinversor ($R_1 = \infty$), care având $A = 1$ se utilizează în scopul asigurării unei impedanțe mari de intrare.

II.3.2. AMPLIFICATOARE DE INSTRUMENTAȚIE

Amplificatorul de instrumentație (*AI*) este destinat pentru aparatura de măsurare. Condiția esențială care trebuie îndeplinită de un amplificator pentru a intra în categoria *AI* este ca intrare să fie diferențială. Această condiție este necesară pentru a se asigura rejecția tensiunilor de mod comun, care pot fi tensiuni parazite sau care apar implicit atunci când se efectuează diferența a două tensiuni de semnal, cum ar cazul măsurării tensiunii de dezechilibru dintr-o punte (pct.II.2.2).

AI este un ansamblu constituit din etaje de amplificare diferențiale, realizate cu rețele rezistive de precizie, calibrate și stabile, prevăzute în mod obligatoriu cu reacție negativă, care poate fi de tensiune sau de curent. *AI* cu reacție negativă de tensiune pot fi realizate ca structuri, având la bază *AO*, cu componente discrete sau sub formă de circuite hibride cu amplificare variabilă prin comenzi electrice. Spre deosebire de acestea, *AI* cu reacție negativă de curent sunt realizate numai sub formă de circuite integrate (monolitice) cu amplificare de asemenea variabilă. Din aceste considerente, în cele ce urmează, vor fi analizate numai *AI* cu reacție negativă de tensiune.

II.3.2.1. Amplificatorul diferențial

Amplificatorul diferențial (*AD*) este cea mai simplă structură de amplificator cu *AO* care îndeplinește condiția impusă *AI*, să aibă intrare diferențială. Celelalte configurații de amplificatoare cu *AO* (inversor, neinversor și repetor, pct.II.3.21), având o singură intrare de semnal, cealaltă fiind conectată la masă sau în bucla de reacție, nu asigură rejecția tensiunilor de mod comun. Totuși sunt utilizate și acestea în cadrul *SAPD*, dar pentru alte operații care nu necesită *AI*.

Schema de principiu a *AD* este reprezentată în *Fig.II.7*. Constituind un bloc de bază pentru *AI*, trebuie determinat și raportul de rejecție al modului comun (*RRMC*). În cazul amplificatoarelor se obișnuiește exprimarea *RRMC* funcție de amplificarea pe mod diferențial (A) și de amplificarea pe mod comun (A_c), definite astfel:

$$A = \frac{v_0}{v}, \quad \text{respectiv} \quad A_c = \frac{v_0}{v_c}, \quad (\text{II.20})$$

unde v_0 este tensiunea de ieșire, v – tensiunea diferențială de intrare, iar v_c – tensiunea de mod comun. Considerând (II.20) expresia *RRMC* rezultă:

$$RRMC = \frac{v_c}{v} = \frac{v_0/A_c}{v_0/A} = \frac{A}{A_c}, \quad (\text{II.21})$$

deci determinarea *RRMC* presupune cunoașterea factorilor A și A_c .

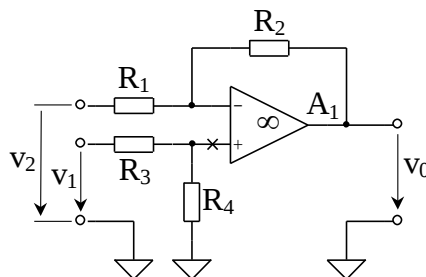


Fig.II.7. Schema de principiu a amplificatorului diferențial.

