

## 9. Operačné zosilňovače

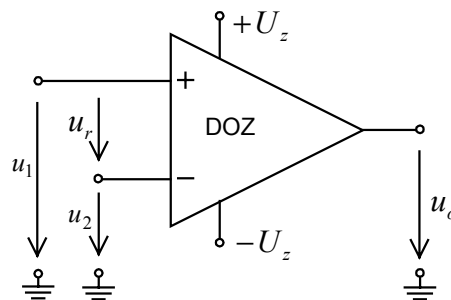
**Cieľ kapitoly:** Definovať a vysvetliť základné pojmy a parametre diferenčného operačného zosilňovača. Vysvetliť kritéria pre kategorizáciu OZ a uviesť základné aplikačné zapojenia.

Vývoj operačných zosilňovačov (OZ) je úzko spojený s vývojom analógových počítačov a začal ešte počas druhej svetovej vojny. Bol určený na realizáciu rôznych matematických funkcií, hlavne však integrovania k riešeniu diferenciálnych rovníc. V operačnom zosilňovači pre analógové počítače sa využíva hlavne jeho vysoké napäťové zosilnenie.

Prvé operačné zosilňovače boli ešte elektrónkové a boli realizované ako samostatné univerzálne moduly. Veľký rozvoj OZ nastal po objavení tranzistorov a neskôr po zvládnutí výroby analógových IO. V súvislosti s prudkým rozvojom číslicových počítačov sa ich používanie presunulo do oblasti spracovania analógových signálov predovšetkým zosilňovania malých signálov a ich filtrácie. Pôvodné OZ mali iba jeden invertujúci vstup, dnes sa však používajú hlavne OZ s dvomi vstupmi – invertujúcim a neinvertujúcim (DOZ), pretože sú univerzálne.

### 9.1 Základné parametre a charakteristiky DOZ

Schematická značka DOZ je uvedená na obr.9.1



Obr. 9.1 Schématická značka DOZ.

Súčasné DOZ obsahujú 2-3 zosilňovacie stupne. Prvý stupeň je riešený ako diferenčný zosilňovací stupeň, z tohto dôvodu môžeme použiť všetky parametre DZS (kap.8) aj na opis vlastností DOZ. Hlavný parameter DOZ, ktorým je jeho napäťové zosilnenie sa pohybuje v rozsahu  $10^5$  až  $10^7$ . Podľa obr. 9.1. a v zmysle záverov 8.kapitoly môžeme napísať základné rovnice operačného zosilňovača.

$$u_o = Au_{1r} \quad (9.1)$$

Presnejší vzťah:

$$u_o = Au_{1r} + A_s u_{1s} \quad (9.2)$$

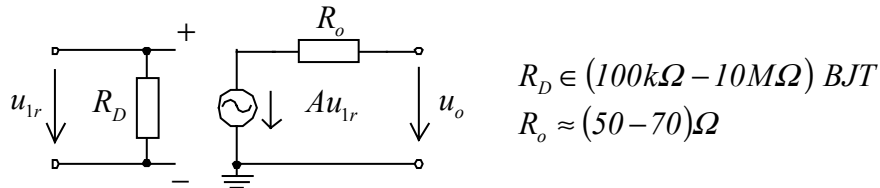
$A \equiv A_r$  býva v rozsahu  $10^5 \div 10^7$ .

Reálny DOZ je viacstupňový zosilňovač s galvanickou väzbou medzi stupňami a môže byť dosť zložitý. Jeho analýza sa dá robiť iba s použitím počítačov. Pre potreby syntézy elektronických obvodov pracujeme prakticky vždy so zjednodušeným modelom DOZ, ktorému sa hovorí často makromodel. Makromodel môže byť veľmi jednoduchý, vhodný pre orientačné ručné výpočty, ale tiež dosť zložitý, aby sa

používal v simulačných programoch. Dnešní výrobcovia dávajú takéto makromodely používateľom DOZ na internet. Tieto modely sú obvykle kompatibilné so simulačným softvérom pochádzajúcim od programu SPICE.

