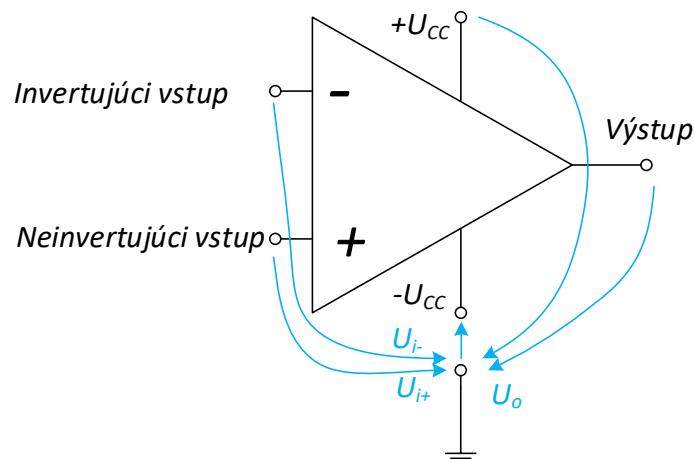


Operačné zosilňovače - OZ

Operačný zosilňovač je polovodičová súčiastka, ktorá bola pôvodne vyvinutá na realizáciu matematických operácií v analógových počítačoch. Zosilňuje ako jednosmerné, tak striedavé napäťové signály. Základná štruktúra OZ má tieto vývody:

- invertujúci vstup (-),
- neinvertujúci vstup (+),
- výstup,
- a dva napájacie vývody ($+U_{CC}$, $-U_{CC}$).
- Môže mať aj vstupy pre frekvenčnú kompenzáciu a kompenzáciu vstupnej napäťovej nesymetrie.



Ak privádzame vstupný el. signál na *invertujúci vstup* OZ, dôjde okrem zosilnenia, aj k posunutiu fázy zosilneného výstupného el. signálu o 180° – opačná fáza (invertovať = prevrátiť, obrátiť). Ak privádzame vstupný el. signál na *neinvertujúci vstup* OZ, dôjde k jeho zosilneniu, avšak fázový posun medzi vstupným a výstupným (zosilneným) el. signálom je nulový (fáza sa nezmení). Skutočný operačný zosilňovač pre teoretickú analýzu idealizujeme pomocou *ideálneho operačného zosilňovača*.

Rozdelenie OZ

1. Podľa integrovaného zosilňovacieho prvku
 - a. Bipolárny OZ - základom je integrovaný bipolárny tranzistor. Jedná sa o najstaršie a najrozšírenejšie OZ, používajú sa pre zosilňovanie jednosmerných a striedavých nf napäťových signálov.
 - b. BIFET OZ - základom je integrovaný tranzistor riadený polom JFET. Vyznačujú sa vysokým vstupným odporom (impedanciou).
 - c. BIMOS OZ - Základ je integrovaný tranzistor riadený polom MOSFET. Vyznačujú sa veľmi vysokým vstupným odporom (impedanciou). Jeho vlastnosti sa blížila vlastnostiam ideálneho OZ. Používajú sa v oblasti vf techniky, pri elektronických meracích prístrojoch, atď.
2. Podľa použitého napájania
 - a. Symetrické OZ - vyžadujú tzv. symetrické napájanie (napr. $+10V$ a $-10V$ voči zemi). Ich vstupný aj výstupný elektrický signál preto môže byť kladný aj záporný.
 - b. Nesymetrické OZ - Stačí len jedna polarita napájania, ich použitie je trochu jednoduchšie čo sa týka napájacieho zdroja. Neumožňujú však na výstupe získať záporné napätie, preto sa nehodí pre niektoré zapojenia.

Okrem použitia operačných zosilňovačov v analógových počítačoch (dnes už história), sa v súčasnosti používajú v rôznych typoch elektronických obvodov ako sú jednosmerné aj striedavé zosilňovače napäťového signálu, komparátory (porovnávacie obvody), klopné (správnejšie asi by bolo preklápacie) obvody, obmedzovače amplitúdy, aktívne elektronické filtre, prevodníky z analógového signálu na digitálne a naopak, sú základom elektronických PID regulátorov, elektronických meracích prístrojov, atď.

Najdôležitejšie vlastnosti a parametre operačných zosilňovačov

Statické parametre

- **Diferenčné napät'ové zosilnenie A_{Ud}** (ideálne: ∞ veľké). V reálnych OZ je veľkosť výstupného zosilneného napätia obmedzená predovšetkým napájacím napätím. Je definované ako

$$A_{Ud} = \frac{\Delta u_o}{\Delta(u_{i+} - u_{i-})}.$$
- **Súhlasné napät'ové zosilnenie A_{Us}** určuje, nakoľko je výstup OZ závislý od skutočných hodnôt napätia jeho vstupov voči zemi. Súhlasné napätie sa definuje často ako

$$u_s = \frac{u_{i+} + u_{i-}}{2}.$$
 V prípade ideálneho OZ je pri $u_{i+} = u_{i-}$ výstupné napätie vždy nulové, bez ohľadu na veľkosť $|u_{i+}|$ a $|u_{i-}|$. V prípade reálneho OZ platí pri $u_{i+} = u_{i-}$, že výstupné napätie je funkciou súhlasného napätia a **súhlasné zosilnenie** sa definuje vzťahom

$$A_{Us} = \left. \frac{\Delta u_o}{\Delta u_s} \right|_{u_{i+} - u_{i-} = \text{konšt.}}$$
- **Činiteľ potlačenia súhlasného napätia CMR** (common mode rejection) je definovaný pomerom diferenčného a súhlasného zosilnenia

