
PARAMETRII AMPLIFICATOARELOR OPERAȚIONALE

3.1 STRUCTURA INTERNĂ DE PRINCIPIU A AMPLIFICATOARELOR OPERAȚIONALE

Amplificatorul operațional (AO) real, prezentând limitări, diferă de cel ideal. Pentru a înțelege originea acestor limitări, în fig. 3.1 se prezintă structura internă de principiu a unui AO. Cu toate că este o schemă simplificată, ea conține **elementele de bază** ale oricărui AO:

- *etajul de intrare*, care are rolul de a amplifica semnalul diferențial $V^+ - V^-$ și de a-l converti într-un semnal a cărui referință este masa;
- *etajul intermediar*, care amplifică în continuare semnalul și asigură compensarea în frecvență;
- *etajul de ieșire*, care realizează adaptarea cu sarcina.

Etajul de intrare

Aspectul esențial în funcționarea etajului de intrare este simetria. Fiecare pereche de tranzistoare, Q_1 - Q_2 și Q_3 - Q_4 este împerecheată cât mai bine cu puțință.

Tranzistorul Q_3 este conectat ca diodă. Acest lucru forțează curentul de colector al lui Q_3 să fie egal cu I_{C1} . Joncțiunile bază-emitor (B-E) ale lui Q_3 și Q_4 fiind conectate în paralel rezultă că au tensiunile V_{BE} egale. Deoarece tranzistoarele Q_3 și Q_4 sunt identice (au parametri împerecheați), curentul său de colector este și el egal cu I_{C1} . Circuitul format din Q_3 și Q_4 se numește oglindă de curent.

Curentul sursei $2I_{EE}$ se împarte între Q_1 și Q_2 . Această divizare depinde de mărimile tensiunilor V^+ și V^- .

Când V^+ este mai pozitivă decât V^- , Q_1 conduce un curent mai mare decât Q_2 și I_{C1} este mai mare decât I_{C2} . Acțiunea oglinzii de curent Q_3 - Q_4 obligă curentul I_{out1} să aibă sensul spre nodul comun celor două colectoare ale Q_2 și Q_4 (curentul iese din baza lui Q_5).

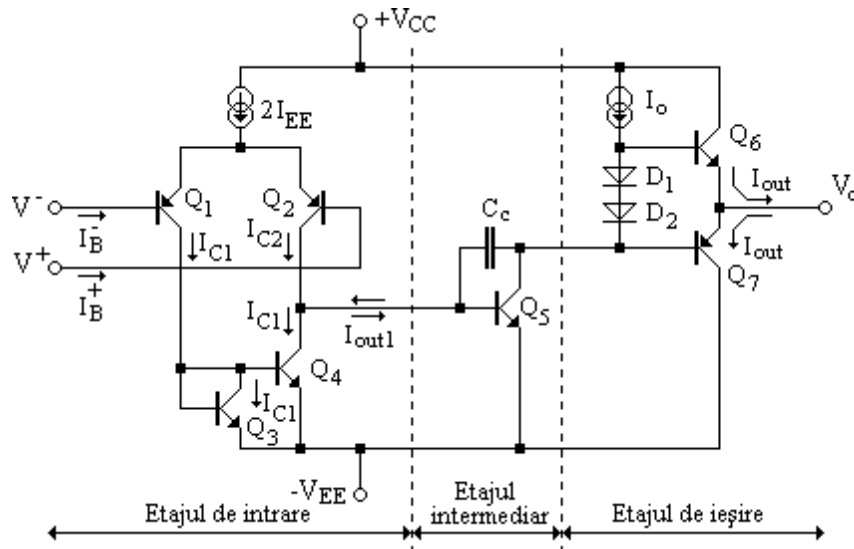


Fig. 3.1 Structura internă de principiu a unui AO.

Când V^- este mai pozitivă decât V^+ , Q_2 conduce un curent mai mare decât Q_1 și I_{C2} este mai mare decât I_{C1} . Acțiunea oglinzii de curent Q_3 - Q_4 obligă curentul I_{out1} să aibă sensul spre baza lui Q_5 .

Curentul I_{out1} reprezintă semnalul de ieșire asimetric (cu referință masa) al primului etaj și este proporțional cu semnalul diferențial de intrare, $V^+ - V^-$ prin relația $I_{out1} = g_{m1}(V^+ - V^-)$, unde g_{m1} reprezintă transconductanța primului etaj. Astfel etajul de intrare se comportă ca un amplificator transconductanță.

Etajul intermediar

Etajul al doilea convertește curentul I_{out1} într-o tensiune și asigură compensarea în frecvență. Dacă I_{out1} are sensul spre nodul comun celor două colectoare ale tranzistoarelor Q_2 și Q_4 (iese din baza lui Q_5), atunci tensiunea de ieșire a etajului al doilea se modifică spre valori pozitive. Dacă I_{out1} are sensul spre baza lui Q_5 , atunci tensiunea de ieșire a etajului al doilea se modifică spre valori negative. Etajul intermediar este un amplificator transrezistență.

Condensatorul C_c din etajul al doilea asigură compensarea internă în frecvență. Acest condensator determină scăderea amplificării pe măsură ce frecvența semnalului crește. În absența condensatorului C_c , este necesară o compensare externă. În caz contrar, în cele mai multe aplicații, AO va oscila.

Etajul de ieșire

Etajul de ieșire este un amplificator tipic în clasă AB. Repetoarele pe emitor Q_6 și Q_7 asigură curentul prin sarcină, având amplificarea în tensiune egală cu unitatea. Etajul de ieșire este un amplificator de curent.

3.2 DEFINIREA PARAMETRILOR AMPLIFICATOARELOR OPERAȚIONALE

Parametrii amplificatoarelor operaționale se prezintă în tabelul 3.1. Se utilizează modul de notare a parametrilor din limba engleză, folosind ca referință cataloage ale firmei *TEXAS INSTRUMENTS*. Tabelul conține, de asemenea, denumirea fiecărui parametru, o scurtă definiție a parametrilor și unitatea de măsură.