Jednoduchý lineárny makromodel DOZ pomocou ktorého možno ukázať základné vlastnosti obvodov s DOZ je na obr.9.2. Obsahuje celkom 4 parametre:

1. vstupný odpor pre rozdielový signál –  $R_D$ ,
2. výstupný odpor –  $R_o$ ,
3. napäťové zosilnenie  $A_o$  ( $f=0$ ),
4. medznú frekvenciu  $f_o$ .

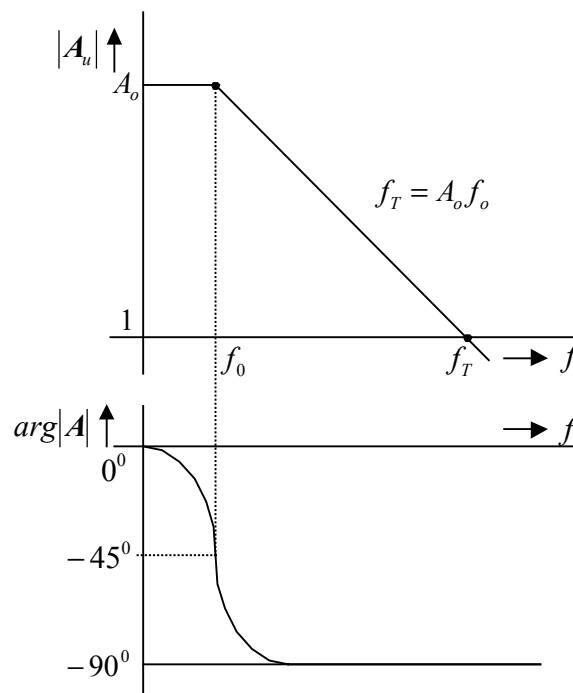


Obr. 9.2 Jednoduchý lineárny model DOZ

Napätím riadený napäťový zdroj  $Au_{1r}$  je frekvenčne závislý podľa vzťahu:

$$A = \frac{A_o}{1 + j \frac{f}{f_o}} \quad (9.3)$$

Uvedený vzťah je najjednoduchším možným vyjadrením frekvenčnej charakteristiky DOZ, ktorá má tvar podobný ako dolnopriepustný RC filter (až na konštantu  $A_o$ ). Výrobcovia súčasných DOZ sa snažia ich frekv. charakteristiku čo najviac priblížiť k tvaru (Obr. 9.3), ktorý sa často nazýva štandardný frekvenčný prenos DOZ. Uvedená štandardná frekvenčná charakteristika je výhodná nielen z hľadiska jednoduchosti, ale DOZ s takouto vlastnosťou sú v zapojeniach najstabilnejšie (z hľadiska vzniku parazitných kmitov).



Obr. 9.3 Frekvenčné charakteristiky DOZ s jedнопólovou aproximáciou

Na obr.9.3. sú nakreslené asymptoty štandardnej modulovej frekvenčnej charakteristiky, pomocou ktorých sa definuje dôležitý parameter každého DOZ a tým je medzná frekvencia  $f_T$ . Pri tejto frekvencii má DOZ jednotkové zosilnenie. Dá sa ľahko ukázať, že platí jednoduchý a užitočný vzťah.

$$f_T = A_o f_o \quad (9.4)$$

Výrobcovia charakterizujú frekvenčné vlastnosti DOZ pre malý signál práve pomocou  $f_T$  a  $A_o$ . Fázová frekvenčná charakteristika takto korigovaného DOZ má maximálny fázový posuv  $\varphi = -90^\circ$  čo zabezpečuje dostatočnú stabilitu v zapojeniach so zápornou spätnou väzbou.