$$CMR = \frac{A_{Ud}}{A_{Us}}$$
- **Vstupná impedancia** - OZ nemá zaťažovať vstupné obvody, ku ktorým je pripojený a ktorých el. signál zosilňuje. Musí teda vykazovať veľkú **vstupnú impedanciu** (ideálne: ∞). Tomuto stavu sa najviac približujú OZ BIFET a BIMOS so vstupnými obvodmi FET, ktoré majú vstupný odpor veľmi vysoký, takže pripojené obvody prakticky nezaťažujú (vstupom OZ takmer nepreteká el. prúd).
- **Výstupná impedancia** - zosilnenie by malo byť nezávislé od zaťaženia výstupu OZ. To znamená, že by ho nemala ovplyvňovať veľkosť impedancie záťaže (odporu). Túto požiadavku nie je možné pri tranzistorovom zosilňovači splniť, ale OZ sa splneniu tejto podmienky veľmi približuje. Jeho **výstupná impedancia** má byť čo najmenšia (ideálne: 0, reálne: jednotky až desiatky Ω). najlepšie nulová.
- **Vstupná napät'ová nesymetria** - nulovému vstupnému napätiu musí odpovedať nulové výstupné napätie. Keďže vstupné obvody OZ nie sú úplne symetrické, na výstupe sa OZ sa objaví určité napätie aj keď napätie medzi oboma vstupmi je nulové. Túto nedokonalosť je možné a spravidla aj nutné dodatočne kompenzovať. **Vstupná napät'ová nesymetria** sa teda rovná napätiu, ktoré musíme priviesť na vstupné svorky OZ, aby výstupné napätie bolo nulové (ideálne: 0).
- **Drift** - okrem toho dochádza samovoľne k zmenám vstupnej napät'ovej nesymetrie. Tomuto javu sa zvyčajne hovorí **drift** (ideálne: 0). Pretože najzávažnejším pôvodcom driftu je zmena teploty polovodičových prechodov, vstupnú napät'ovú nesymetriu sa podarí spravidla vykompenzovať až po zahriatí integrovaného obvodu na prevádzkovú teplotu.
- **Vstupný kľudový prúd** - napätie, ktoré sa objaví na výstupe OZ, aj keď je vstupný signál nulový, je spôsobené nielen vstupnou napät'ovou nesymetriou, ale aj pretekaním vstupného kľudového prúdu vstupným odporom zosilňovača. Vzniknuté napätia na odpore sa potom zosilňovačom zosilní a objaví na výstupe. Ide teda o prúd, ktorý musíme priviesť na vstup zosilňovača, aby sme na jeho výstupe dosiahli nulové napätie (ideálne: 0).
- Fázový posun medzi vstupným a výstupným napät'ovým signálom je 0° alebo 180° .
- Malá **vlastná spotreba** [mW], atď.

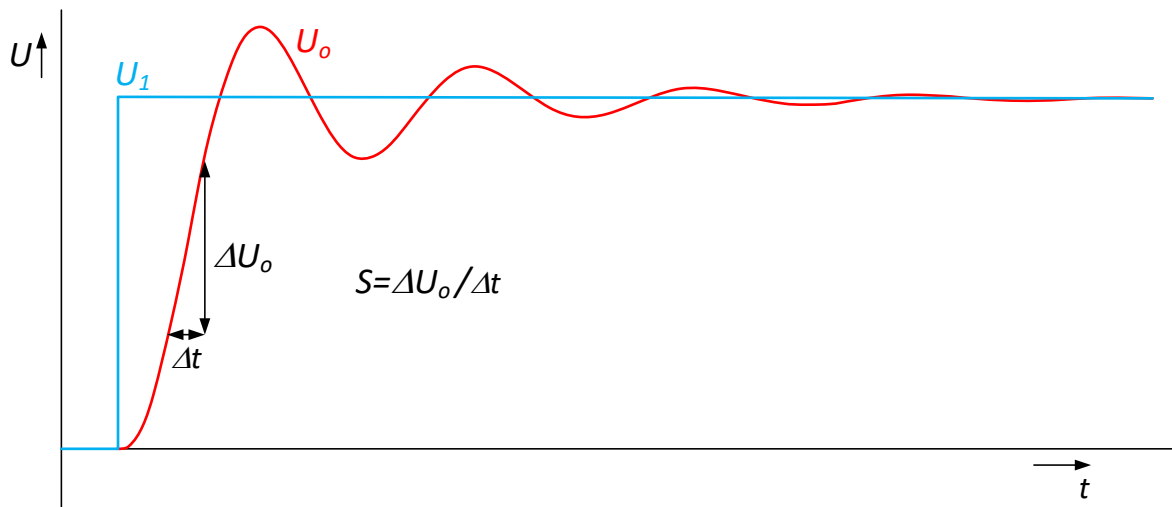
Nelineárne a dynamické parametre

Nelineárne a dynamické parametre udávajú medze, v ktorých platí opis pomocou lineárnych koeficientov. Dôležité katalógovo udávané parametre:

- Medzná hodnota vstupného dif. napätia $U_{ip\ max}$
- Medzná hodnota vstupného súhlasného napätia $U_{i\ max}$
- Rozkmit výstupného napätia - väčšinou sa blíži napájaciemu napätiu $\pm U_{cc}$
- Minimálne a maximálne napájacie napätie U_{cc}
- Minimálny zaťažovací odpor