Considerând A_1 ideal ($A = \infty$, $V_d = 0$, $I_B^+ = I_B^- = 0$), pentru calculul amplificării este convenabil să se utilizeze faptul că intrările AO ideal sunt echipotențiale:

$$v_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4} = v_2 + (v_0 - v_2) \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (\text{II.22})$$

adică:

$$v_0 = v_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} - v_2 \frac{R_2}{R_1}. \quad (\text{II.23})$$

Pentru ca amplificatorul să fie diferențial și a se asigura compensarea efectului curenților de intrare ai AO, trebuie îndeplinite condițiile:

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_1}; \quad R_2 \parallel R_1 = R_4 \parallel R_3; \quad (\text{II.24})$$

din care rezultă:

$$\begin{matrix} R_1 = R_3 \\ R_2 = R_4 \end{matrix} \quad \text{și} \quad v_0 = \frac{R_2}{R_1} (v_1 - v_2) = A(v_1 - v_2), \quad \text{deci} \quad A = \frac{v_0}{v_1 - v_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (\text{II.25})$$

Plecând de la $RRMC$ al A_1 , $RRMC_A$, trebuie calculat $RRMC$ pentru AD . În acest scop se consideră $v_1 = v_2 = v_c$, iar conform definiției $RRMC$ se consideră la intrarea A_1 (punctul $\times$ în Fig.II.7) o tensiune echivalentă serie, v_e , conform relației:

$$v_e = v_c \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{1}{RRMC_A}. \quad (\text{II.26})$$

Cu observațiile de mai sus, (II.22) devine:

$$v_c \frac{R_4}{R_3 + R_4} + v_c \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{1}{RRMC_A} = v_c + (v_0 - v_c) \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (\text{II.27})$$

Exprimând rapoartele de rezistențe în funcție de $k = R_2/R_1 = R_4/R_3$, unde $k = A$, din (II.27) rezultă amplificarea tensiunii de mod comun, A_c , conform relației:

$$A_c = \frac{v_0}{v_c} = \frac{k}{RRMC_A} = \frac{A}{RRMC_A}, \quad (\text{II.28})$$

care împreună cu (II.21) conduce la expresia $RRMC$ pentru AD :

$$RRMC = \frac{A}{A_c} = RRMC_A, \quad (\text{II.29})$$

deci $RRMC$ al AD este egal cu $RRMC_A$ al AO utilizat.

$RRMC$ al AD este afectat de abaterea rezistențelor de la condiția de calcul (II.25) datorită toleranțelor. Pentru a estima cantitativ acest aspect se consideră $v_1 = v_2 = v_c$ și $RRMC_A = \infty$ (valoare

corespunzătoare unui AO ideal din punct de vedere al $RRMC$) și se introduc notațiile:

$$k_1 = \frac{R_2}{R_1} = k(1-\delta) \quad \text{și} \quad k_2 = \frac{R_4}{R_3} = k(1+\delta); \quad (\text{II.30})$$

care aplicate în (II.23) conduc la expresia:

$$v_0 = v_c \frac{k_2 - k_1}{1 + k_2} = \frac{2k\delta}{1 + k(1+\delta)} v_c, \quad (\text{II.31})$$

deci:

$$A_c = \frac{v_0}{v_c} = \frac{2k\delta}{1 + k(1+\delta)}, \quad (\text{II.32})$$

iar raportul de rejecție calculat funcție de toleranțele rezistențelor, $RRMC_R$, rezultă:

$$RRMC_R = \frac{k}{A_c} = \frac{A}{A_c} = \frac{1 + k(1+\delta)}{2\delta}. \quad (\text{II.33})$$

Pentru $\delta \ll 1$, (II.33) poate fi aproximată printr-o formă mai simplificată, astfel:

$$RRMC_R = \left| \frac{1+k}{2\delta} \right| = \left| \frac{1+A}{2\delta} \right|. \quad (\text{II.34})$$

Deci $RRMC_R$ este direct proporțional cu amplificarea pe mod diferențial și invers proporțional cu abaterea rezistențelor de la valorile de calcul. Pentru $k = 1$ și $\delta = 0,1\%$ ($\Delta R/R = 0,05\%$) rezultă $RRMC_R = 1000$ sau 60 dB, valoare deseori insuficientă. De exemplu o tensiune de mod comun de 10 V generează pe mod diferențial o tensiune echivalentă de 10 mV care se suprapune peste tensiunea utilă. Astfel, nu pot fi valorificate performanțele AO care prezintă $RRMC_A > 120$ dB.