Tabelul 3.1

Parametrii amplificatoarelor operaționale

Parametrul AO	Definirea parametrului	Unitatea de măsură
α_{IIO} Coeficientul mediu de temperatură al curentului de intrare de offset	Raportul dintre variația curentului de intrare de offset și variația temperaturii mediului ambiant.	nA/°C sau pA/°C
α_{VIO} Coeficientul mediu de temperatură al tensiunii de intrare de offset	Raportul dintre variația tensiunii de intrare de offset și variația temperaturii mediului ambiant.	μV/°C
Φ_m Marginea de fază	Valoarea absolută a variației fazei în buclă deschisă între ieșire și intrarea inversoare la frecvența la care modulul amplificării în buclă deschisă este egal cu unitatea.	°
A_m Marginea de amplitudine (de amplificare)	Reciproca amplificării de tensiune în buclă deschisă la frecvența cea mai joasă la care defazajul în buclă deschisă este astfel încât ieșirea este în fază cu intrarea inversoare.	dB
A_v Amplificarea în tensiune la semnal mare	Raportul dintre oscilația vârf-la-vârf a tensiunii de ieșire și variația necesară a tensiunii de intrare pentru comanda ieșirii.	V/mV

Parametrii amplificatoarelor operaționale (continuare)

Parametrul AO	Definirea parametrului	Unitatea de măsură
A_{VD} Amplificarea diferențială în tensiune	Raportul dintre variația tensiunii de ieșire și variația tensiunii diferențiale de intrare produsă, menținând constantă tensiunea de intrare de mod comun.	V/mV sau V/ μ V
B _l Banda la amplificarea unitară	Domeniul de frecvență în care amplificarea în buclă deschisă este supraunitară.	MHz
B _{OM} Banda la variație maximă a ieșirii	Domeniul de frecvență în care oscilația maximă a tensiunii de ieșire este mai mare decât o valoare specificată.	kHz
C _i Capacitatea de intrare	Capacitatea dintre terminalele de intrare cu oricare dintre intrări legată la masă.	pF
CMRR Factorul de rejecție a modului comun	Raportul dintre amplificarea diferențială și cea de mod comun. Observație: CMRR-ul se măsoară prin determinarea raportului dintre variația tensiunii de intrare de mod comun și modificarea ce rezultă în tensiunea de intrare de offset.	dB
\bar{F} Coeficientul mediu de zgomot	Raportul dintre (1) puterea totală de zgomot de la ieșire dintr-o anumită bandă de frecvență când temperatura de zgomot de la terminalul (terminalele) de intrare este, pentru toate frecvențele, tensiunea de zgomot de referință și (2) acea parte din (1) determinată de temperatura de zgomot a unui anumit terminal de intrare de semnal dintr-o anumită bandă de frecvență a semnalului de intrare.	dB
I _{CC+} , I _{CC-} Curentul de alimentare	Curentul prin terminalele de alimentare ale circuitului integrat	mA (bipolar) sau μ A (CMOS)
I _{IB} Curentul de polarizare a intrărilor	Valoarea medie a curenților prin cele două terminale de intrare pentru valoarea specificată a tensiunii de ieșire.	nA sau pA
I _{IO} Curentul de intrare de offset	Diferența curenților prin cele două terminale de intrare pentru valoarea specificată a tensiunii de ieșire.	nA sau pA
I _n Curentul echivalent de zgomot la intrare	Curentul unei surse ideale de curent (având impedanța internă egală cu infinit), conectată în paralel cu terminalele de intrare ale dispozitivului care reprezintă partea de zgomot generat intern și care se poate reprezenta cel mai bine printr-o sursă de curent.	pA / $\sqrt{\text{Hz}}$

Parametrii amplificatoarelor operaționale (continuare)

Parametrul AO	Definirea parametrului	Unitatea de măsură
I_{OL} Curentul de ieșire la nivel scăzut	Curentul de ieșire în condițiile unui semnal de intrare, care în acord cu specificațiile produsului stabilește nivelul scăzut la ieșire.	mA
I_{OS} Curentul de ieșire de scurtcircuit	Valoarea maximă disponibilă a curentului de ieșire, cu borna de ieșire legată fie la masă, fie la careva dintre sursele de alimentare fie la un punct specificat.	mA
k_{SVS} Sensibilitatea tensiunii de alimentare	Valoarea absolută a raportului dintre variația tensiunii de intrare de offset și variația tensiunii surselor de alimentare.	$\mu V/V$
k_{SVR} Raportul de rejecție a surselor de alimentare	Valoarea absolută a raportului dintre variația tensiunii surselor de alimentare și variația tensiunii de intrare de offset.	dB
P_D Puterea totală disipată	Puterea totală de c.c. de alimentare a dispozitivului mai puțin orice putere livrată de dispozitiv sarcinii.	mW
r_i Rezistența de intrare	Rezistența dintre terminalele de intrare cu oricare intrare legată la masă.	$M\Omega$
r_{id} Rezistența de intrare diferențială	Rezistența de semnal mic dintre terminalele de intrare, neconectate la masă.	$M\Omega$
r_o Rezistența de ieșire	Rezistența dintre terminalul de ieșire și masă.	Ω
SR Viteza de variație a tensiunii de ieșire	Valoarea medie a timpului de variație a tensiunii de ieșire a amplificatorului în buclă închisă pentru un semnal de intrare tip treaptă.	$V/\mu s$
t_r Timpul de creștere	Timpul necesar unui semnal de ieșire tip treaptă de a se modifica între 10% și 90% din valoarea sa finală.	ns
t_{tot} Timpul total de răspuns	Timpul dintre variația tip funcție treaptă a semnalului de intrare și momentul de timp în care semnalul de ieșire a atins pentru ultima oară domeniul nivelului specificat ($\pm e$) care conține nivelul final.	ns
V_I Domeniul tensiunii de intrare	Domeniul tensiunii de la fiecare intrare, care dacă se depășește poate determina încetarea funcționării corecte a AO.	V
V_{IO} Tensiunea de intrare de offset	Tensiunea de c.c. care trebuie aplicată între cele două terminale de intrare pentru a aduce tensiunea continuă de la ieșire la zero sau la o valoare specificată.	mV

Parametrii amplificatoarelor operaționale (continuare)

