

8 Diferenčné zosilňovače v integrovaných obvodoch

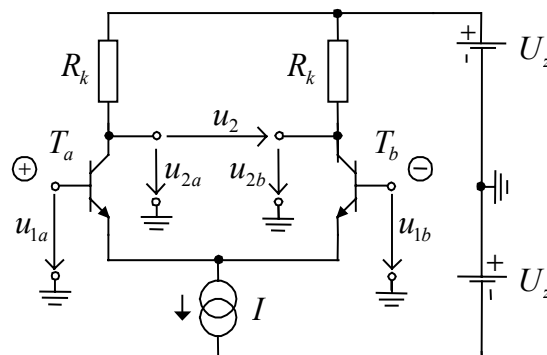
Cieľ kapitoly: Oboznámiť sa s diferenčným zosilňovacím stupňom. Definovať jeho základné parametre a analyzovať pomocou simulátora obvodov vplyv zápornej spätnej väzby na jeho charakteristiky.

8.1 Základné úvahy

Diferenčný zosilňovací stupeň (DZS) patrí k najdôležitejším základným zapojeniam, ktoré sa používajú v analógových integrovaných obvodoch. Výstupné napätie je úmerné rozdielu napätí medzi vstupnými svorkami. Súfázne napätia, ktoré sú na oboch vstupoch s rovnakou amplitúdou a fázou, DZS nezosilňuje. Výhodné vlastnosti DZS sa získali jeho symetrickým zapojením. Medzi jeho výhody patrí ďalej:

1. Zapojenie je vhodné pre realizáciu integrovaných viacstupňových zosilňovačov (operačných zosilňovačov), kde sa uprednostňuje z technologických dôvodov jednosmerná väzba medzi stupňami.
2. Zapojenie obvodu je veľmi univerzálne, okrem funkcie zosilňovania ho možno použiť aj ako modulátor, násobič signálov, obmedzovač amplitúdy, zmiešavač, atď.

Základné zapojenie DZS je uvedené na obr.8.1



Obr.8.1 Diferenčný zosilňovací stupeň s bipolárnymi NPN tranzistormi

Vstupný rozdielový (diferenčný) signál je definovaný: $u_{I_r} = u_d = u_{I_a} - u_{I_b}$ (8.1)

Vstupný súčtový signál (súfázna zložka) bude: $u_{I_s} = \frac{1}{2}(u_{I_a} + u_{I_b})$ (8.2)

Uvedieme tri možné prípady budenia.

1. Napätia na vstupoch sú protifázne. $u_{I_a} = U_{I_a} \sin \omega t$, $u_{I_b} = -U_{I_a} \sin \omega t$

Rozdielové vstupné napätie je: $u_{I_r} = 2U_{I_a} \sin \omega t$. Pre súfázne (súčtove) napätie na vstupoch platí: $u_{I_s} = 0$. Tu ide o budenie bez súčtovej zložky.

2. Napätia na oboch vstupoch sú zhodné (vo fáze). $u_{Ia} = u_{Ib} = U_{Ia} \sin \omega t$,
 $u_{Ir} = 0$, $u_{Is} = U_{Ia} \sin \omega t$. Toto je budenie bez rozdielovej zložky.

3. Budíme len jeden vstup: $u_{Ia} = U_{Ia} \sin \omega t$, $u_{Ib} = 0$, potom pre súčtovú a rozdielovú zložku vstupného napätia platí: $u_{Ir} = U_{Ia} \sin \omega t$,
 $u_{Is} = \frac{1}{2} U_{Ia} \sin \omega t$. V tomto prípade je obvod budovaný kombinovane.

V emitorovom obvode DZS je zapojený ideálny prúdový zdroj. Zabezpečuje konštantný prúd emitorov. $I = i_{ea} + i_{eb}$ (8.3)

Ak je obvod bez budenia, teda $u_{Ia} = u_{Ib} = 0$, prúd I sa delí rovnomerne medzi oboma tranzistormi, teda: $i_{ea} = i_{eb} = 0,5 I$

Ak zanedbáme básový prúd, tak pre kolektorové prúdy tranzistorov platí približne:

$$i_{ka} = i_{kb} = 0,5 I$$

Tento pomer sa nezmení, ak sú tranzistory budované dvomi rovnakými signálmi (vo fáze). Kolektorové prúdy zostávajú rovnaké. Ak $u_{Ia} > u_{Ib}$, zmení sa aj pomer prúdov v DZS, i_{ea} sa zväčšuje, i_{eb} sa znižuje, ale ich súčet zostáva konštantný.