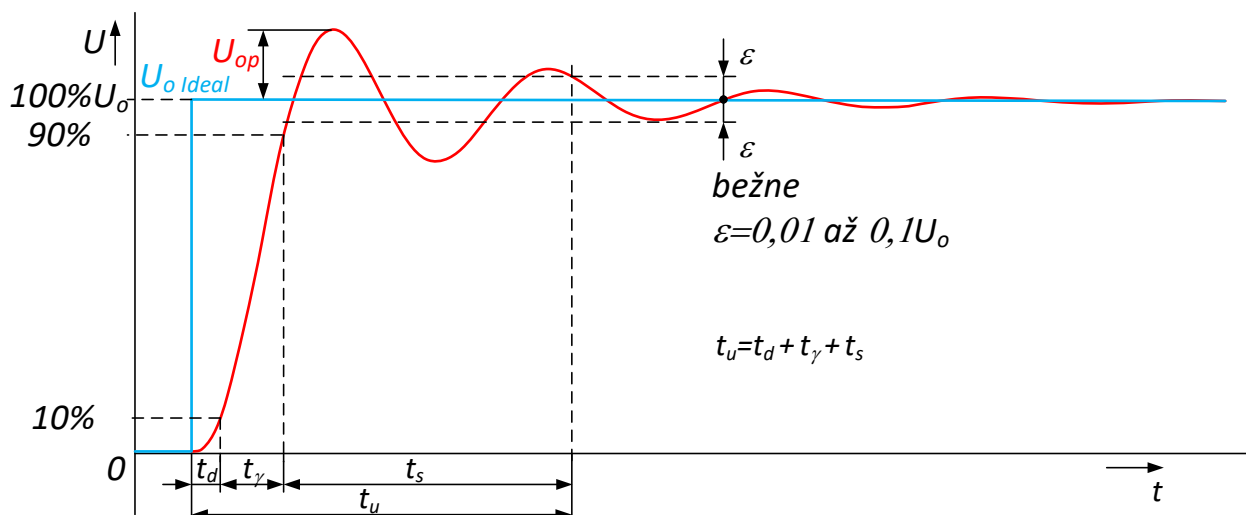
Ďalej nasledujú niektoré dynamické obmedzenia:

- **Rýchlosť prebehu S** - rýchlosť zmeny výstupného napätia, ktorú OZ dokáže vyvinúť za jednu mikrosekundu (**ideálne**: ∞). Udáva sa vo voltoch za mikrosekundu ($V / \mu s$).



Bežné OZ majú rýchlosť prebehu S 0,5-5V / μs , špeciálne až 100V / μs

- **Doba ustálenia t_s** - časový interval od prechodu signálu určitou úrovňou (väčšinou 90%) do doby, v ktorej signál naposledy dosiahne úroveň, ktorá sa líši od ustálenej hodnoty o zvolenú hodnotu ε . To teda nie je veľmi pekná definícia, ale dúfam, že nasledujúci obrázok to dostatočne vysvetlí:

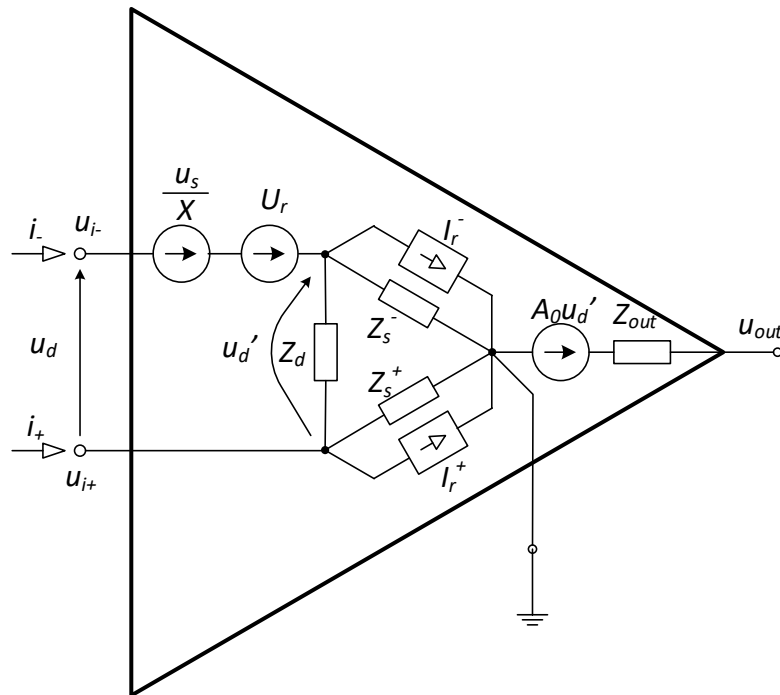


- **Doba zotavenia t_z** - udáva schopnosť OZ vyvieť výstup za určitý čas zo saturácie
- **Medzná frekvencia f_p** udáva frekvenciu, pri ktorej dosiahne strmosť sínusovky s amplitúdou U_{OM} rýchlosť prebehu S , pričom dochádza k skresleniu maximálne 1%. Sínusovka má maximálnu strmosť pri prechode nulou.
- Pri zosilňovaní striedavého napätia sa zosilnenie smerom k vyšším frekvenciám znižuje. Požadujeme teda veľký rozsah zosilňovaných frekvencií striedavého napäťového signálu (**ideálne**: 0 až ∞ Hz). Preto sa pri reálnych OZ zavádza **frekvenčná kompenzácia** pomocou externých pasívnych súčiastok. Niektoré OZ majú už túto frekvenčnú kompenzáciu zabudovanú vo vnútri a nazývame ju vnútornou frekvenčnou kompenzáciou. Avšak vnútorná kompenzácia je nastavená pre určitý medzný kmitočet s ohľadom na čo najväčšie zosilnenie. V mnohých prípadoch je tento kmitočet príliš nízky. Ak teda chceme dosiahnuť širšie prenášané pásmo, volíme operačný zosilňovač s vonkajšou kompenzáciou aj za cenu menšieho zosilnenia.