Parametrul AO	Definirea parametrului	Unitatea de măsură
V_{IC} Tensiunea de intrare de mod comun	Valoarea medie între cele două tensiuni individuale de intrare.	V
V_{ICR} Domeniul tensiunii de intrare de mod comun	Domeniul tensiunii de intrare de mod comun a cărui depășire poate determina funcționarea necorespunzătoare a AO.	V
V_n Tensiunea echivalentă de zgomot la intrare	Tensiunea unei surse ideale de tensiune (având impedanța internă egală cu zero), conectată în serie cu terminalele de intrare ale dispozitivului care reprezintă partea de zgomot generat intern și care se poate reprezenta cel mai bine printr-o sursă de tensiune.	nV/\sqrt{Hz}
V_{O1}/V_{O2} Atenuarea de diafonie	Raportul dintre variația tensiunii de ieșire a canalului care conduce și variația rezultată a tensiunii de ieșire a altui canal.	dB
V_{OH} Tensiunea de ieșire de nivel înalt	Tensiunea de ieșire pentru condiții de intrare care, în acord cu specificațiile produsului, asigură un nivel ridicat la ieșirea AO.	V
V_{OL} Tensiunea de ieșire de nivel scăzut	Tensiunea de ieșire pentru condiții de intrare care, în acord cu specificațiile produsului, asigură un nivel scăzut la ieșirea AO.	V
V_{ID} Tensiunea de intrare diferențială	Tensiunea dintre intrarea neinversoare și cea inversoare.	V
V_{OM} Variația maximă de vârf a tensiunii de ieșire	Valoarea maximă de tensiune pozitivă sau negativă care se obține fără limitări atunci când valoarea de c.c. a tensiunii de ieșire este, în repaus, egală cu zero.	V
$V_{O(PP)}$ Variația maximă vârf-la-vârf a tensiunii de ieșire	Valoarea maximă vârf-la-vârf a tensiunii care se obține fără limitări atunci când valoarea de c.c. a tensiunii de ieșire este, în repaus, egală cu zero.	V
Z_{ic} Impedanța de intrare de mod comun	Rezultatul conectării în paralel a impedanțelor de semnal mic dintre fiecare intrare și masă.	$G\Omega$
Z_o Impedanța de ieșire	Impedanța de semnal mic dintre terminalul de ieșire și masă.	Ω
Factorul de supracreștere	Raportul dintre deviația maximă a valorii semnalului de ieșire față de valoarea tranzitorie finală dacă la intrare se aplică un semnal tip treaptă și valoarea absolută a diferenței dintre valorile tranzitorii ale semnalului de ieșire înainte și după variația tip treaptă a semnalului de intrare.	%

Parametrii amplificatoarelor operaționale (continuare)

Parametrul AO	Definirea parametrului	Unitatea de măsură
THD+N Distorsiunea armonică totală plus zgomotul	Raportul dintre valoarea efectivă a tensiunii de zgomot plus valoarea efectivă a tensiunii armonice a semnalului și valoarea efectivă totală a semnalului de ieșire.	%
GBW Produsul amplificare-bandă	Produsul dintre amplificarea de tensiune în buclă deschisă și frecvența la care se măsoară amplificarea.	MHz
Coeficientul mediu de drift, de termen lung, a tensiunii de intrare de offset	Raportul dintre variația tensiunii de intrare de offset și variația timpului. Reprezintă o valoare medie pe perioada de timp specificată.	$\mu\text{V}/\text{lună}$

3.3 VALORILE LIMITĂ ABSOLUTE ALE PARAMETRILOR AO ȘI CONDIȚIILE DE LUCRU

În circuitele realizate cu AO, parametrii tipici ai amplificatoarelor sunt garantați numai dacă AO lucrează cât mai aproape de condițiile recomandate. Utilizarea AO în condițiile valorilor maxime ale parametrilor poate determina o comportare neprevizibilă a AO sau chiar distrugerea lor.

Lista valorilor limită absolute și a condițiilor de lucru cuprinde parametrii tipici ai AO fabricați la *TEXAS INSTRUMENTS*.

a) *Valorile limită absolute* sunt:

- tensiunea de alimentare;
- tensiunea de intrare diferențială;
- domeniul tensiunii de intrare;
- curentul de intrare;
- curentul de ieșire;
- curentul total prin VCC+;
- curentul total prin VCC-;
- durata curentului de scurtcircuit (la $\leq 25^{\circ}\text{C}$);
- puterea totală disipată continuu;
- temperatura de funcționare;
- temperatura de depozitare;
- temperatura terminalelor.

b) Condițiile de lucru recomandate cuprind parametrii:

- tensiunea de alimentare;
- domeniul tensiunii de intrare;
- tensiunea de intrare de mod comun;
- temperatura de funcționare.

3.4 DESCRIREA PARAMETRILOR AO

3.4.1 Tensiunea de intrare de offset

Tensiunea de intrare de offset reprezintă tensiunea de c.c. care trebuie aplicată între terminalele de intrare ale AO pentru a aduce la zero tensiunea de c.c. de repaus de la ieșire sau la o valoare specificată. Dacă etajul de intrare ar fi perfect simetric ar rezulta $V_{IO}=0$. Din cauza variațiilor procesului tehnologic, geometria și gradul de dopare nu sunt identice până la cel mai mic detaliu. Toate AO necesită conectarea unei mici tensiuni între intrarea neînversoare și cea înversoare pentru a echilibra aceste nepotriviri.

În fig. 3.2, V_{IO} este reprezentată ca o sursă de tensiune continuă conectată la intrarea neînversoare.

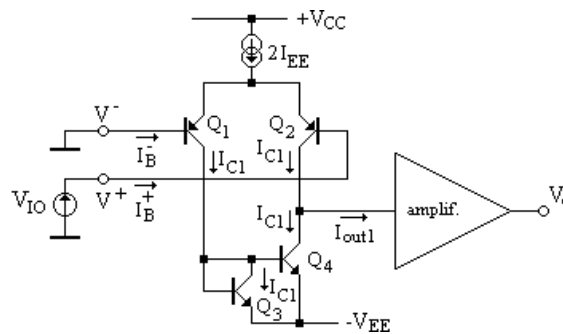


Fig. 3.2 Parametrii de offset ai AO.

Datele de catalog oferă informație și despre coeficientul de temperatură al tensiunii de intrare de offset, $\alpha_{V_{IO}}$, calculat cu relația:

$$\alpha_{V_{IO}} = \frac{(V_{IO} \text{ la } T_{A(1)}) - (V_{IO} \text{ la } T_{A(2)})}{T_{A(1)} - T_{A(2)}}, \quad (3.1)$$

unde $T_{A(1)}$ și $T_{A(2)}$ sunt limitele specificate ale temperaturii.

Ori de câte ori se impune precizie din punct de vedere al c.c., se impune luarea în seamă a V_{IO} și aplicarea metodelor de anulare a efectului său.

3.4.2 Curentul de intrare

Prin fiecare intrare a AO circulă un mic curent de polarizare.

