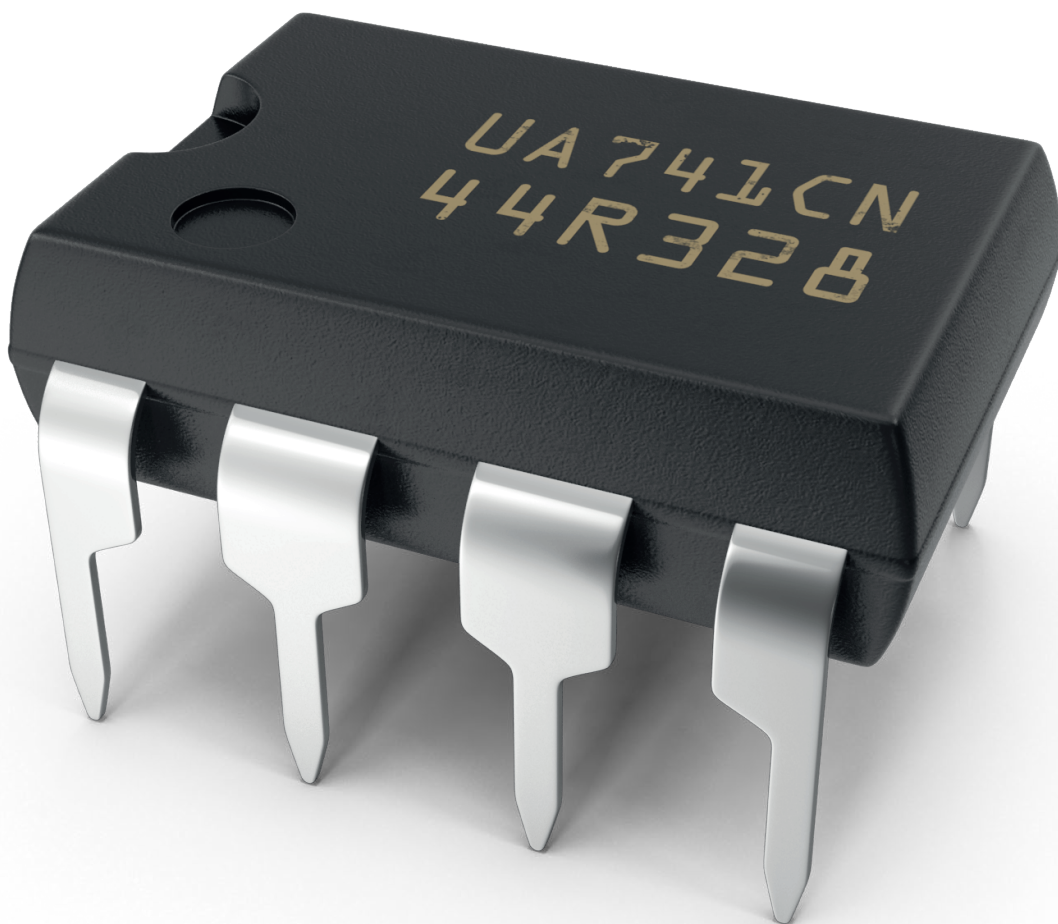
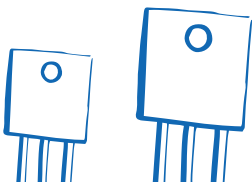