Modely OZ

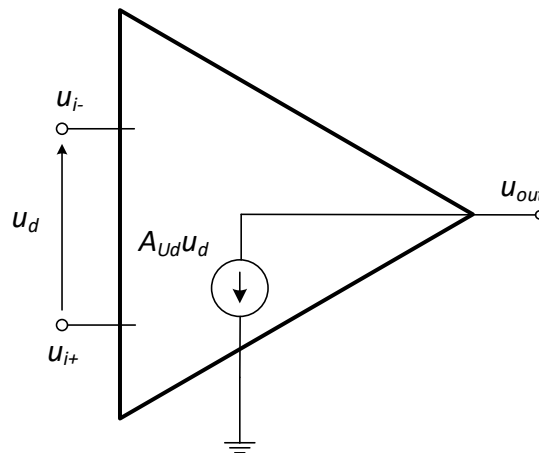
Keď poznáme základné vlastnosti reálneho operačného zesilovača, môžeme sa pokúsiť zostaviť vhodný náhradný model, ktorým môžeme pri analýze obvodov operačný zosilňovač nahradiť. Ako

u všetkých modelov, aj tu si musíme byť vedomí, že neopisuje celé správanie súčiastky, ale len jej vybrané zložky, a to vo zvolenej oblasti. Spravidla si vystačíme s lineárnym modelom, ktorý obsahuje lineárne rezistory a napäťové a prúdové zdroje. Vhodný lineárny model je uvedený na obr.



Napäťový zdroj U_r zahŕňa všetky rušivé napätia (napr. Napäťovú nesymetriu aj šum), obdobne zdroje prúdu I_r a I_r^+ zahŕňajú všetky rušivé prúdy. Parameter $X = A_{Ud} / A_{Us}$ je činiteľ potlačenia súhlasného napätia. Všimnite si, že v modeli nie je zahrnuté nelineárne správanie, napr. existencia saturačného napätia.

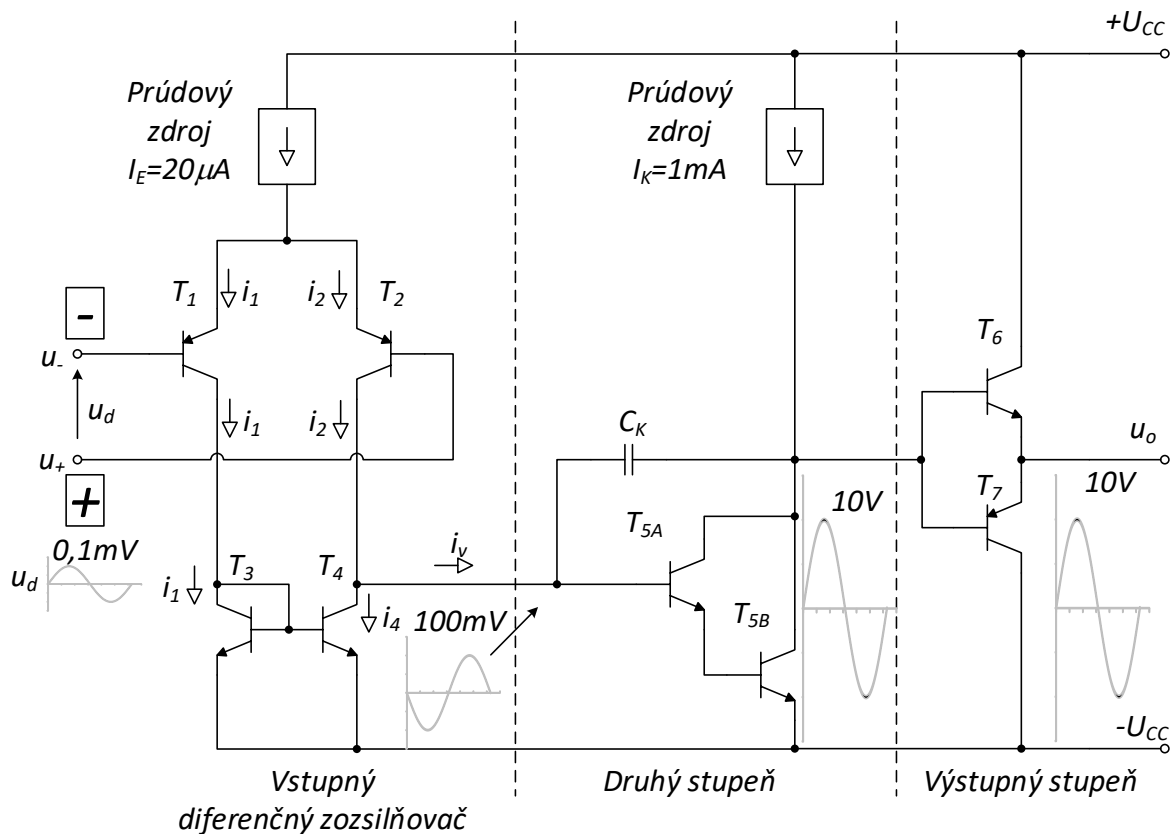
Model ideálneho OZ je na obr.



Ako je zrejmé z obrázka, ideálny OZ možno modelovať ideálnym napäťovým zdrojom, riadeným napätím, pričom A_{Ud} sa blíži hodnote nekonečno ∞ .

Zjednodušené vnútorné zapojenie OZ

Vnútorné zapojenie OZ môžeme zjednodušiť znázorniť takto:



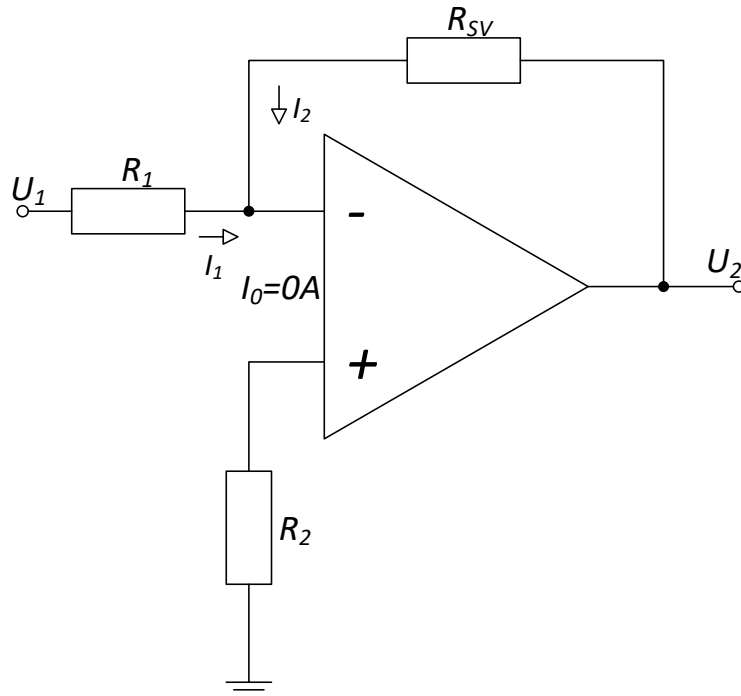
Funkcie jednotlivých častí obvodu sú nasledujúce:

- Vstupný rozdielový zosilňovač zosilňuje rozdielové napätie u_d približne 10^3 až 10^4 krát. V prípade BIFET OZ – sú v tomto stupni namiesto bipolárnych tranzistorov použité tranzistory riadené poľom JFET. V prípade BIMOS OZ zase MOS FET tranzistory.
- Druhý stupeň - tranzistory T_{5A} a T_{5B} sú zapojené v tzv. Darlingtonovom zapojení. Toto zapojenie má malý vstupný prúd a neovplyvňuje vlastnosti predchádzajúceho rozdielového zosilňovača. Zosilnenie oboch tranzistorov sa násobí a tento stupeň poskytuje napäťové zosilnenie 100-300.
- Výstupný stupeň – je realizovaný komplementárnym emitorovým sledovačom, ktorého napäťové zosilnenie je skoro 1 a ktorý oddeľuje záťaž od predchádzajúcich stupňov.
- Kapacita C_K zlepšuje frekvenčnú stabilitu zapojenia a obmedzuje zákcity na výstupe. Jej zväčšenie má však za následok zníženie rýchlosti prebehu výstupného napätia a teda celkovo horšie dynamické vlastnosti daného OZ.

Maximálne výstupné napätie OZ je teda dané napájacím napätím U_{CC+} a U_{CC-} . Pri tomto výstupnom napätí je ale OZ v saturácii.

Základné zapojenia s OZ

Samotný OZ vykazuje veľké napäťové zosilnenie A_{ud} . V bežných praktických aplikáciách sa však požadujú oveľa nižšie hodnoty. Obmedzenie napäťového zosilnenia OZ je realizované pomocou spätnoväzbového rezistora R_{SV} zapojeného medzi jeho výstupom a invertujúcim vstupom (-). Podľa toho, na ktorý vstup OZ privádzame zosilňovaný signál rozlišujeme tieto dve základné zapojenia:

1. Invertujúce zapojenie

R_1 – vstupný rezistor

R_{SV} – rezistor spätnej väzby

R_2 – rezistor na kompenzáciu vstupnej nesymetrie

Odvodenie rovnice pre celkové napäťové zosilnenie invertujúceho zapojenia s OZ:

Vstup ideálneho OZ má nekonečný odpor. Do invertujúceho ani neinvertujúceho vstupu teda netečie žiadny prúd ($I_0 = 0A$). Medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom musí byť nulové napätie lebo ideálny OZ má nekonečné napäťové diferenčné zosilnenie výstupné napätie má byť konečné. Tomuto nulovému napätiu sa hovorí **virtuálna nula**.

$$I_1 + I_2 = I_0$$

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_{SV}}$$

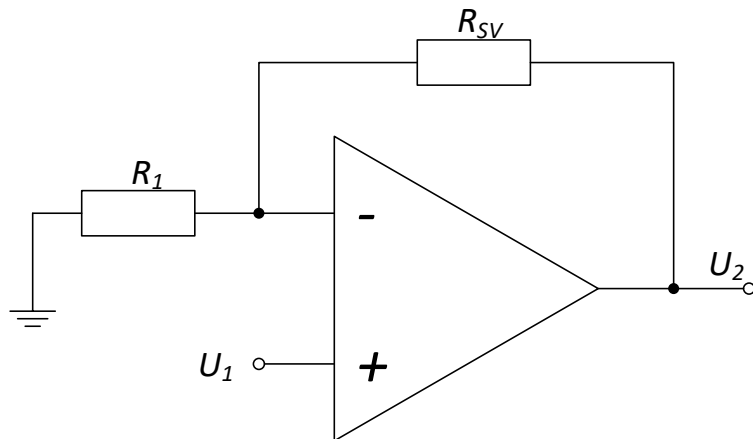
$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_{SV}} = 0 \Rightarrow \frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_2}{R_{SV}}$$

$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_{SV}}{R_1}$$

Pomer $\frac{R_{SV}}{R_1}$ udáva celkovú veľkosť napäťového zosilnenia A_U invertujúceho zapojenia.

Pri tomto zapojení dôjde k posunu fázy medzi vstupným a výstupným napätím o 180° . Ak je teda na vstupe napr. kladné napätie, získame na výstupe invertujúceho zapojenia zosilnené záporné napätie a naopak.