Curentul de polarizare a intrărilor

Curentul de polarizare a intrărilor se calculează ca media aritmetică a celor doi curenți de intrare:

$$I_{IB} = \frac{I_B^+ + I_B^-}{2}. \quad (3.2)$$

Curentul de intrare de offset

Curentul de intrare de offset reprezintă diferența curenților de polarizare a intrării neinversoare și inversoare:

$$I_{IO} = I_B^+ - I_B^-. \quad (3.3)$$

Curentul I_{IB} trebuie luat în seamă atunci când rezistența internă a sursei, conectată la intrarea AO, are valori mari.

De obicei, curentul de intrare de offset este mai mic cu un ordin de mărime decât curentul de polarizare a intrărilor, astfel că, dacă cele două intrări ale AO "văd" spre masă rezistențe egale, atunci din tensiunea de ieșire se elimină efectul curenților de polarizare a intrărilor și se va simți numai efectul curentului de intrare de offset.

3.4.3 Domeniul tensiunii de intrare de mod comun

În mod normal la intrările AO există o tensiune comună ambelor intrări. Dacă această tensiune de mod comun este prea mare (apropiată de $+V_{CC}$) sau prea mică (apropiată de $-V_{EE}$), intrările AO se blochează și funcționarea corectă încetează.

În fig. 3.3, *a*, se prezintă limitele de variație ale tensiunii pozitive de intrare de mod comun, pe baza schemei simplificate din fig. 3.1. Dacă

$$V_{IN} > V_{CC} - 0,9V, \quad (3.4)$$

tranzistoarele de la intrare și sursa de curent $2I_{EE}$ se blochează.

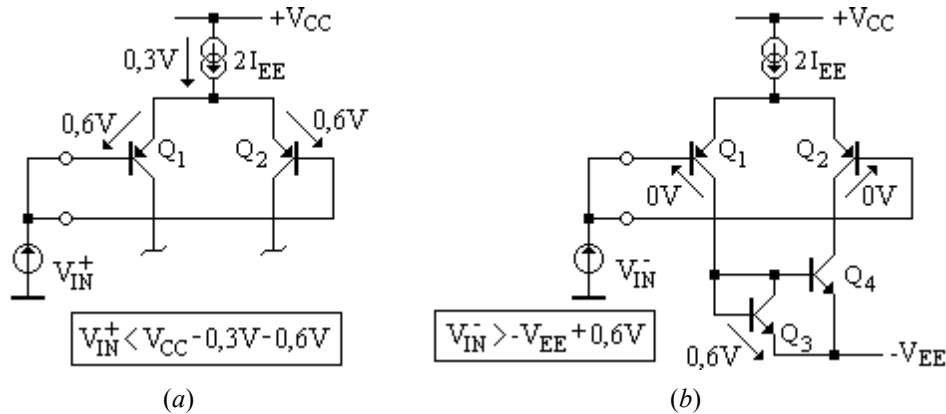


Fig. 3.3 Limitele de variație ale tensiunii de intrare de mod comun. (a) Domeniul tensiunilor pozitive. (b) Domeniul tensiunilor negative.

În fig. 3.3, *b*, se prezintă limitele de variație ale tensiunii negative de intrare de mod comun, pe baza schemei simplificate din fig. 3.1. Dacă

$$V_{IN}^- < -V_{EE} + 0,6V, \quad (3.5)$$

tranzistoarele Q_3 și Q_4 din oglinda de curent se blochează.

Structurile de AO de tipul celui analizat nu includ între valorile tensiunii de intrare de mod comun niciuna dintre tensiunile de alimentare (*power supply rail* – l. engleză). Alte tehnologii utilizate în realizarea circuitelor de intrare asigură un domeniu al tensiunii de intrare de mod comun care include și una sau ambele tensiuni de alimentare. De exemplu:

- Amplificatoarele operaționale LM324 și LM 358 au etajul de intrare realizat cu tranzistoare *pnp* ale căror colectoare sunt conectate la minusul alimentării. Deoarece V_{CB} poate deveni egală cu zero, rezultă că tensiunea de intrare de mod comun poate include între valori și tensiunea negativă de alimentare (fig. 3.4, *a*).
- Amplificatoarele operaționale BiFET (Bipolar and Field Effect Transistor) de tipul TL07X și TL207X au etajul de intrare realizat cu TEC-J cu canal *p* care au terminalele de sursă legate la alimentarea pozitivă. Pentru că V_{GS}

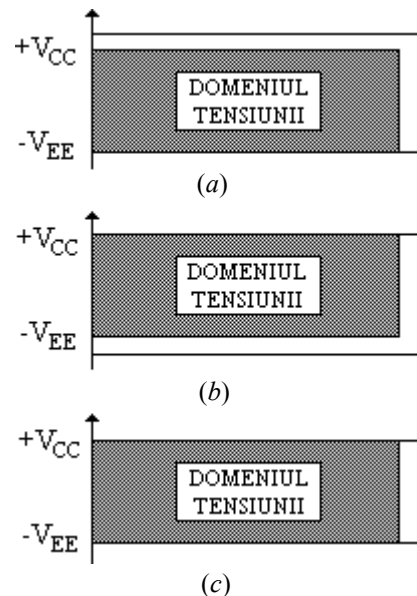


Fig. 3.4 Domeniul tensiunii de intrare de mod comun și tensiunile de alimentare.

poate deveni egală cu zero, domeniul tensiunii de intrare de mod comun poate include și tensiunea pozitivă de alimentare (fig. 3.4, *b*).

- Amplificatoarele operaționale de tipul CMOS au etajul de intrare realizat cu TEC-MOS cu canal *p*, cu substratul conectat la alimentarea pozitivă. Prin urmare canalul conductor apare pentru $V_G + V_T < V_{DD}$ și acest fapt permite ca domeniul tensiunii de intrare de mod comun să includă tensiunea negativă de alimentare (fig. 3.4, *a*).
- Amplificatoarele operaționale cu intrare “rail-to-rail” utilizează tranzistoare complementare *n* și *p* în etajele diferențiale de intrare. Când valoarea tensiunii de intrare de mod comun se apropie de oricare dintre valorile tensiunilor de alimentare, atunci cel puțin una dintre intrările diferențiale este încă activă și astfel tensiunea de intrare de mod comun poate include ambele tensiuni de alimentare (fig. 3.4, *c*).

3.4.4 Domeniul tensiunii de intrare diferențiale

Domeniul tensiunii de intrare diferențiale se specifică, de obicei, ca valoare absolută maximă (fig. 3.5).