Amplificatorul diferențial prezintă o serie de dezavantaje care îi limitează utilizarea cum ar fi:

- impedanțele de intrare sunt de valoare redusă și diferite: R_1 la intrarea inversoare și $(R_3 + R_4)$ la intrarea neinversoare, fapt ce afectează negativ rejecția de mod comun;
- reglare dificilă a amplificării, fiindcă presupune reglarea cel puțin a unei perechi de rezistențe, pentru a respecta condițiile (II.24) sub forma (II.25), având în vedere că abaterea rezistențelor nu afectează doar amplificarea, ci și rejecția de mod comun.

O soluție eficientă de mărire și egalizare a impedanței de intrare este adăugarea unor repetoare de tensiune la intrare. Aceste repetoare permit și conectarea unor inele sau ecrane de gardă pentru intrările de semnal, conform Fig.II.8, unde s-a considerat conectarea surselor de semnal prin cabluri coaxiale. Pe de altă parte conectarea ecranelor de gardă la ieșirea repetoarelor menține o diferență de potențial nulă între ecranul cablului și conductorul central și elimină astfel posibilitatea închiderii unor curenți paraziți prin capacitatea parazită sau rezistența de izolație a cablului coaxial.

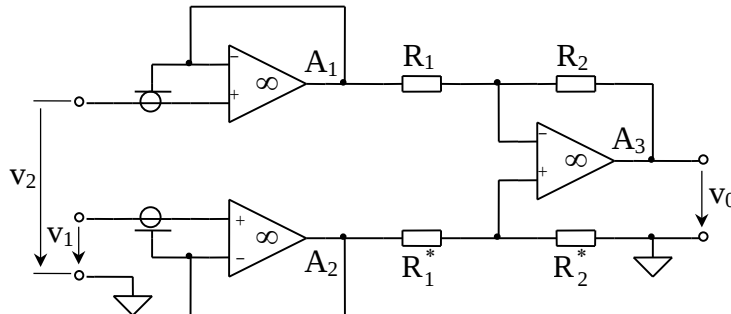


Fig.II.8. Amplificatorul diferențial cu repetoare la intrare.

Pe lângă intrare diferențială un AI trebuie să mai prezinte și impedanțe de intrare egale și de valoare ridicată. În cazul AD această problemă s-a rezolvat cu repetoare de tensiune rezultând o structură de AI cu 3 AO, care prezintă un raport complexitate-performanțe mai redus decât alte soluții cunoscute. Una din aceste soluții, mai economică, o constituie varianta de bază a AI realizată cu 2 AO, iar o altă soluție, mai performantă, o constituie varianta clasică de AI realizată cu 3 AO.

II.3.2.2. Amplificator de instrumentație – varianta cu 2 AO

Conform schemei de principiu din Fig.II.9, acest tip AI este constituit din două etaje neinversoare, primul cu referința la masă, iar al doilea cu referința la ieșirea celui dintâi (v_{01}).

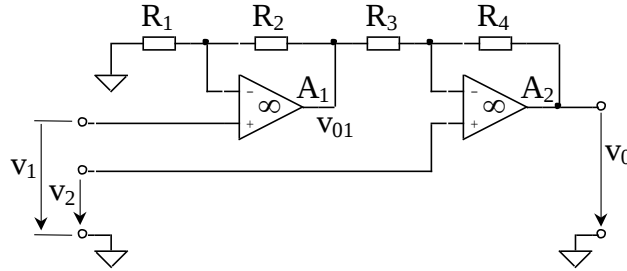


Fig.II.9. Amplificator de instrumentație – varianta cu două AO.