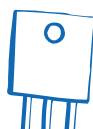
Science Stories



Amplificatorul operațional

Bogdan Gewald

Amplificatorul operațional



Cuprins

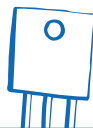
Prefață și cuvânt însoțitor	8
Prefața la prima ediție	8
1 Introducere	9
1.1 Scurt istoric al amplificatorului operațional	9
1.2 Obiective pedagogice și concept didactic	10
2 Bazele amplificatorului operațional	12
2.1 Proprietăți	12
2.1.1 Funcționare și mărimi caracteristice	12
2.1.2 Variante de capsule	25
2.2 Principiile AO și analiza circuitelor	27
2.3 Circuite amplificatoare de bază	29
2.3.1 Principiul reacției negative	29
2.3.2 Amplificatorul neinversor și repetorul de tensiune	31
2.3.3 Amplificatorul inversor	33
2.4 Măsurile de compensare și optimizarea componentelor	34
2.4.1 Compensarea curentului de polarizare la intrare	34
2.4.2 Compensarea tensiunii de decalaj la intrare	35
2.4.3 Compensarea răspunsului în frecvență	36
2.4.4 Optimizare și diversitate funcțională	39
2.4.5 Module analogice programabile	40
2.5 Tensiuni de mod comun în aplicațiile cu AO	41
2.5.1 Tensiunea de mod comun pe exemplul amplificatorului de instrumentație	41
2.5.2 Instrumentation Amplifier Diamond Plot Tool	44
2.5.3 Aplicație cu amplificator de instrumentație și punte completă	46
2.6 Surse de erori în circuite	49
2.6.1 Masa și deplasarea de potențial	49
2.6.2 Impedanțe	53
2.6.3 Tensiunea termoelectrică	54
2.6.4 Zgomotul	55
3 Aplicațiile amplificatorului operațional	60
3.1 Diversitatea aplicațiilor	60
3.2 Măsurile de răcire	61
3.3 Considerații privind fiabilitatea	66
4 Circuite analogice de calcul	76
4.1 Sumatorul	76
4.2 Circuitul de scădere	78
4.3 Integratorul	82
4.4 Derivatorul	86
4.5 Circuitul de logaritmare	89
4.6 Circuitul de exponențiere	94





4.7	Multiplicatorul și divizorul	97
5	Circuite de comutare	103
5.1	Comparatorul	103
5.2	Comparatorul cu fereastră	105
5.3	Triggerul Schmitt.	107
6	Circuite oscilatoare	114
6.1	Multivibrator astabil cu trigger Schmitt.	114
6.2	Oscilator triunghi-dreptunghi	119
6.3	Oscilatorul comandat în tensiune (VCO)	122
6.3.1	VCO1 cu circuit de scădere.	123
6.3.2	VCO2 cu integrator sumator	125
6.3.3	VCO3 cu tensiune de alimentare nesimetrică	128
6.4	Bucă cu calare de fază (PLL)	133
6.5	Modulatorul PWM.	137
7	Circuite de condiționare și de conversie	140
7.1	Amplificatorul de instrumentație	140
7.2	Defazorul	144
7.3	Redresorul	148
7.4	Convertoare analog-numerice și numeric-analogice	151
7.4.1	Convertoare analog-numerice	154
7.4.2	Convertoare numeric-analogice	159
7.5	Amplificatorul de sarcină.	163
7.6	Fotoreceptorul	170
7.7	Convertorul de impedanță negativă (NIC) și giratorul	173
7.7.1	Convertorul de impedanță negativă	173
7.7.2	Giratorul	174
7.8	Amplificatoare și rezistoare reglabile	177
7.8.1	Amplificatoare reglabile	177
7.8.2	Rezistoare reglabile și reglarea cu CNA	180
7.9	Amplificatorul de izolare	185
8	Circuite de reglare	196
8.1	Privire de ansamblu	196
8.1.1	Bucă de reglare	197
8.1.2	Moduri de descriere a sistemelor	199
8.2	Tipuri de regulatoare și exemple de circuite	203
8.3	Proiectarea regulatorului pe exemplul PID	210
8.3.1	Procedura	211
8.3.2	Exemplu de regulator	212
9	Circuite de filtrare	215
9.1	Privire de ansamblu	215
9.2	Filtre RC active	216
9.2.1	Filtre cu reacție negativă simplă	219
9.2.2	Filtre cu reacție negativă multiplă	221