### Základné rozdelenie DOZ podľa oblasti použitia

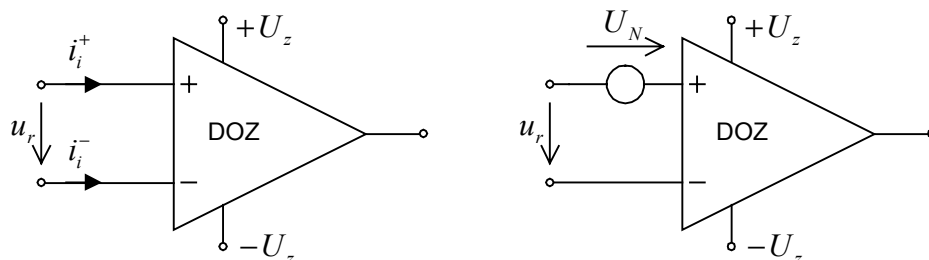
Postupným vývojom sa ustálilo niekoľko kategórií DOZ:

- Univerzálne DOZ – ich parametre sú navrhnuté kompromisne tak, aby sa dali použiť pre najrôznejšie účely. Sú to obvykle lacné modely v bipolárnom alebo unipolárnom prevedení. Príkladom môžu poslúžiť typy:

MAA 501 – 504	1.generácia
MA 741, 748	2.generácia
OP 27	3.generácia

Charakteristické pre túto skupinu je, že žiaden z parametrov nie je navrhovaný na maximálnu hodnotu na úkor ďalších parametrov.

- Prístrojové DOZ – v tejto skupine sa kladie veľký dôraz na kvalitu vstupného zosilňovača charakterizovaného čo najmenšou napäťovou ( $U_N$ ) a prúdovou ( $I_N$ ) nesymetriou a hlavne ich malou teplotnou závislosťou (teplotným driftom). ) Ďalej sa od prístrojového DOZ požaduje veľké zosilnenie  $A_o > 10^6$ . V Československu bol predstaviteľom tejto skupiny typ MAA725.



Obr.9.4 K definícií prúdovej a napäťovej nesymetrie vstupov

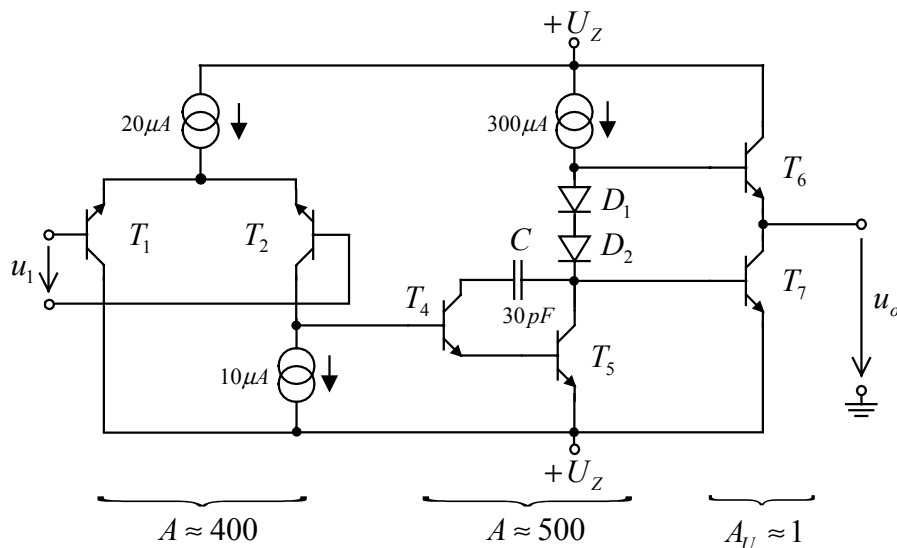
- Rýchle DOZ: pri tejto skupine sa kladie veľký dôraz na maximálnu rýchlosť zmeny výstupného napätia DOZ pri veľkých zmenách tohto napätia (typicky do 10 V).

Parameter SR (Slew Rate) je definovaný hodnotou:  $SR = \left. \frac{du_o}{dt} \right|_{\max} > 10 \frac{V}{\mu s}$

Rýchle DOZ sú potrebné najmä pre vzorkovacie operačné zosilňovače a Č/A prevodníky. Treba si uvedomiť, že parameter  $f_T$  s veľkou hodnotou nemusí ešte vyjadrovať, že daný DOZ je naozaj rýchly v režime veľkého signálu.