Deoarece intrările AO ideal sunt echipotențiale, se pot scrie relațiile:

$$v_{01} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_1, \quad \text{respectiv} \quad v_2 = v_{01} + \frac{R_3}{R_3 + R_4}(v_0 - v_{01}), \quad (\text{II.35})$$

pe baza cărora rezultă expresia tensiunii de ieșire în funcție de v_1 și v_2 :

$$v_0 = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)v_2 - v_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3}. \quad (\text{II.36})$$

Impunând în (II.36) condiția ca AI să fie diferențial, adică să prezinte aceeași amplificare pe ambele intrări, rezultă:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{sau în particular} \quad R_1 = R_4 \text{ și } R_2 = R_3, \quad (\text{II.37})$$

pe baza căreia (II.36) devine:

$$v_0 = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)(v_2 - v_1) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(v_2 - v_1). \quad (\text{II.38})$$

Acest tip de AI, deși are rezistență de intrare simetrică și de valoare ridicată, nu are simetrie diferențială completă, prezentând o serie de dezavantaje, cum ar fi:

- imposibilitatea de a funcționa cu amplificare unitară ($R_4, R_1 = 0$ sau $R_3, R_2 = \infty$), motiv pentru care amplificarea este limitată uzual la valoarea $A_{\min} = 5$;
- RRMC în c.a. redus, datorită faptului că la intrările amplificatorului A_2 tensiunile v_1 și v_2 ajung cu defazaje sau întârzieri inegale (v_2 se aplică direct, iar v_1 prin A_1).

II.3.2.3. Amplificator de instrumentație – varianta cu 3 AO

Această variantă întrunește complet condițiile necesare pentru această categorie de amplificatoare, constituind modelul tipic de AI cu reacție negativă de tensiune realizat cu AO în structură discretă sau hibridă. Acest AI provine din AD cu repetoare la intrare prin transformarea repetoarelor în

amplificatoare neinversoare. Prin urmare, conform schemei de principiu din Fig.II.10, este constituit dintr-un etaj neinversor simetric de intrare realizat cu A_1 , A_2 și un etaj diferențial realizat cu A_3 . Considerând AO ideale și $R_1 = R_1^*$, rezultă amplificarea etajului de intrare A_1 , A_2 :

$$A_{12} = \frac{v_{11} - v_{22}}{v_1 - v_2} = \frac{R_1 + R + R_1^*}{R} = 1 + \frac{2R_1}{R}. \quad (\text{II.39})$$

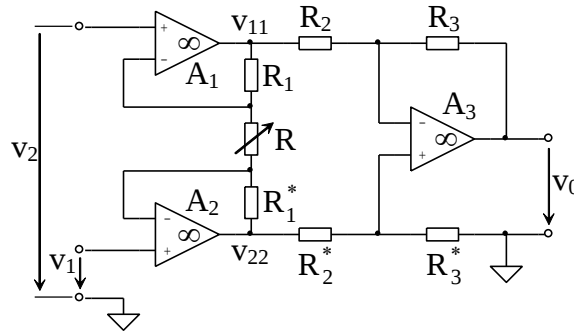


Fig.II.10. Amplificator de instrumentație – varianta cu trei AO.

Având în vedere (II.39) și expresia amplificării AD (II.25), se obține:

$$v_0 = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) \frac{R_3}{R_2} (v_1 - v_2) = A(v_1 - v_2), \text{ deci } A = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) \frac{R_3}{R_2}. \quad (\text{II.40})$$

În acest caz amplificarea poate fi modificată fără efecte secundare negative, acționând numai asupra etajului de intrare prin reglarea unei singure rezistențe (R).