9.2.3	Filtre cu reacție pozitivă simplă	225
9.3	Filtre cu capacități comutate (SC)	227
9.3.1	Principiul de funcționare	227
9.3.2	Exemplu: filtru SC de ordinul 2	228
9.3.3	Filtre SC integrate	230
9.4	Proiectarea aplicațiilor de filtrare cu mai multe etaje	233
9.4.1	Filtru trece-jos de ordinul 4 dimensionat cu un instrument de proiectare a filtrelor	233
9.4.2	Filtru trece-bandă de bandă largă programabil, cu circuite Sallen-Key după principiul Equal Components, proiectat prin simulare.	237
10	Circuite de stabilizare și managementul energiei	249
10.1	Privire de ansamblu asupra stabilizării tensiunii	249
10.1.1	Principiul stabilizării cu AO.	253
10.1.2	Exemplu: regulatorul de tensiune universal	256
10.2	Recuperarea energiei din mediu (energy harvesting) pe exemplul generatorului termoelectric	259
10.3	Sistemul de management al energiei bazat pe Power Management Classification.	264
10.4	Surse de curent constant	271
11	Amplificatoare operaționale de putere	275
11.1	Structură și proprietăți	275
11.2	Variante de funcționare	277
11.2.1	Tensiune de alimentare simetrică	277
11.2.2	Tensiune de alimentare nesimetrică	277
11.2.3	Montajul în punte	281
11.3	Schema echivalentă de reacție	283
11.4	Amplificatoare operaționale de înaltă tensiune	287
12	Aplicații în tehnica aerospațială	295
12.1	Influențe specifice asupra componentelor electronice	295
12.2	Aplicații în satelitul BIROS	300
12.2.1	Sistemul BIROS	301
12.2.2	Exemple de circuite din sistemul energetic	304
12.3	Aplicații în experimentul cu balon BEXUS-IMUFUSION	311
12.3.1	Sistemul BEXUS-IMUFUSION	312
12.3.2	Exemplu de circuit: front-end analogic AFE	314
12.4	Aplicații în experimentul cu balon BEXUS-ELFI	321
12.4.1	Sistemul BEXUS-ELFI	321
12.4.2	Exemplu de circuit: front-end analogic AFE	322
	Bibliografie	334





2 Bazele amplificatorului operațional

Capitolul de față explică structura și modul de funcționare ale amplificatorului operațional. Se face o comparație între componenta ideală și cea reală și se prezintă măsurile necesare pentru reducerea influenței erorilor. Sunt descrise, de asemenea, metode alese de analiză a circuitelor, principiul reacției negative și circuitele fundamentale de amplificare. Prezentarea este completată de indicații privind proiectarea circuitelor.

2.1 Proprietăți

2.1.1 Funcționare și mărimi caracteristice

Amplificatorul operațional (AO; în literatura germană OPV, OV), în engleză Operational Amplifier (OpAmp, OPA), este o componentă analogică integrată: un amplificator de curent continuu cu cuplaj direct și cu mai multe etaje. Datorită proprietăților sale aproape ideale – în special amplificarea foarte mare în buclă deschisă, care permite aplicarea principiului reacției negative – și marii varietăți de variante, domeniul său de aplicații este extrem de larg.

Structură, simbol grafic, tensiuni de alimentare

Din punct de vedere tehnologic, elementele amplificatorului operațional realizat monolitic pot fi de tip unipolar și/sau bipolar și sunt dispuse de regulă într-o **structură** internă cu trei etaje. Figura 2.1 prezintă schema generală, cu terminalele care există în orice caz. În funcție de varianta de AO și de capsulă, se pot adăuga un terminal de masă, terminale pentru compensarea erorilor (compensarea tensiunii de decalaj, compensarea în frecvență), vezi secțiunea 2.4, sau terminale multiplicat (capsule cu mai multe AO). Etajele sunt etajul diferențial de intrare, etajul de comandă (driver) sau intermediar și etajul de ieșire.