8.2 Prevodová charakteristika DZS

Kolektorový prúd tranzistora možno pre výpočet prevodovej charakteristiky vyjadriť z Ebers - Mollovho modelu pre zosilňovací režim dosť presne pomocou exponenciálnej funkcie:

$$i_k = I_s e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} \quad \text{kde} \quad U_T = \frac{kT}{q}$$

U_T - teplotné napätie, k - Boltzmannova konštanta, q - náboj elektrónu.

Potom pre kolektorové prúdy tranzistorov DZS môžeme napísať:

$$i_{ka} = I_s e^{\frac{u_{BEa}}{U_T}}, \quad i_{kb} = I_s e^{\frac{u_{BEb}}{U_T}} \quad (8.4)$$

$$\text{Pomer prúdov je teda:} \quad \frac{i_{ka}}{i_{kb}} = e^{\frac{u_{BEa} - u_{BEb}}{U_T}} = e^{\frac{u_{Ir}}{U_T}} \quad (8.5)$$

Využívajúc vzťah (8.3) vyjadríme prúdy i_{kb} , i_{ka}

$$i_{kb} = I - i_{ka} = \frac{I}{1 + e^{\frac{u_{1r}}{U_T}}} \quad (8.6)$$

$$i_{ka} = I - i_{kb} = \frac{I}{1 + e^{-\frac{u_{1r}}{U_T}}} \quad (8.7)$$

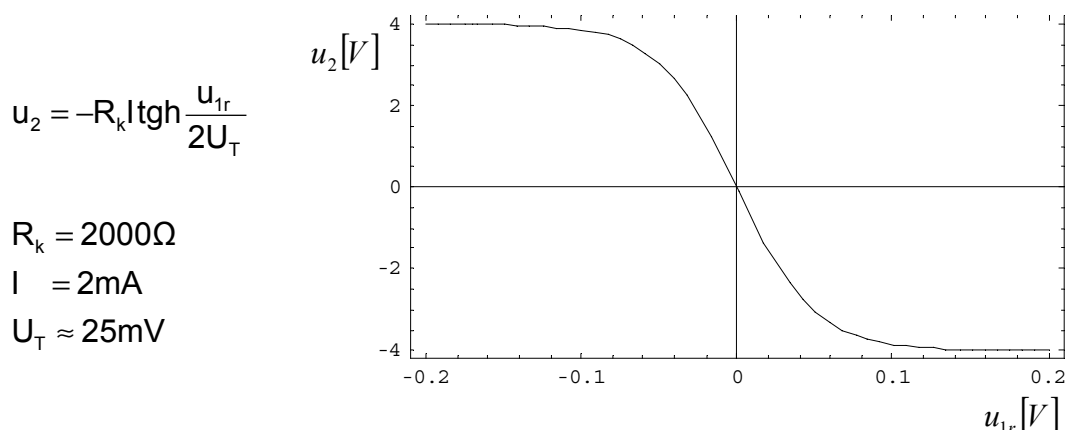
Výstupné napätia u_{2a} , u_{2b} predstavujú nesymetrické výstupné signály. Tieto obsahujú aj jednosmernú zložku. Výstupné napätie u_2 je tzv. symetrický výstupný signál. Ak je budenie nulové, t.j.

$$u_{1a} = u_{1b} = 0, \text{ alebo } u_{1a} = u_{1b} \neq 0, \text{ výstup } u_2 = 0.$$

Pre symetrický výstup platí:
$$u_2 = R_k (i_{ka} - i_{kb}) \quad (8.8)$$

Po dosadení z (8.6) a (8.7) a úprave dostaneme:
$$u_2 = R_k I \operatorname{tgh} \frac{u_{1r}}{2U_T} \quad (8.9)$$

Prevodová charakteristika tranzistora je uvedená na obr. 8.2



Obr.8.2 Prevodová charakteristika diferenčného zosilňovacieho stupňa.