- Nízkopríkonové DOZ: u nich je hlavným sledovaným parametrom minimálny celkový príkon DOZ. Napájací prúd zo zdroja pre takýto operačný zosilňovač má typicky menšiu hodnotu ako 200uA. Sú to DOZ určené hlavne pre obvody s batériovým napájaním a vyznačujú sa malou rýchlosťou. (napr. OP 295 od firmy AD).

## 9.2 Základná zjednodušená štruktúra DOZ typu 741



Obr.9.5 Zjednodušená štruktúra DOZ druhej generácie typu 741

Na obr. 9.5. je nakreslené zjednodušené zapojenie DOZ typu 741 bez všetkých podrobností. Vidíme, že obsahuje ako 1.stupeň DZS s PNP tranzistormi a prúdovým zdrojom 10 uA ako zaťažovacím odporom (prúdový zdroj – aktívna záťaž) s veľkou hodnotou diferenciálneho odporu  $>100k\Omega$ . Týmto sa dosahuje v jedinom stupni vysoké zosilnenie napätia (cca 400) pri celkovo malom napájacom prúde  $I = 20 \text{ uA}$ . Druhý stupeň je v zapojení SE, ale tiež s aktívnym zaťažovacím rezistorom v kolektore tvoreným pomocou prúdového zdroja  $I = 300 \text{ uA}$ . Preto má aj tento stupeň veľké napäťové zosilnenie (cca 500). Nasledujúci tzv. dvojčinný komplementárny koncový stupeň nemá napäťové zosilnenie ( $A_n = 1$ ), ale zosilňuje výkon signálu a zabezpečuje nízky výstupný odpor  $R_o > 100k\Omega$ .

Typické parametre tohto DOZ podľa obr. 9.2. sú nasledovné

$$A_o = 200\ 000$$

$$F_o = 5\text{Hz} \quad (f_t = 1\text{MHz})$$

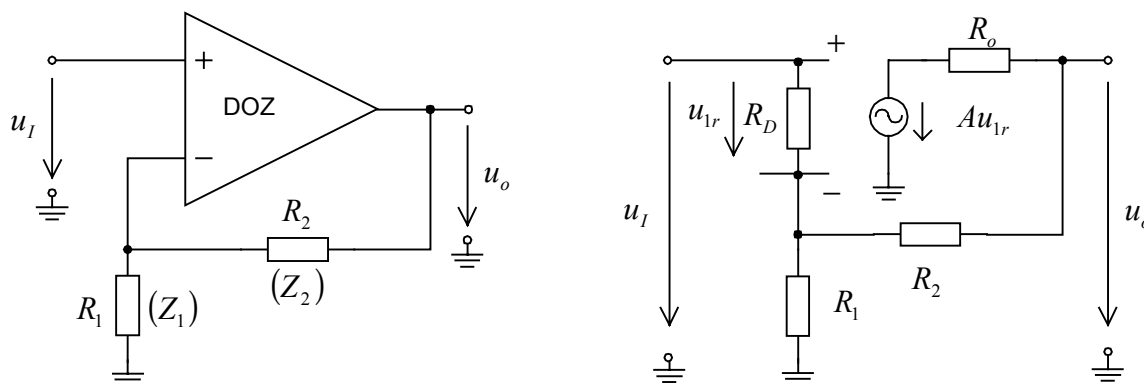
$$R_D = 1 \div 2\text{M}\Omega$$

$$R_o < 50\Omega$$

### 9.3 Niektoré aplikačné obvody s operačnými zosilňovačmi

#### Neinvertujúci zosilňovač s DOZ

Základným aplikačným zapojením je neinvertujúci zosilňovač s DOZ. Obvyklá schéma a jej náhradná schéma pre výpočet vlastností neinvertujúceho zosilňovača je na ďalšom obrázku



Obr.9.6 Zapojenie a náhradná schéma neinvertujúceho zosilňovača s DOZ

Ak prijmeme z dôvodu jednoduchosti ďalšie zjednodušenie,  $R_D \rightarrow \infty, R_o = 0$ . Toto môžeme v praxi urobiť vždy ak budú hodnoty  $R_1, R_2$  spĺňať podmienku  $R_D \gg R_1, R_2 \gg R_o$ .