Produsul amplificărilor lor în tensiune dă amplificarea foarte mare în buclă deschisă (Open Loop Gain) a AO. Pe lângă etajele de amplificare, AO conține și alte subcircuite, de exemplu pentru alimentarea cu tensiune și curent, pentru optimizarea domeniului de comandă al intrării și a domeniului de excursie al ieșirii, pentru stabilizarea dinamică sau ca circuite de protecție – despre acestea, mai târziu.

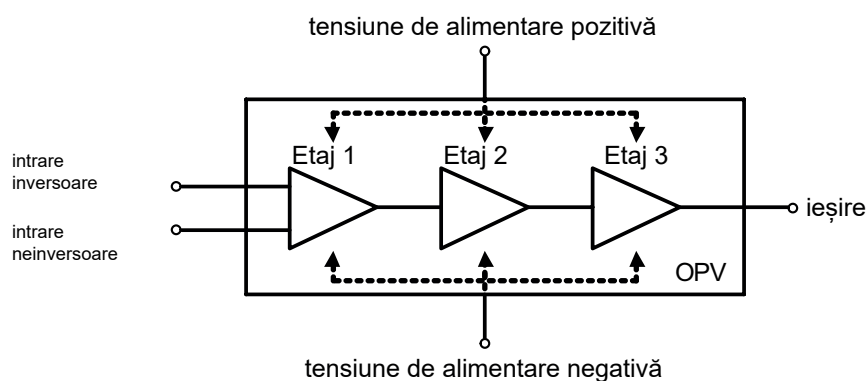
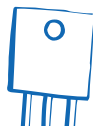


Figura 2.1 Structura generală cu trei etaje a AO

Privit ca o cutie neagră (black box), amplificatorul operațional se reprezintă prin **simbolul grafic**. Figura 2.2 prezintă cele două variante uzuale. Forma triunghiulară (mai veche) indică direct sensul de transmitere a





semnalului, iar varianta dreptunghiulară, vezi EN 60617-13:1993, [S9], are mici simboluri care marchează un amplificator cu amplificare (ideal) infinită în buclă deschisă. De regulă sunt indicate intrarea neînversoare și cea inversoare (ideal, defazaj de 180° față de ieșire), precum și ieșirea unui AO obișnuit, de tip VV (vezi tabelul 2.1). Marcajul unui alt tip de AO și terminalele suplimentare, de exemplu pentru tensiunile de alimentare sau pentru măsurile de compensare, se adaugă la nevoie. În carte se folosește forma triunghiulară.

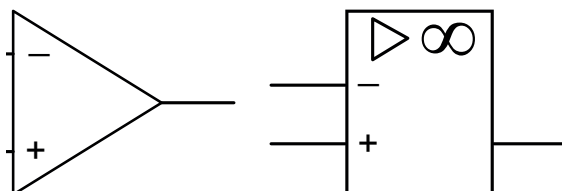


Figura 2.2 Simbolul grafic triunghiular și cel dreptunghiular, [S9]

Un amplificator operațional are nevoie de o **tensiune de alimentare pozitivă** V_{s+} și de o **tensiune de alimentare negativă** V_{s-} , cu potențial mai coborât. Existența alimentării se presupune de regulă, astfel încât terminalele de alimentare nu sunt reprezentate întotdeauna în simbol și în scheme. Se deosebesc două variante de conectare: a) alimentare simetrică, cu o tensiune pozitivă și una negativă, și b) alimentare nesimetrică (Single Supply), cu o tensiune pozitivă și masă, vezi și capitoul 11. Un AO Single Supply este optimizat pentru funcționarea cu o tensiune de alimentare nesimetrică (uneori mică), dar, în principiu, poate fi alimentat și simetric. La alimentarea simetrică, potențialul de masă, folosit ca punct de referință, se obține prin conectarea în serie a două surse de tensiune și prin priza mediană dintre ele. Variantele de alimentare sunt reprezentate în figura 2.3, care conține și o schiță a conectării unei surse de alimentare duble (două surse de tensiune independente) pentru obținerea tensiunilor $V_{s\pm}$. În plus, la terminalul de alimentare sunt indicate condensatoarele de decuplare C_{B1} și C_{B2} . Liniile de alimentare (traseele cablajului imprimat, cablajul backplane) au o inductanță care depinde de lungime și care, în regim dinamic, produce căderi de tensiune și, prin urmare, fluctuații ale tensiunii de alimentare la AO. Condensatoarele de decuplare compensează aceste fluctuații. Ele se montează aproape de circuitul integrat și constau de obicei dintr-un condensator electrolitic (impedanță mică la frecvențe joase, care însă crește cu frecvența din cauza inductanței parazite) și un condensator ceramic (impedanță mică și la frecvențe înalte). Uneori, foaia de catalog conține indicații privind condensatoarele de decuplare.