Ak je vstupný rozdielový signál $u_{1r} < 2U_T$ ($U_T = 25\text{mV}$), potom výstupný signál bude zosilnený a neskreslený oproti vstupnému. (DZS pracuje v lineárnej oblasti prevodovej charakteristiky.) V prípade, že vstupný signál $u_{1r} > 2U_T$, pracuje DZS ako obmedzovač (DZS v oblasti saturácie) a výstupný signál bude skreslený. Aby sme mohli obmedzovať aj malé vstupné signály, môžeme zaradiť niekoľko DZS do kaskády, ako je to napr. v obvode TBA 120, kde je ich osem. Pre hyperbolickú funkciu urobíme rozvoj do Taylorovho radu:

$$u_2 = IR_k \left[\frac{u_{1r}}{2U_T} - \frac{\left(\frac{u_{1r}}{2U_T} \right)^3}{3} + \dots \right] \quad (8.10)$$

Rozdielové zosilnenie DZS pre "malý signál" ($|u_{1r}| \ll 2U_T$):

$$A_r = \frac{du_2}{du_{r1}} = \frac{IR_k}{2U_T} \quad \text{pre symetrický výstup} \quad (8.11)$$

Typické hodnoty zosilnenia A_r sú $50 \div 100$.

$$\text{Zosilnenie pre nesymetrický výstup: } A_r = \frac{du_{2a,b}}{du_{r1}} = \pm \frac{IR_k}{4U_T} \quad (8.12)$$

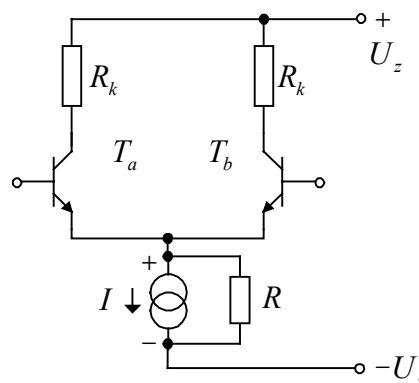
Súčtové zosilnenie DZS môžeme vypočítať pomocou náhradnej schémy pre súčtový vstupný signál uvedenej na obr.8.3:

$$A_s = \frac{du_{2a}}{du_{1s}} = \frac{du_{2b}}{du_{1s}}$$

Ak uvažujeme ideálny prúdový zdroj ($R \rightarrow \infty$), $A_s = 0$

Pre prípad reálneho prúdového zdroja, uvažujúc konečnú hodnotu jeho vnútorného odporu R (obr. 8.3) bude zosilnenie súčtového signálu približne rovné:

$$A_s = \frac{R_k}{2R} \quad (8.13)$$



Obr.8.3 Zapojenie DZS s reálnym prúdovým zdrojom

8.3 Vstupný odpor

Vstupný odpor DZS pre rozdielový signál bude:

$$R_D = \frac{du_{I_r}}{di_{br}} = \frac{du_{I_r}}{d(i_{ba} - i_{bb})} = \frac{2BU_T}{I} \quad (8.14)$$

B je prúdový zosilňovací činiteľ. Vstupný odpor DZS pre súčtový signál (podľa

obr.8.3): $R_s = \frac{du_{I_s}}{di_{bs}} = 2BR$ (8.15)

Vždy platí, že $R_s \gg R_D$

8.4 Činiteľ oslabenia súčtovej zložky signálu (CMRR)

CMRR je parametrom kvality DZS. Je to pomer rozdielového zosilnenia ku súčtovému vyjadrený v decibeloch:

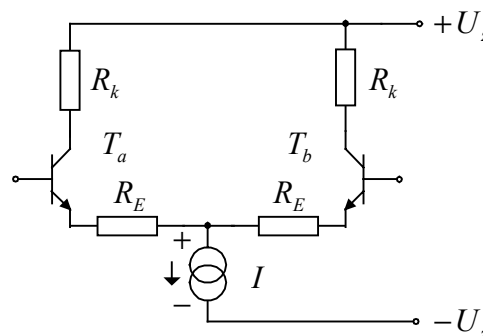
$$CMRR = 20 \log \left| \frac{A_r}{A_s} \right| = 20 \log \frac{\frac{IR_k}{4U_T}}{\frac{R_k}{2R}} = 20 \log \frac{R}{r_E} \quad (8.16)$$