2. Neinvertujúce zapojenie



$$U_1 = R_1 \cdot I, U_2 = (R_1 + R_{SV}) \cdot I$$

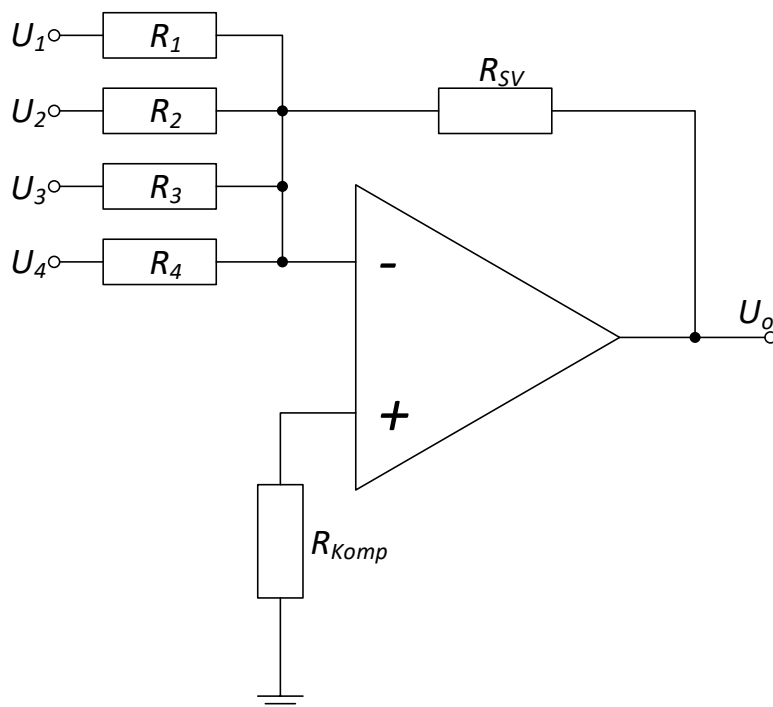
$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{(R_1 + R_{SV}) \cdot I}{R_1 \cdot I} = \frac{(R_1 + R_{SV})}{R_1}$$

$$A_U = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_{SV}}{R_1} = 1 + \frac{R_{SV}}{R_1}$$

Vstupný napäťový signál je vo fáze s výstupným zosilneným napäťovým signálom. Ak je teda na vstupe napr. Kladné napätie, na výstupe získame zosilnené napätie rovnakej polarity.

Vybrané zapojenia s OZ

1. Súčtový zosilňovač - Sumátor



Ak na invertujúci vstup OZ privedieme viac napäťových signálov, potečie do neho prúd, ktorý sa rovná súčtu jednotlivých prúdov. Taký zosilňovač potom nazývame sumačný (súčtový). Veľkosť prúdov je daná Ohmovým zákonom:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_2}, I_3 = \frac{U_3}{R_3}, I_4 = \frac{U_4}{R_4},$$

Výstupné napätie je potom dané vzťahom:

$$U_o = -\left(\frac{R_{SV}}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_{SV}}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_{SV}}{R_3} \cdot U_3 + \frac{R_{SV}}{R_4} \cdot U_4\right)$$

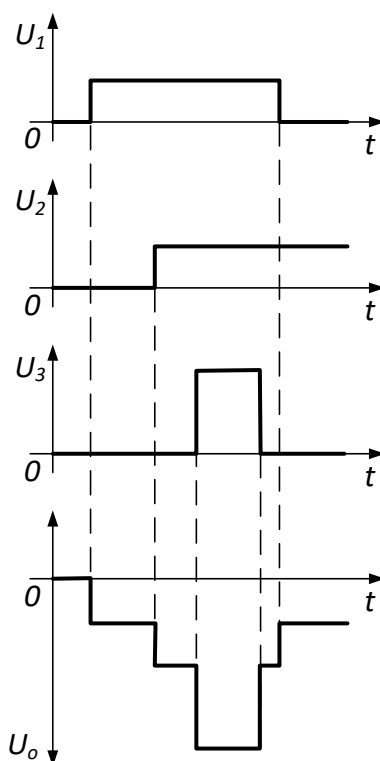
Ak sú všetky rezistory rovnaké ($R_{SV} = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) rovnaké, potom je výstupné napätie U_o dané vzťahom:

$$U_o = -(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$$

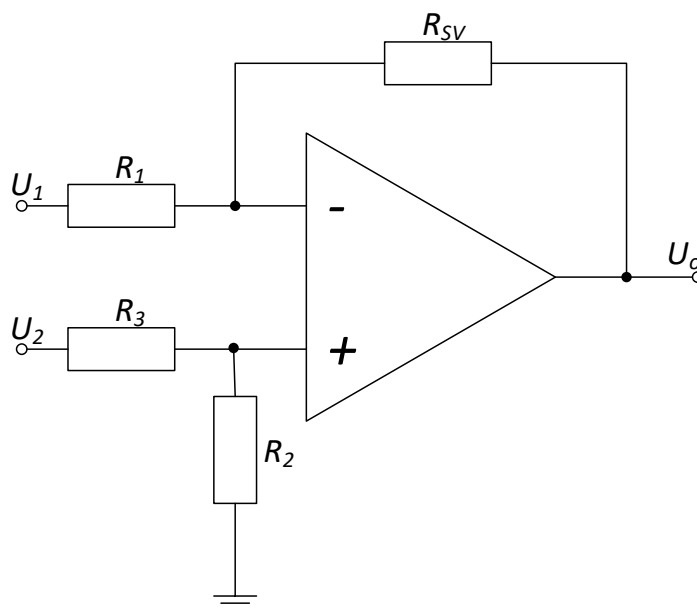
Spoločný bod všetkých odporov je na nulovom potenciáli, ktorý musíme zachovať, preto je nevyhnutný kompenzačný odpor na neinvertujúcom vstupe. Kompenzačný odpor vypočítame ako paralelné spojenie

$$\frac{1}{R_{Komp}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_{SV}}$$

Príklad pre tri vstupné napätia:



2. Rozdielový zosilňovač



Toto zapojenie sa najčastejšie používa na sledovanie dvoch napätových signálov s veľmi málo odlišnými hodnotami napätia, výstupné napätie je potom úmerné rozdielu napätia na vstupoch (OZ zosilňuje rozdiel oboch vstupných napätí).

Invertujúci zosilňovač zosilňuje napätie U_1 a neinvertujúci zosilňovač zosilňuje U_2 .