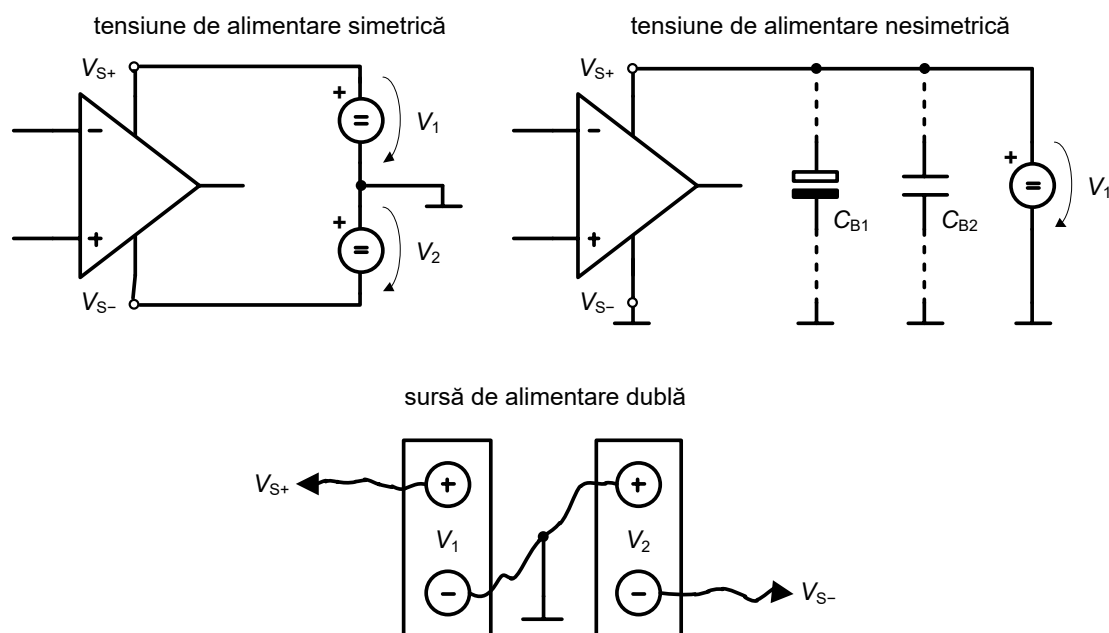


Figura 2.3 Variante de alimentare

Ordinea conectării și deconectării, consumul de curent, masa



Important

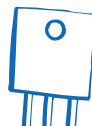
Pentru a evita posibila deteriorare a amplificatorului operațional printr-un raport nepermis între tensiunile de intrare și tensiunile de alimentare, în special pentru a menaja circuitul de protecție a intrărilor (Overvoltage Protection, OVP), tensiunile de alimentare trebuie conectate primele și deconectate ultimele. În plus, la prima punere în funcțiune a unui circuit, consumul de curent al componentei este folosit adesea ca un prim indiciu al funcționării corecte – valorile foarte mari indică nu rareori o problemă. În layoutul plăcii de circuit imprimat (nechipată: Printed Circuit Board, PCB; echipată: Printed Circuit Board Assembly, PCBA), conexiunile de masă trebuie realizate cu rezistență mică și în stea sau ca plan de masă (evitând buclele de masă), vezi exercițiul 3.4 privind deplasarea potențialului de masă, precum și secțiunea 2.6. Stratul de masă al unei plăci multistrat (Multilayer Board) poate servi și la ecranare (suprimarea cuplajului capacitiv).