Dacă tensiunea de intrare este mai mare decât tensiunea inversă B-E a tranzistorului Q_1 plus tensiunea directă B-E a tranzistorului Q_2 , atunci joncțiunea B-E a lui Q_1 acționează ca o diodă Zener. Acest mod de lucru este distructiv, deteriorându-se câștigul în curent al lui Q_1 . Aceeași analiză se poate face și pentru V_{IN_DIF} de polaritate opusă, rolul diodei Zener jucând-o de această dată joncțiunea bază-emitor a tranzistorul Q_2 .

Unele AO prezintă circuite de protecție, limitându-se curentul de intrare. În mod normal, limitarea tensiunii de intrare diferențiale nu constituie o problemă de proiectare.

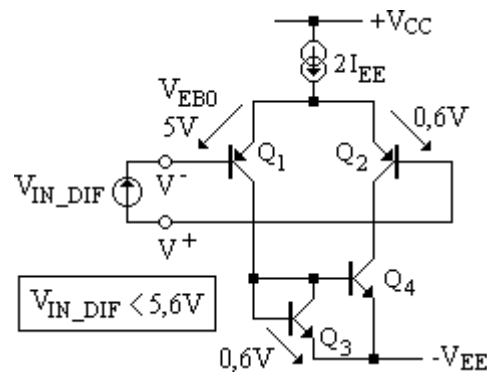


Fig. 3.5 Domeniul tensiunii de intrare diferențiale.

3.4.5 Variația maximă a tensiunii de ieșire

Tensiunea maximă de ieșire, $V_{OM\pm}$, este definită ca amplitudinea maximă, pozitivă sau negativă, a tensiunii de ieșire care se poate obține fără limitarea formei de undă, considerând valoarea de repaus a tensiunii continue la ieșire egală cu zero.

$V_{OM\pm}$ este limitată de impedanța de ieșire a amplificatorului, de tensiunea de saturație a tranzistoarelor de ieșire și de tensiunile de alimentare (fig. 3.6). Este important de reținut că $V_{OM\pm}$ depinde de valoarea rezistenței de sarcină.

Valoarea maximă a potențialului V_{BQ6} este egală cu $+V_{CC}$, de aceea:

$$V_o \leq +V_{CC} - V_{R1} - V_{BEQ6} \quad (3.6)$$

Valoarea minimă a tensiunii de intrare V_i poate fi $-V_{EE}$, de aceea:

$$V_o \geq -V_{EE} + V_{R2} + V_{BEQ7} \quad (3.7)$$

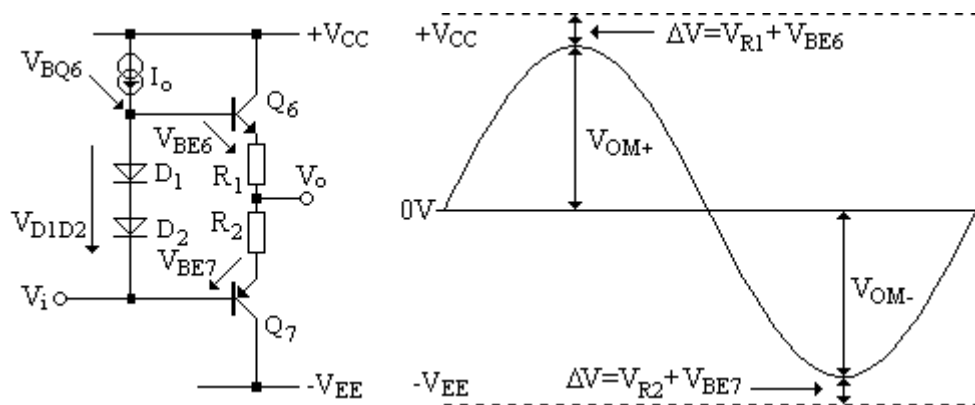


Fig. 3.6 Variația maximă a tensiunii de ieșire.

Structura de repetor pe emitor nu poate asigura o excursie a tensiunii de ieșire până în apropierea surselor de alimentare. AO cu ieșire “rail-to-rail” utilizează etaje cu emitor comun (la varianta bipolară) ori sursă comună (la varianta CMOS). La aceste structuri, variația tensiunii de ieșire este limitată numai de tensiunea de saturație (bipolar) sau de rezistența “on” (CMOS) a tranzistoarelor de ieșire și de sarcină.

3.4.6 Amplificarea diferențială la semnal mare

Amplificarea diferențială la semnal mare, A_{VD} reprezintă raportul dintre variația tensiunii de ieșire și variația tensiunii de intrare diferențiale, în timp ce tensiunea de intrare de mod comun se menține constantă. Acest parametru este strâns legat de câștigul în buclă deschisă, a . Diferența dintre acești parametri constă în faptul că amplificarea diferențială la semnal mare se determină în condițiile existenței rezistenței de sarcină și include deci și efecte de încărcare.

Datele de catalog specifică valoarea de c.c. a amplificării A_{VD} . Dar A_{VD} depinde de frecvență (scade cu creșterea frecvenței – vezi fig. 3.12).

Amplificarea A_{VD} constituie o problemă de proiectare atunci când se cere un câștig precis.

Pornind de la relația amplificării în buclă închisă a configurației neinvertoare

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{ab}}, \quad (3.8)$$

unde $b = R_1 / (R_1 + R_2)$, amplificarea A se poate controla precis printr-o selectare atentă a rezistoarelor R_1 și R_2 . Termenul $1/ab$ apare ca un termen de eroare. Numai dacă a (sau A_{VD}) are valoare mare în comparație cu $1/b$, influența lui a asupra lui A devine neglijabilă.

3.4.7 Elementele parazite de la intrarea AO

Intrărilor AO li se pot asocia niște impedanțe parazite (fig. 3.7). În circuitul real apar și inductanțe parazite, dar au efecte neglijabile la frecvențe joase.

Impedanța de intrare a AO reprezintă o problemă de proiectare atunci când impedanța sursei de semnal are valori mari.

Capacitățile parazite de intrare pot cauza defazaje suplimentare pe calea de reacție care pot micșora marginea de fază și pot reprezenta o problemă dacă în bucla de reacție se conectează rezistențe de valori mari.