Pentru calculul $RRMC$ se poate observa că pentru un semnal de mod comun amplificarea etajelor de intrare A_1 și A_2 este egală cu unitatea, fiindcă ambele devin repetoare, în timp ce pentru un semnal pe mod diferențial amplificarea acestor etaje are valoarea $(1 + 2R_1/R)$, care de regulă este supraunitară. Ca urmare, pe mod comun (pentru $v_1 = v_2 = v_c$) intervine numai amplificarea AD care pe baza (II.28) are expresia:

$$A_c = \frac{v_0}{v_c} = \frac{R_3}{R_2} \frac{1}{RRMC_3}, \quad (\text{II.41})$$

unde $RRMC_3$ se referă la AO din structura AD (A_3). Cunoscând amplificările pe mod diferențial și comun (II.40) și (II.41), se obține expresia $RRMC$ pentru acest tip de AI:

$$RRMC = \frac{A}{A_c} = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) RRMC_3. \quad (\text{II.42})$$

Deci $RRMC$ al AI cu trei AO crește față de cel al AD proporțional cu amplificarea etajelor de intrare $(1 + 2R_1/R)$, fiind de preferat ca aceasta să aibă valoare cât mai mare.

Deoarece în cazul AI este necesară de regulă amplificarea variabilă, în Fig.II.11 se prezintă o soluție concretă în acest sens aplicată în fabricație de firma *Burr-Brown*.

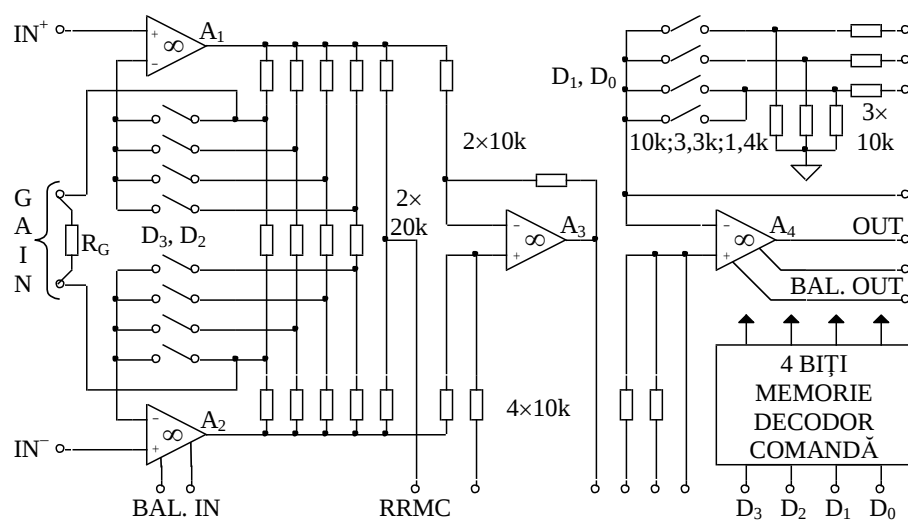


Fig.II.11. Schema de principiu a amplificatorului instrumental BB 3606.

Față de schema minimală (Fig.II.10), în Fig.II.11 mai apare un etaj tampon de ieșire în configurație neinversoare (A_4), posibil de utilizat separat sau împreună cu amplificatorul de bază, o serie de conexiuni electrice fiind la latitudinea utilizatorului. Amplificarea este prescrisă prin comandă numerică, utilizând 4 biți ($D_3...D_0$) pentru comanda câștigului în 11 trepte organizate în progresie geometrică, între 1 și 1024, atât pe etajul de intrare (A_1, A_2) prin comutarea rezistențelor din rețeaua de reacție sau conectarea unei rezistențe externe R_G , cât și pe etajul de ieșire (A_4). Amplificatorul BB 3606 mai este prevăzut cu borne exterioare pentru reglarea offsetului la intrare: *BAL.IN* și la ieșire: *BAL.OUT* și pentru legarea ecranelor de gardă: *RRMC*. Prin conexiuni externe se poate plasa un condensator în rețeaua de reacție a etajului A_4 .