Figura 2.4 prezintă un PCB pentru montaj experimental. Alături este sursa de curent constant comandată, ale cărei legi de funcționare sunt prezentate în secțiunea 10.4 și care este dimensionată, ca exemplu, pentru generarea unui semnal unificat de curent, vezi exercițiul 10.4.

Tipuri de AO

Există patru tipuri de amplificatoare operaționale. Ele rezultă din combinațiile posibile între un semnal





2 Bazele amplificatorului operațional

de tensiune (Voltage, V) sau un semnal de curent (Current, C) la intrarea inversoare și la ieșire. Tabelul 2.1 oferă o prezentare generală a acestor tipuri. Intrarea neinversoare are întotdeauna impedanță mare. Dacă în carte nu se precizează altfel, este vorba de tipul VV (voltage-voltage), cel mai des folosit. Intrările și ieșirile de curent sunt marcate în simbolul grafic. În [22] se găsesc explicații ample despre aceste tipuri.

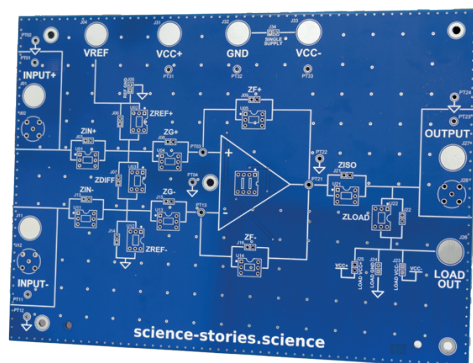
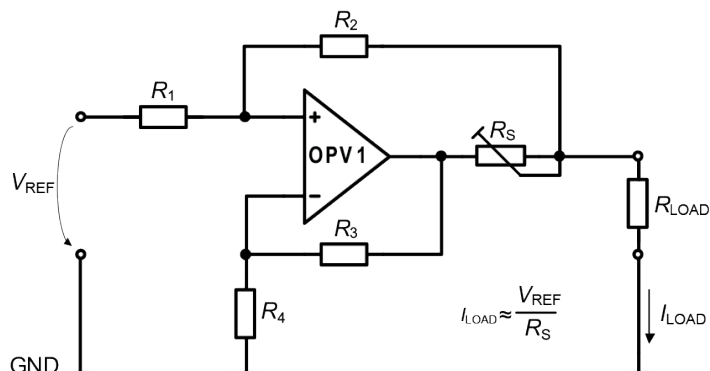


Figura 2.4 Montaj experimental al unei surse de curent constant comandate

Tabelul 2.1 Tipuri de amplificatoare operaționale

Intrare-ieșire	Denumire	Proprietăți
Voltage-Voltage	tip VV, tip normal, amplificator de tensiune	intrare de impedanță mare, ieșire de impedanță mică
Current-Current	tip CC, amplificator de curent	intrare de impedanță mică, ieșire de impedanță mare
Voltage-Current	tip VC, amplificator de transconductanță (Operational Transconductance Amplifier, OTA)	intrare de impedanță mare, ieșire de impedanță mare, folosit de preferință pentru comanda liniilor coaxiale
Current-Voltage	tip CV, amplificator de transimpedanță	intrare de impedanță mică, ieșire de impedanță mică, folosit de preferință ca amplificator video (lățime de bandă mare)

Notații, regimuri de funcționare

În continuare sunt explicate notațiile folosite la AO și cele două regimuri de funcționare. Se adoptă notații uzuale în literatura tehnică de limbă engleză: V pentru tensiune, I pentru curent, R pentru rezistență și C pentru capacitate. Litera mică r desemnează o rezistență diferențială în modelul de semnal mic. Indicii descriptivi se scriu cu litere drepte. Semnele + și – identifică intrarea neinversoare, respectiv intrarea inversoare; alimentările sunt identificate distinct prin indicii $S+$ și $S-$. Denumirile bornelor din foile de catalog se păstrează când se face referire directă la un circuit integrat.