kde r_E je diferenciálny odpor prechodu B-E

$$r_E = \frac{U_T}{i_k} = \frac{2U_T}{I}$$

8.5 DZS s prúdovou zápornou spätnou väzbou

Veľkosť zosilnenia diferenčného zosilňovača a tiež veľkosť lineárnej oblasti DZS je možné ovplyvniť zápornou spätnou väzbou. Do obvodu každého z tranzistorov pridáme emitorový rezistor s odporom R_E . Na veľkosť zosilnenia súčtového signálu majú rezistory R_E zanedbateľný vplyv.



Obr.8.4 DZS so zápornou prúdovou spätnou väzbou v emitoroch.

Ak pridáme emitorový rezistor R_E , pre zosilnenie A_r na nesymetrickom výstupe

bude platiť:
$$A_r = \frac{R_k}{2(r_E + R_E)} \quad (8.17)$$

Veľkosť zosilnenia s rastúcim odporom R_E klesá. Činiteľ zoslabenia súčtovej zložky signálu bude:

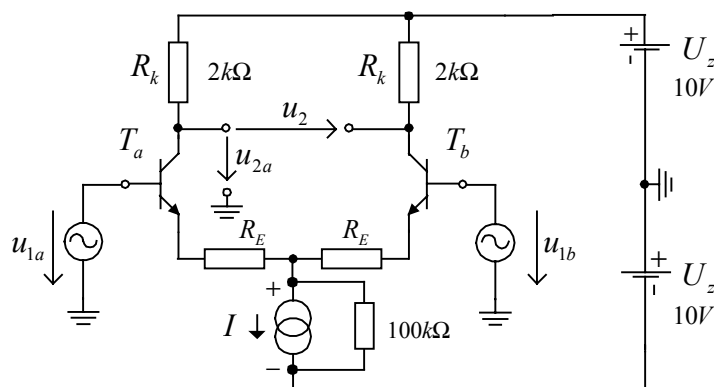
$$CMRR = 20 \log \frac{\frac{R_k}{2(r_E + R_E)}}{\frac{R_k}{2R}} = 20 \log \frac{R}{r_E + R_E} \quad (8.18)$$

V zapojení podľa obr.8.1 sme odvodili pre rozdielové zosilnenie u_{2b} na

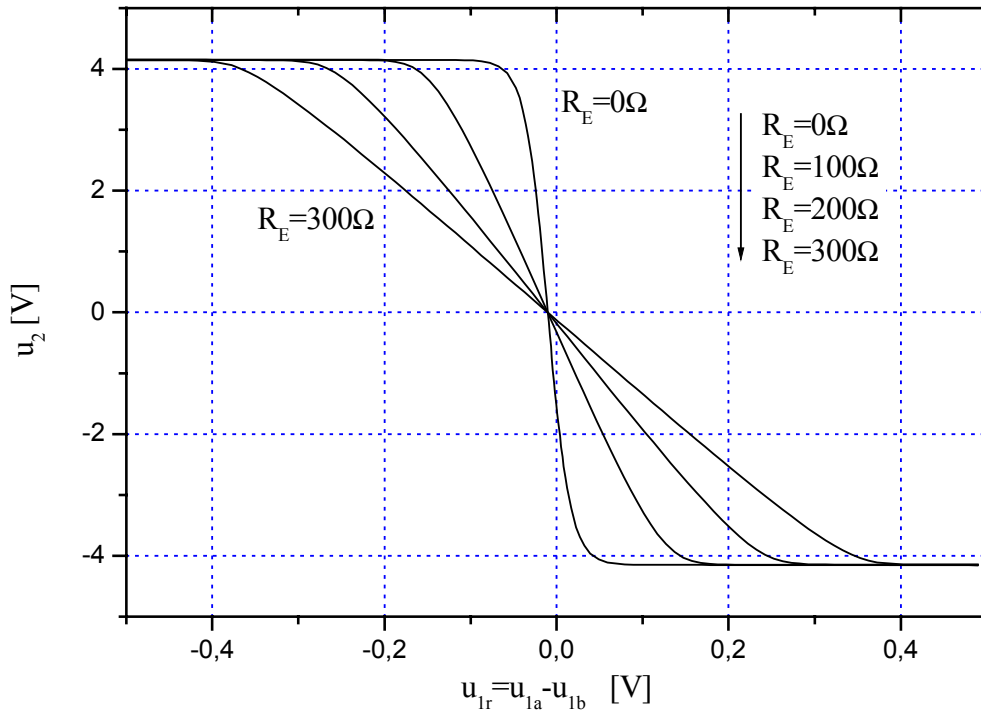
nesymetrickom výstupe:
$$A_r = \frac{du_{2b}}{du_{1r}} = \frac{du_{2b}}{d(u_{1a} - u_{1b})} = \frac{IR_k}{4U_T}$$