Veľkosť odporov  $R_1, R_2$  je výhodné voliť podľa orientačnej hodnoty  $R_1, R_2 = \sqrt{R_D R_o}$  (geometrický stred). Pre prípad DOZ typu 741 vychádza hodnota  $R_1, R_2 = \sqrt{10^6 \cdot 10^2} = 10k\Omega$ . Za uvedených predpokladov môžeme napísať nasledujúce vzťahy a rovnice

$$R_D \gg R_1, R_2 \gg R_o \quad (9.5)$$

$$u_1 = u_{1r} + u^- \quad (9.6)$$

$$u^- = Au_{1r} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9.7)$$

$$u_1 = u_{1r} + u_{1r} \frac{AR_1}{R_1 + R_2} \quad (9.8)$$

základna rovnica DOZ

$$u_{1r} = \frac{u_o}{A} \quad (9.9)$$

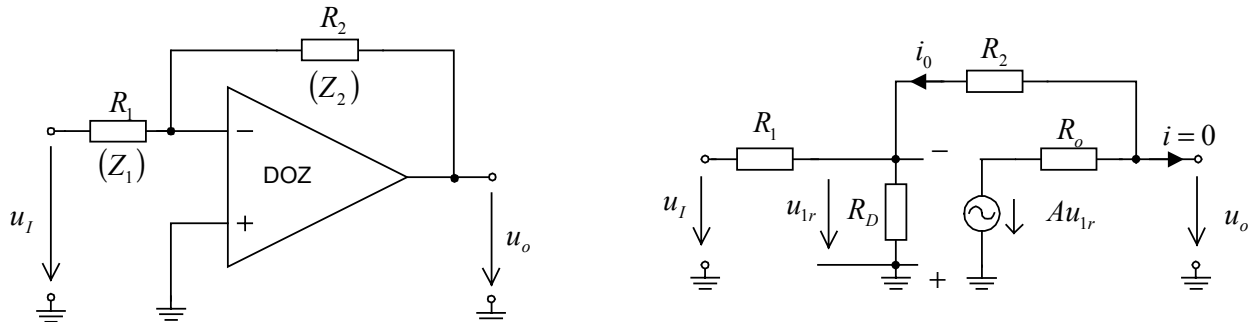
Po dosadení:

$$u_1 = \frac{u_1}{A} + u_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9.10)$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_1} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (9.11)$$

$$\lim_{A \rightarrow \infty} A_u = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (9.12)$$

### Invertujúci zosilňovač s DOZ



Obr. 9.7 Zapojenie a náhradná schéma invertujúceho zosilňovača s DOZ

Zapojenie a náhradná schéma je na obr. 9.7. Za rovnakých predpokladov aké boli prijaté v predchádzajúcom prípade môžeme uvedený náhradný obvod vypočítať jednoduchšie ak prijmeme predpoklad tzv. virtuálnej nuly. Na invertujúcom vstupe DOZ je napätie blízke nule a prúd do tohto vstupu je taktiež nulový. Potom stačí napísať rovnice (9.14), z ktorých môžeme priamo určiť napätový prenos zapojenia v tvare:

$$A \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad \left. \begin{array}{l} u_{1r} = 0 \\ i_D \rightarrow 0 \end{array} \right\} \text{virtuálna nula} \quad (9.13)$$