Reprezentările nu țin încă seama de mărimile de eroare. Pentru schema echivalentă de semnal mic, vezi figura 2.5, se folosesc următoarele notații:

V_{S+}, V_{S-}	tensiunea de alimentare pozitivă și cea negativă
$V_{OUT}, I_{OUT}, r_{out}$	tensiunea și curentul de ieșire, rezistența dinamică de ieșire
V_{+}, I_{B+}	tensiunea și curentul la intrarea neinversoare
V_{-}, I_{B-}	tensiunea și curentul la intrarea inversoare
$V_{DIFF}, r_{in,d}$	tensiunea diferențială, rezistența de intrare diferențială între borne
V_{CM}	tensiunea de mod comun
$r_{in,cm}$	rezistența de intrare de mod comun între bornă și masă



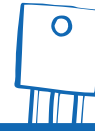
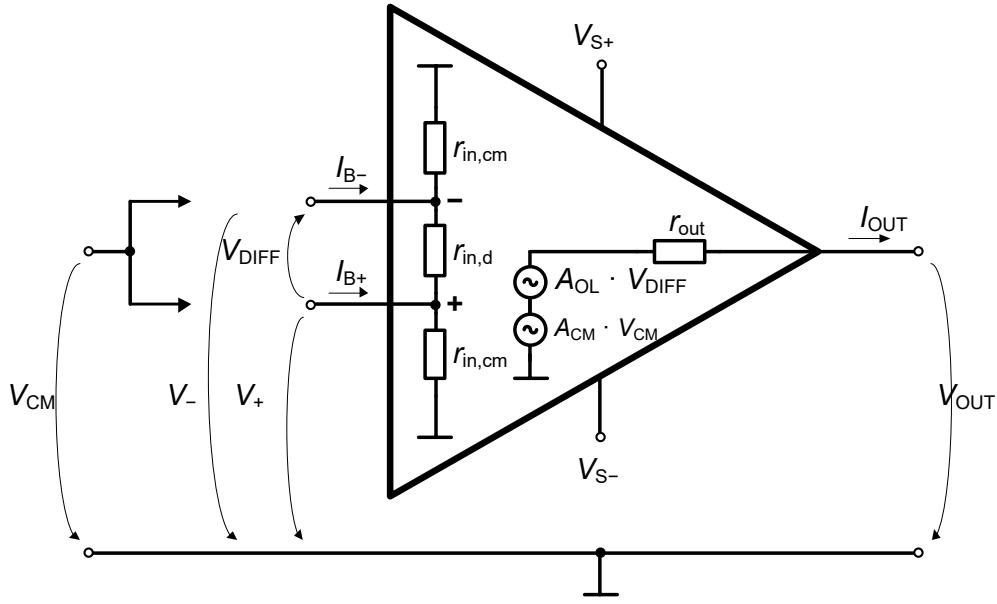


Figura 2.5 Notății la amplificatorul operațional

Regimul diferențial (numit și regim în contratimp, Differential Mode) se caracterizează prin amplificarea tensiunii diferențiale de intrare V_{DIFF} . În buclă deschisă (Open Loop, fără reacție negativă), amplificarea diferențială se notează A_{OL} (Open-Loop Gain), vezi relația (2.1). Ea depinde de frecvență, vezi secțiunea 2.4.3. Relația se aplică în regimul liniar, înainte de limitarea excursiei ieșirii, neglijând tensiunea de decalaj și influența modului comun.