Capacitatea de intrare

Capacitatea de intrare C_i se măsoară între terminalele de intrare cu oricare dintre ele conectată la masă. Această capacitate este de obicei de ordinul pF. De exemplu dacă se leagă la masă intrarea neinvertoare rezultă:

$$C_i = C_d \parallel C_n. \quad (3.9)$$

Uneori datele de catalog se referă la capacitatea de intrare de mod comun, C_{ic} . Pe fig. 3.7 se observă că dacă se unesc intrările AO rezultă

$$C_{ic} = C_n \parallel C_p. \quad (3.10)$$

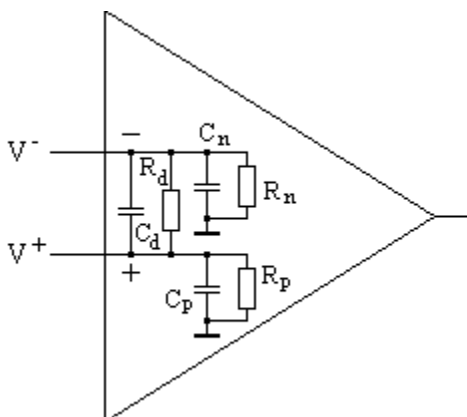


Fig. 3.7 Elementele parazite de la intrarea amplificatorului operațional.

Rezistența de intrare

Se definesc două rezistențe de intrare: r_i și r_{id} , astfel

- r_i reprezintă rezistența dintre terminalele de intrare cu oricare

dintre ele conectată la masă;

- r_{id} este rezistența de intrare diferențială și reprezintă rezistența de semnal mic dintre cele două terminale de intrare, când niciuna dintre intrări nu este legată la masă.

Astfel, dacă se leagă intrarea neinvertoare la masă (fig. 3.7) se obține:

$$r_i = R_d \parallel R_n, \quad (3.11)$$

cu valorile uzuale în domeniul $10^7 \dots 10^{12} \Omega$.

Dacă ambele intrări sunt flotante (nu s-a legat niciuna dintre ele la masă!), din fig. 3.7 rezultă:

$$r_{id} = R_d \parallel (R_n + R_p), \quad (3.12)$$

cu valorile uzuale în domeniul $10^7 \dots 10^{12} \Omega$.

Uneori se specifică rezistența de intrare de mod comun, r_{ic} . Pe fig. 3.7 se observă că dacă se unesc intrările rezultă:

$$r_{ic} = R_n \parallel R_p. \quad (3.13)$$

3.4.8 Impedanța de ieșire

Datele din cataloage diferite prezintă valori deosebite ale impedanței de ieșire. Astfel, unele cataloage indică impedanța de ieșire în buclă închisă, pe când altele - impedanța de ieșire în buclă deschisă, în ambele cazuri folosindu-se aceeași notație Z_o .

Parametrul Z_o este definit ca impedanța de semnal mic între borna de ieșire și masă, valorile tipice fiind cuprinse în domeniul $50 \dots 200 \Omega$.

Etajele de ieșire cu emitor comun (tehnologie bipolară) sau sursă comună (tehnologie CMOS), utilizate la AO cu ieșire "rail-to-rail" prezintă impedanță de ieșire mai mare decât etajele cu repetor pe emitor.

Impedanța de ieșire constituie o problemă de proiectare atunci când se utilizează AO cu ieșire "rail-to-rail" pentru comanda unor sarcini de valoare mare.

Pe fig. 3.8, *a*, se prezintă modul în care impedanța de ieșire afectează semnalul de ieșire, când sarcina are caracter preponderent rezistiv,.

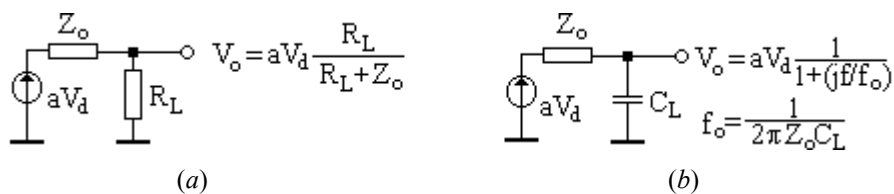


Fig. 3.8 Influența impedanței de ieșire când sarcina are caracter rezistiv (a) și capacitiv (b).

Dacă sarcina este preponderent capacitivă (fig. 3.8, *b*), atunci marginea de fază va fi afectată de un defazaj suplimentar.

3.4.9 Factorul de rejecție a modului comun

Factorul de rejecție a modului comun (*CMRR*) se definește ca raportul dintre amplificarea de mod diferențial și cea de mod comun, A_{DIF} / A_{COM} . Ideal acest raport ar trebui să fie ∞ , tensiunile de mod comun fiind astfel total rejecțate.

Tensiunea de intrare de mod comun modifică punctul static de funcționare (*PSF*) al perechii diferențiale de la intrarea AO. Din cauza neîmperecherilor inerente ale circuitului de intrare, modificarea *PSF*-ului schimbă valoarea tensiunii de offset, care la rândul său va modifica tensiunea de ieșire. Mecanismul real de acțiune este $\Delta V_{OS} / \Delta V_{COM}$. În catalog $CMRR = \Delta V_{COM} / \Delta V_{OS}$, pentru ca, exprimat în dB, să fie o valoare pozitivă.

În datele de catalog, *CMRR*-ul se prezintă ca un parametru de c.c. dar valoarea sa scade pe măsură ce frecvența semnalului prelucrat crește.

3.4.10 Factorul de rejecție a surselor de alimentare

Factorul de rejecție a surselor de alimentare, k_{SVR} (*SVRR* sau *PSRR* în alte cataloage) reprezintă raportul dintre variația tensiunii surselor de alimentare și variația tensiunii de ieșire.

Tensiunea de alimentare modifică *PSF*-ul al perechii diferențiale de intrare. Din cauza neîmperecherilor inerente ale circuitului de intrare, modificarea *PSF*-ului schimbă valoarea tensiunii de offset, care la rândul său va modifica tensiunea de ieșire. Mecanismul real de acțiune este $\Delta V_{OS} / \Delta V_{CC\pm}$. Pentru a se obține o valoare pozitivă la exprimarea în dB, în datele de catalog parametrul se definește $k_{SVR} = \Delta V_{CC\pm} / \Delta V_{OS}$. Mărimea $\Delta V_{CC\pm}$ presupune că tensiunile de alimentare (pozitivă și negativă) se modifică simetric. Mecanismul care produce k_{SVR} este identic cu cel pentru *CMRR*. Parametrul k_{SVR} este prezentat ca un parametru de c.c., dar trebuie ținut seama de faptul că el scade odată cu creșterea frecvenței.

3.4.11 Curentul de alimentare

Curentul de alimentare reprezintă curentul de repaus prin AO fără sarcină. De obicei, în datele de catalog, curentul de alimentare reprezintă curentul prin întreg cipul circuitului, excepție făcând unele circuite care au mai multe AO pe cip

și la care acest parametr reprezintă curentul de alimentare al unui singur amplificator.