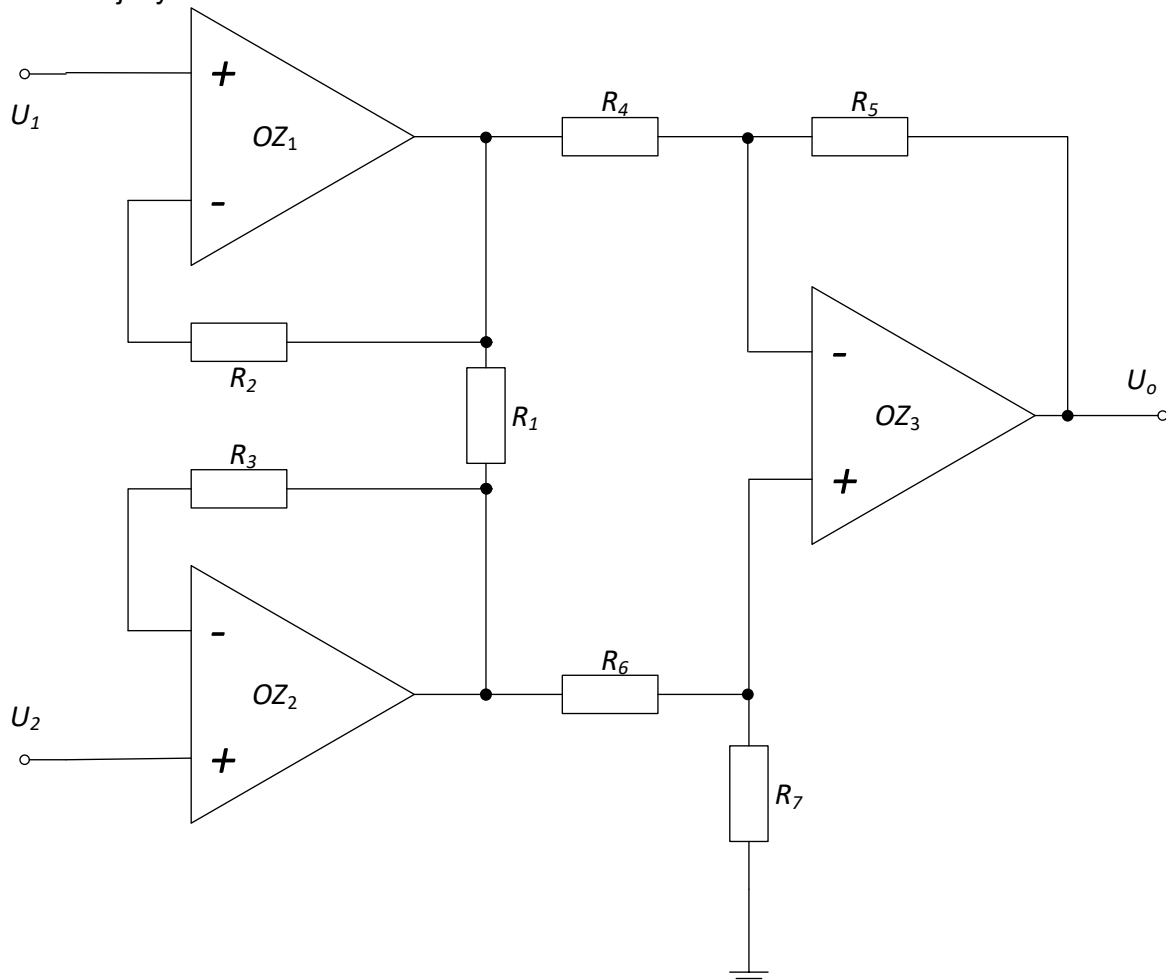
Ak má diferenčný zosilňovač skutočne zosilňovať len rozdielové napätie, musí sa dodržať nasledujúca podmienka:

$$\frac{R_{SV}}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

To znamená, že dvojica odporov R_2 a R_3 musí byť v rovnakom pomere ako R_{SV} a R_1 . Veľmi záleží na tom, aby použité rezistory boli presné. Výstupné napätie U_o je dané vzťahom:

$$U_o = \frac{R_{SV}}{R_1} \cdot (U_2 - U_1)$$

3. Prístrojový zosilňovač



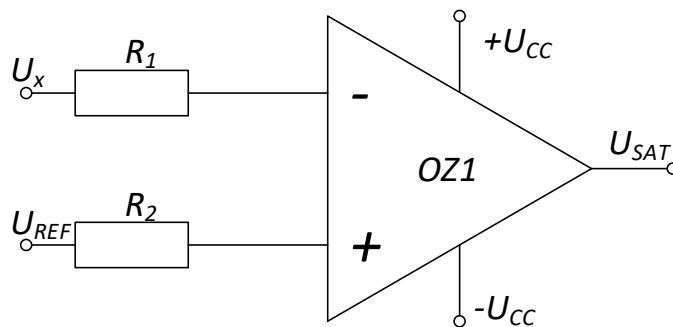
Požiadavka na získanie rozdielu dvoch napätí (tj. určenie diferenciálneho napätia) je veľmi častou aplikáciou v meracej technike. Jednoduché zapojenie rozdielového zosilňovača trpia predovšetkým konečnou veľkosťou a nezhodou vstupných odporov. Preto sa pre presné aplikácie používa zložitejší obvod, tzv. Prístrojový zosilňovač, vid' obr.). Prvýkrát sa stretávame so zapojením, v ktorom je použitých niekoľko operačných zosilňovačov. Napriek tomu je približná analýza problému jednoduchá, pretože jednotlivé operačné zosilňovače pracujú samostatne (žiadna spätná väzba sa neuzatvára cez dva operačné zosilňovače). Nebudeme odvodzovať vzťah pre výstupné napätie, uvedieme iba výsledok, ktorý platí za podmienok $R_4 = R_6$ a $R_5 = R_7$. Potom je výstupné napätie

$$U_o = (U_2 - U_1) \cdot \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \frac{R_5}{R_4}$$

priamoúmerné rozdielu vstupných napätí.