8.6 Ukážka simulácie činnosti DZS na počítači.

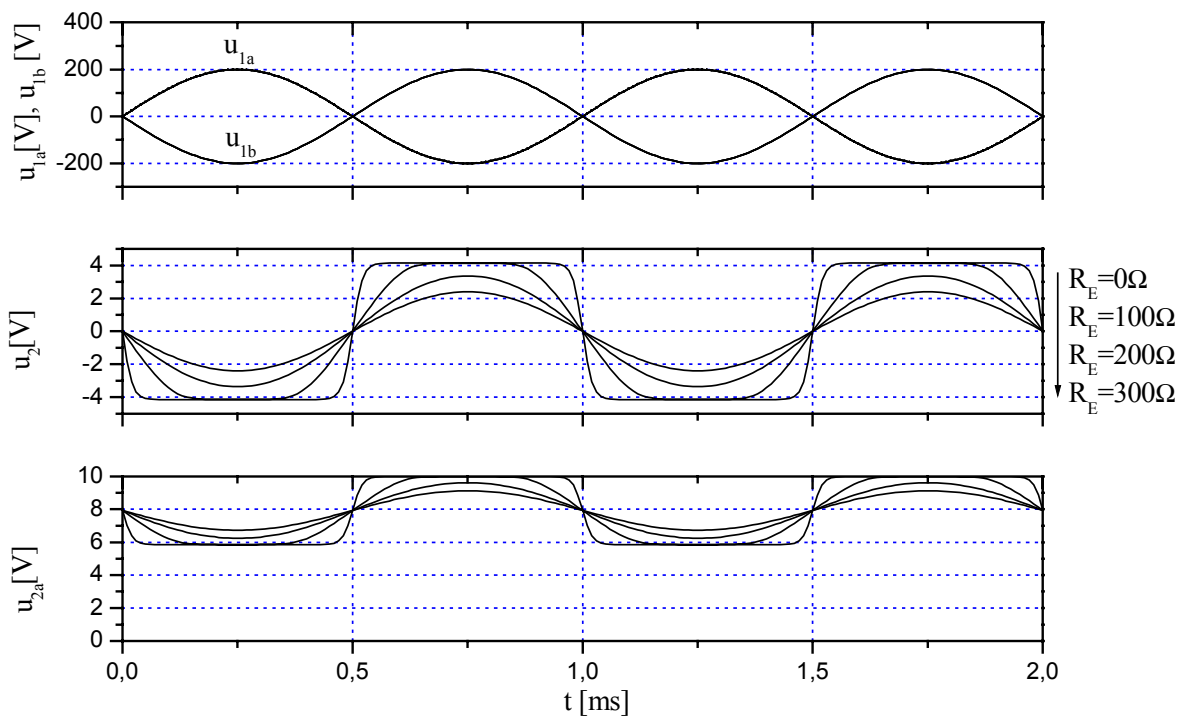
Ako príklad zoberme zapojenie DZS v základnom zapojení s parametrami súčiastok podľa obr.8.5. Pomocou niektorého zo simulačných programov pre analógové obvody (MicroCap, Spice a pod.) vypočítame základné charakteristiky tohto obvodu. Prvou počítačovou analýzou (DC analýza) je sieť prevodových charakteristík DZS pre rôzne hodnoty odporu emitorových rezistorov zobrazená na obr.8.6. V obrázku je jasne vidieť vplyv rezistorov na veľkosť lineárnej oblasti prevodovej charakteristiky, ako aj jej sklonu úmerného zosilneniu pre rozdielový signál. Na ďalšom obrázku sú zobrazené časové priebehy vstupných a výstupných signálov pre tie isté hodnoty odporu rezistorov v emitore. Je tu vidieť lineárny aj saturačný režim činnosti DZS. Obidva sa v praxi využívajú.