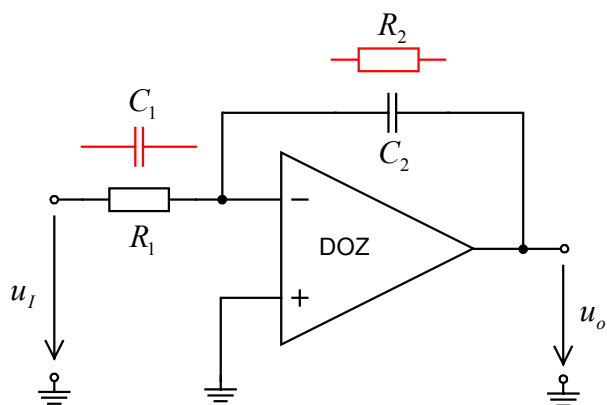
$$i_o = \frac{u_o}{R_2}, \quad i_o = -\frac{u_1}{R_1} \quad (9.14)$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (9.15)$$

Vstupný odpor neinvertujúceho zapojenia je:  $R_{vst} = \frac{u_1}{-i_o} = R_1$

### Integrátor (derivátor) realizovaný pomocou DOZ

Základnú prenosovú funkciu integrátora (derivátora) môžeme získať aplikáciou a zovšeobecnením vzťahu (9.15) pomocou Laplaceovho operátora „p“.



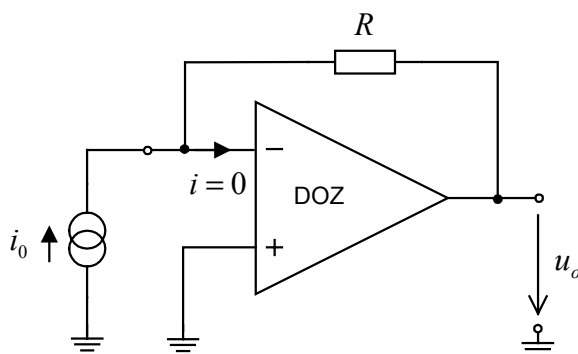
Obr.9.8 Základné zapojenie integrátora (derivátora) pomocou DOZ

$$u_o = -u_1 \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = -u_1 \frac{\frac{1}{pC_2}}{\frac{R_1}{1}} \quad (9.16)$$

$$u_o = -u_1 \frac{1}{pC_2 R_1} \quad (9.17)$$

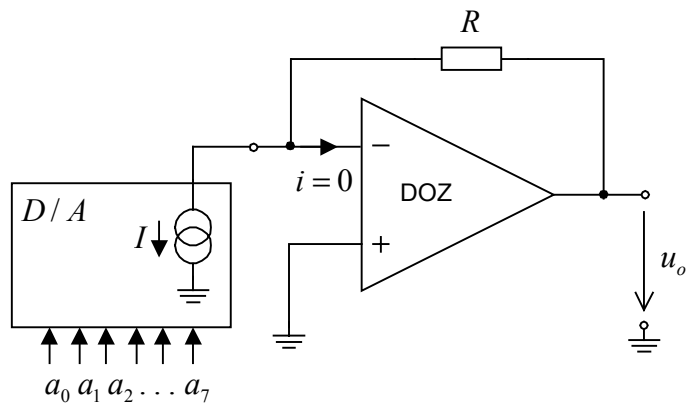
$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C_2} \int_0^t u_1(\tau) d\tau \quad (9.18)$$

Prevodník prúdu na napätie (I/U) s operačným zosilňovačom



Obr.9.9 Principiálne zapojenie analógového prevodníka prúdu na napätie

$$u_o = -IR$$



Obr.9.10 Principiálne zapojenie D/A prevodníka s napäťovým výstupom

Pre časť prevodníka, ktorej výstupom je analógový prúd (realizovanej obvykle ako IO) platí nasledujúci prevodový vzťah medzi vstupným číslom vyjadreným v dvojkovej sústave a výstupným prúdom  $I$ .

$$I = \frac{I_{ref}}{256} (a_7 \cdot 128 + a_6 \cdot 64 + a_5 \cdot 32 + a_4 \cdot 16 + a_3 \cdot 8 + a_2 \cdot 4 + a_1 \cdot 2 + a_0 \cdot 1)$$

Literatúra ku kapitole 9

[1] Tietze V., Schenk Ch.: Halbleiter-shaltungstechnik. Springer-Verlag-Berlin, 1980