3.4.12 Viteza de variație a semnalului de ieșire la câștig unitar

SR (Slew Rate – l. engleză) reprezintă viteza de variație a tensiunii de ieșire determinată de un semnal tip treaptă aplicat la intrare (fig. 3.9). Se exprimă în $V/\mu s$.

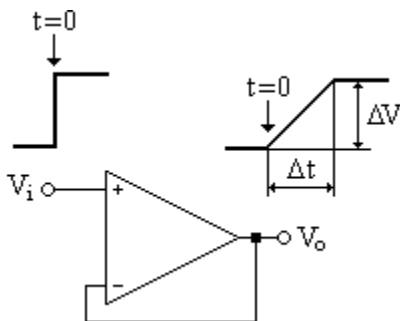


Fig. 3.9 Determinarea SR-ului.

Referindu-ne la structura de principiu din fig. 3.1, variația tensiunii în etajul al doilea este limitată de încărcarea/descărcarea condensatorului C_C . Viteza maximă de variație apare atunci când oricare jumătate a perechii diferențiale conduce întreg curentul $2I_{EE}$. În această situație se obține limita maximă a *SR*, calculată cu relația:

$$SR = \frac{2I_{EE}}{C_C}. \quad (3.14)$$

Condensatorul C_C se adaugă pentru ca circuitul să fie stabil la câștig unitar.

Pentru a mări *SR*, se crește valoarea

curenților de polarizare din structura AO.

3.4.13 Zgomotul echivalent la intrare

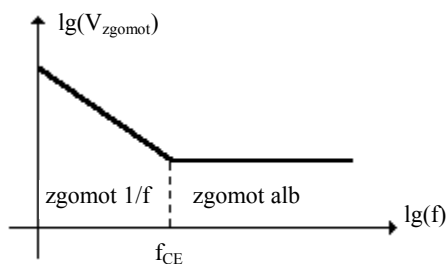


Fig. 3.10 Zgomotul echivalent la intrarea AO.

Toate AO au asociate surse parazite de zgomot. Zgomotul se măsoară la ieșirea AO și este referit la intrarea acestuia, de unde derivă și denumirea.

Uzual zgomotul echivalent la intrare se indică în două moduri:

a) prima modalitate constă în specificarea unui zgomot punctual (spot noise) sub forma unei tensiuni V_n (sau a unui curent I_n), împărțit la radical din Hz, la frecvența specificată;

b) a doua modalitate constă în specificarea zgomotului ca o mărime vârf-la-vârf, într-un anumit domeniu de frecvență.

Spectrul zgomotului dintr-un AO are o componentă dependentă de $1/f$ și una de zgomot alb. Zgomotul de tipul $1/f$ este invers proporțional cu frecvența și este semnificativ numai la frecvențe joase. Zgomotul alb are un spectru plat (fig. 3.10).

În mod obișnuit zgomotul punctual se indică pentru două frecvențe. Prima frecvență este de 10Hz unde se manifestă densitatea spectrală $1/f$. A doua frecvență este egală cu 1kHz, unde zgomotul este din punct de vedere spectral plat. Unitățile de măsură folosite sunt: nV_{ef} / \sqrt{Hz} pentru tensiunea de zgomot, respectiv $\mu A_{ef} / \sqrt{Hz}$ pentru curentul de zgomot. Pe fig. 3.10 frecvența de tranziție de la zgomotul $1/f$ la cel alb s-a notat cu f_{CE} .

O specificare de zgomot de forma $V_{n(pp)}$ reprezintă o valoare vârf-la-vârf, exprimată într-un domeniu de la 0,1 Hz la 1Hz sau de la 0,1Hz la 10Hz. Unitatea de măsură este nV vârf-la-vârf. Pentru a transforma tensiunea de zgomot din valoarea efectivă în cea vârf-la-vârf, se ține seama de cel mai mare factor de creștere (vârf) văzut la tensiunile de zgomot. De exemplu: $V_{n(pp)} = 6 \times V_{n(RMS)}$.

Pentru o structură de AO dată, prin creșterea curenților de polarizare scade zgomotul (dar cresc SR -ul, produsul amplificare-bandă și puterea totală disipată).

Rezistența văzută la intrarea AO contribuie la creșterea zgomotului. Încercarea de a egala rezistențele “văzute” de cele două intrări ale AO are efect benefic și asupra zgomotului.

3.4.14 Distorsiunile armonice totale și zgomotul

Prin parametrul distorsiuni armonice și zgomot ($THD+N$) se compară conținutul de frecvențe al semnalului de ieșire cu conținutul de frecvențe al semnalului de intrare. Ideal, dacă semnalul de intrare este pur sinusoidal atunci și cel de ieșire este pur sinusoidal. Din cauza surselor de neliniaritate și zgomot din AO, semnalul de ieșire nu rezultă niciodată curat.

Parametrul $THD+N$ se determină cu relația:

$$THD + N = \frac{\sum (\text{tensiuni armonice} + \text{tensiunea de zgomot})}{\text{tensiunea totală de ieșire}} \times 100\%. \quad (3.15)$$

În fig. 3.11 se prezintă cazul ipotetic în care $THD+N=1\%$.

Fundamentală semnalului de ieșire are aceeași frecvență ca și semnalul de intrare și reprezintă 99% din semnalul de ieșire. Comportarea neliniară a AO determină apariția de armonice în tensiunea de ieșire. Zgomotul de la ieșire se datorează în principal zgomotului referit la intrarea AO. Adunate împreună, toate tensiunile datorate armonicilor și zgomotului reprezintă 1% din semnalul de ieșire.

Cauzele majore ale distorsiunilor din AO sunt limitele variației tensiunii de ieșire și valoarea limitată a SR .

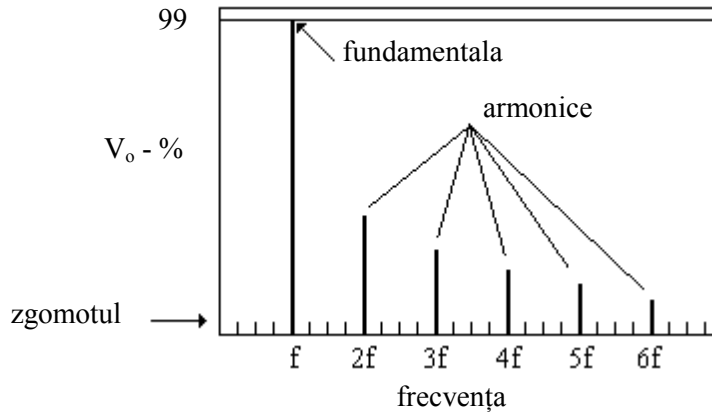


Fig. 3.11 Distorsiunile armonice totale și zgomotul.