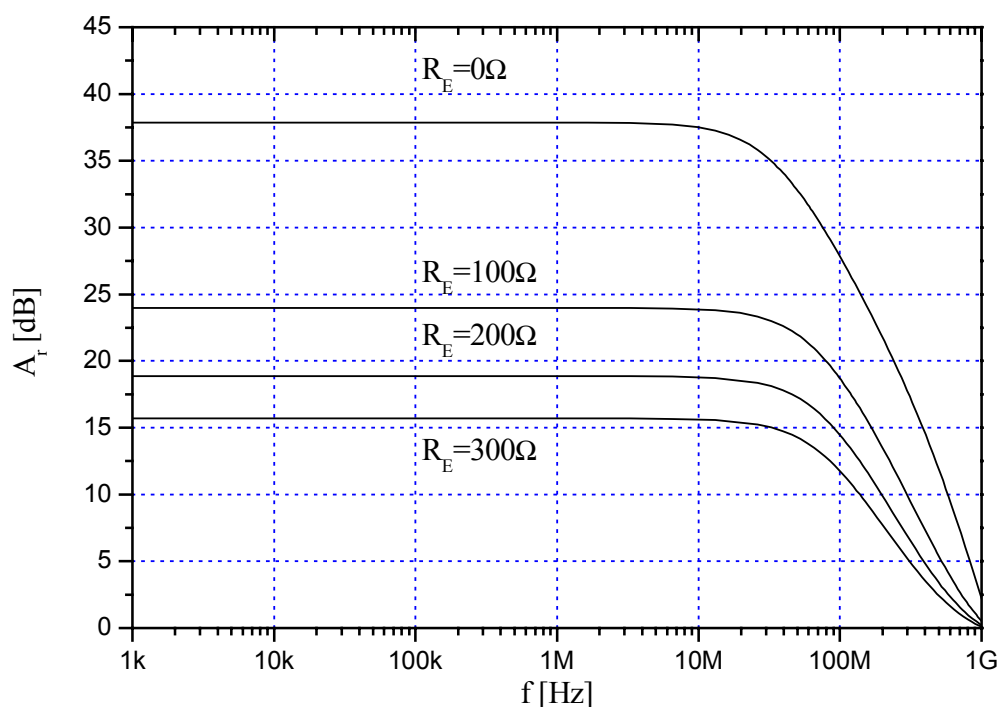
Obr.8.5 Zjednodušené zapojenie DZS s linearizačnými rezistormi R_E pre počítačovu analýzu jeho charakteristík



Obr. 8.6 Simuláciou získané prevodové charakteristiky DZS pre rôzne hodnoty R_E



Obr. 8.7 Časové priebehy napätia vo význačných bodoch DZS pre rôzne hodnoty R_E



Obr. 8.8 Frekvenčné charakteristiky DZS získané numerickou simuláciou.

Na obr.8.8 je uvedený aj príklad výpočtu odpovedajúcich frekvenčných charakteristík. Vo všetkých troch analýzach bol použitý tranzistor typu 2N2222 s jeho plným nelineárnym modelom Gummela - Poona.

8.7 Úlohy na riešenie:

1. Pre diferenciálny zosilňovací stupeň podľa obr.8.4 určte pomocou numerickej simulácie závislosť zosilnenia A_r pre vstupný rozdielový signál od veľkosti emitorového odporu R_E pre $R_E = 0.1 - 250 \Omega$. Použite jednosmernú aj striedavú analýzu, výsledky navzájom porovnajte.
2. Vypočítajte A_r pre symetrický výstup pomocou zjednodušených vzťahov a porovnajte s výsledkami získanými zo simulácie. Výsledky zapíšte do tabuľky.
3. Pozorujte vplyv R_E aj na iné parametre, napr. šírku lineárnej oblasti, veľkosť $CMRR$.