Amplificarea în buclă deschisă, amplificarea diferențială:

$$A_{OL} = \frac{V_{OUT}}{V_{DIFF}} \quad (2.1)$$

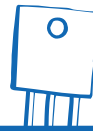
$$A_{OL,dB} = 20 \lg \left| \frac{V_{OUT}}{V_{DIFF}} \right|$$

cu: $V_{DIFF} = V_+ - V_-$. Semnul este ales astfel încât o creștere a tensiunii la intrarea neinvertoare, cu tensiunea intrării inversoare constantă, să producă o creștere a tensiunii de ieșire în regim liniar la frecvențe joase.

Dacă se comandă intrarea inversoare, cu intrarea neinvertoare legată la masă, raportul dintre variația tensiunii și variația curentului dă rezistența conexiunii în paralel a lui $r_{in,d}$ și $r_{in,cm}$. (Rezistența diferențială de intrare (differential input resistance), rezistența de intrare de mod comun (common-mode input resistance))

$$r_{in,d} \parallel r_{in,cm} = \left| \frac{\Delta V_-}{\Delta I_{B-}} \right| \quad (2.2)$$

Pentru determinarea rezistenței de intrare diferențiale, relația (2.2) reprezintă o bună aproximare în cazul etajelor de intrare bipolare, la care $r_{in,cm} \gg r_{in,d}$. La etajele unipolare, toate componentele rezistive sunt foarte mari și o distincție nu este necesară.



Rezistența de ieșire în buclă deschisă (Open Loop); pentru buclă închisă (Closed Loop), vezi relația (2.9):

$$r_{\text{out}} = \frac{\Delta V_{\text{OUT}}}{\Delta I_{\text{OUT}}} \quad (2.3)$$

În așa-numitul **regim de mod comun** (Common Mode), ambele intrări sunt influențate de un semnal de mod comun, tensiunea de mod comun V_{CM} , vezi caseta următoare.

Semnal de mod comun



Important

Un semnal de mod comun acționează simultan asupra ambelor intrări, cu aceeași amplitudine, cu aceeași polaritate și cu aceeași fază. El poate apărea ca semnal perturbator, prin cuplare pe ambele terminale (perturbație de mod comun), poate fi provocat de deplasarea simultană, cauzată termic, de tip derivă, a punctelor de funcționare ale etajului diferențial de intrare simetric al amplificatorului operațional sau poate exista ca tensiune peste care este suprapus semnalul util, vezi de exemplu măsurarea curentului pe partea de potențial ridicat (High-Side) din secțiunea 12.2.2. Efectele sale asupra ieșirii sunt nedorite și sunt suprimate (printr-o amplificare de mod comun mică). Un semnal de mod comun poate fi cuplat, de exemplu, ca semnal perturbator, de la conductoarele învecinate în cele două conductoare de conectare ale intrărilor. Diferența de tensiune dintre cele două intrări (semnalul diferențial), folosită de utilizator ca semnal util, rămâne însă neschimbată în cazul unei perturbații de mod comun. Acest avantaj este exploatat în sistemele de magistrală care funcționează în regim diferențial. Informații despre regimul de mod comun și despre diagrama Diamond Plot se găsesc în secțiunea 2.5.

Amplificarea de mod comun:

$$A_{\text{CM}} = \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{CM}}} \quad (2.4)$$

Rezistența de intrare de mod comun; pentru măsurarea ei, vezi [4]:

$$r_{\text{in,cm}} = \frac{\Delta V_{\text{CM}}}{\Delta I_{\text{B+}}} = \frac{\Delta V_{\text{CM}}}{\Delta I_{\text{B-}}} \quad (2.5)$$

Rejecția modului comun (Common Mode Rejection Ratio, CMRR):

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20 \lg \left| \frac{A_{\text{OL}}}{A_{\text{CM}}} \right| \quad (2.6)$$