3.4.15 Banda la câștig unitar și marginea de fază

Caracteristicile de frecvență ale AO din catalog se referă la următorii 5 parametri:

- banda la câștig unitar, $B1$;
- produsul amplificare-bandă, GBW ;
- marginea de fază la câștig unitar, Φ_m ;
- marginea de câștig, A_m ;
- banda la variație maximă a ieșirii, B_{OM} .

Banda la câștig unitar ($B1$) și produsul amplificare-bandă (GBW) sunt similare. $B1$ arată frecvența la care amplificarea A_{VD} a AO devine egală cu 1:

$$B1 = f \Big|_{A_{VD}=1} . \quad (3.16)$$

Produsul amplificare-bandă (GBW) se referă la produsul dintre amplificare și banda AO în buclă deschisă și cu sarcina conectată:

$$GBW = A_{VD} \times f . \quad (3.17)$$

Marginea de fază la câștig unitar (Φ_m) reprezintă diferența dintre mărimea defazajului semnalului prin AO la amplificarea $A_{VD}=1$ și 180° :

$$\Phi_m = 180^\circ - \text{defazajul} \Big|_{B1} . \quad (3.18)$$

Marginea de amplitudine (A_m) reprezintă diferența dintre câștigul unitar și câștigul (amplificarea) la defazajul de 180° :

$$A_m = 1 - \text{amplificarea} \Big|_{180^\circ} . \quad (3.19)$$

Banda la variație maximă a ieșirii (B_{OM}) este limitată de SR . Pe măsură ce frecvența semnalului devine tot mai mare, ieșirea este limitată de SR și nu mai poate răspunde suficient de rapid pentru a realiza variația specificată a tensiunii de ieșire.

Pentru a face AO stabil, pe cipul circuitului se include un condensator C_C (fig. 3.1). Acest tip de compensare se numește *compensare cu pol dominant*. Scopul urmărit este de a determina ca amplificarea în buclă deschisă să devină egală cu unitatea (1) înainte ca defazajul la ieșire să atingă 180° .

Pe fig. 3.1 se prezintă o formă simplificată de compensare. AO reale prezintă pe caracteristica funcției de transfer și alte frecvențe în afară de cel corespunzător polului dominant. În fig. 3.12 se prezintă caracteristicile de frecvență ale unui AO compensat intern.

Așa cum s-a prezentat anterior și se observă și pe fig. 3.12, amplificarea A_{VD} scade cu frecvența. A_{VD} (și deci și $B1$ sau GBW) reprezintă o problemă de proiectare dacă se cere un câștig precis într-o bandă de frecvență specificată.

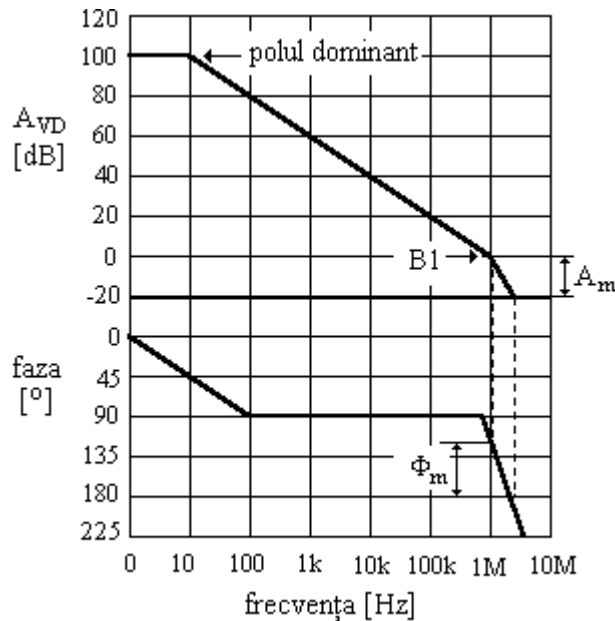


Fig. 3.12 Banda la câștig unitar, marginea de fază și de amplitudine.

Marginea de fază și marginea de amplitudine reprezintă două modalități de exprimare a stabilității circuitului. De exemplu în cazul amplificatoarelor operaționale cu ieșire “rail-to-rail” care au impedanță de ieșire mai mare, dacă sarcina este capacitivă, se introduce un defazaj semnificativ. Acest defazaj

suplimentar reduce marginea de fază și de aceea AO - CMOS cu ieșire “rail-to-rail” prezintă limitări serioase în cazul sarcinilor capacitive.

3.4.16 Timpul de stabilire

Propagarea semnalului prin AO se face într-un timp finit. Astfel, pentru ca ieșirea AO să reacționeze la un semnal de intrare de tip treaptă, trebuie să treacă un anumit timp. Semnalul de ieșire atinge valoarea finală stabilă după un timp în care semnalul de ieșire oscilează în jurul valorii finale. Timpul de stabilire reprezintă timpul necesar ca valoarea tensiunii de ieșire să se încadreze într-un anumit interval în jurul valorii stabile, abaterea reprezentând un anumit procent din valoarea stabilă (fig. 3.13).

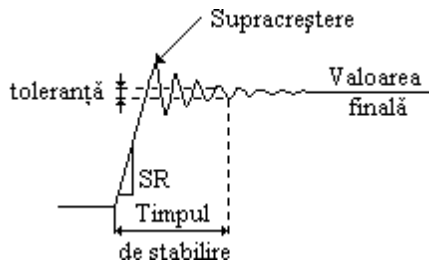


Fig. 3.13 Timpul de stabilire.

Timpul de stabilire constituie o problemă de proiectare în circuitele de achiziții de date atunci când semnalul se modifică rapid. Un exemplu îl constituie AO conectat ca adaptor de impedanță (buffer analogic) între un multiplexor și convertorul analog-digital (*CAD*). La intrarea AO pot apărea modificări de semnal tip treaptă atunci când la multiplexor se comută de pe un canal de semnal pe altul. Înainte de eșantionarea semnalului de către

CAD, semnalul de ieșire al AO trebuie să se încadreze, într-un interval în jurul valorii finale, având o anumită toleranță.