- Ak sa pozrieme podrobne na schému zapojenia, je vidieť, že sa rozpadá na tri funkčné bloky: 1) blok tvorený OZ_1 , R_1 a R_2 je neinvertujúci zosilňovač napätia U_1 ; 2) blok tvorený OZ_2 , R_1 a R_3 je neinvertujúci zosilňovač napätia U_2 ; 3) blok tvorený OZ_3 a R_4 - R_7 je rozdielový zosilňovač, ktorého vstupné napätie tvoria výstupné napätia predchádzajúcich zosilňovačov. Pretože tento rozdielový zosilňovač zaťažuje iba výstupy predchádzajúcich (ideálnych) operačných zosilňovačov, ktoré majú nulový výstupný odpor, nebudú nám tu vadiť jeho konečné vstupné odpory.
- Obe vstupné napätie sú privedené priamo na neinvertujúci vstup príslušného operačného zosilňovača. To znamená, že obidva vstupné odpory sú nekonečné, $R_{in1} = R_{in2} = \infty$.

4. Komparátor (Komparácia = Porovnanie)

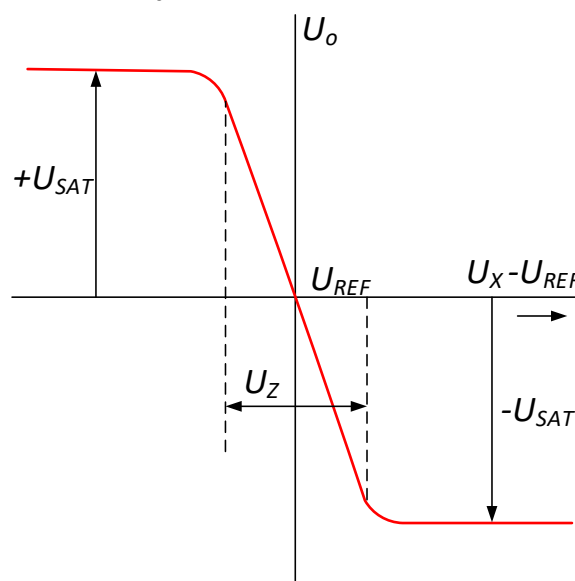


Je to obvod, ktorý sa používa na porovnanie dvoch napätiových signálov. Využíva sa napr. v obvodoch číslicových voltmetrov, na prevod analógovej hodnoty meraného napätia do digitálnej podoby (log.0 a log.1).

V OZ nie je zavedená spätná väzba, obmedzujúca zosilnenie OZ. Stačí nepatrné vstupné napätie a výstup OZ sa dostane do tzv. saturácie.

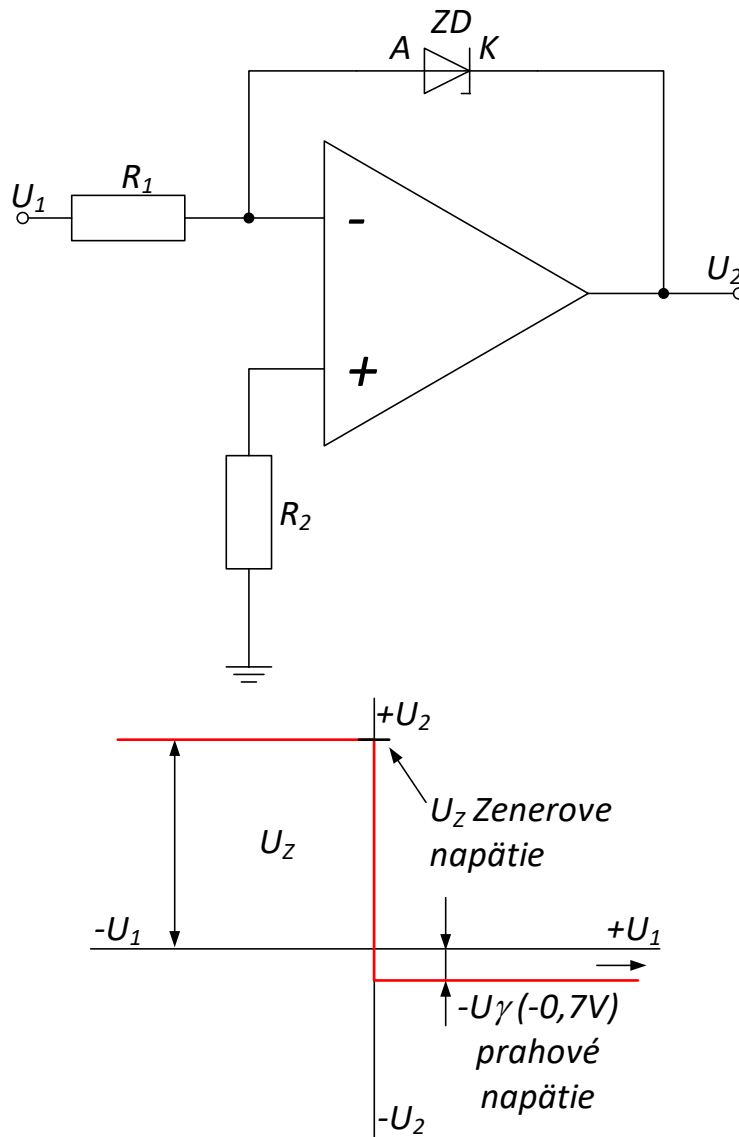
Saturácia je ustálený stav výstupu, keď sa zosilňovač otvorí naplno a ďalej už nereaguje na napätiové zmeny na vstupe. Na výstupe OZ je maximálne výstupné napätie U_{sat} (táto hodnota je daná predovšetkým veľkosťou napájacieho napätia U_{CC}). Rozhodujúce je, či sa otvoril do kladných alebo záporných hodnôt.

Na prvý vstup komparátora privedieme neznáme napätie U_x , ktoré komparátor porovnáva s referenčným napätím U_{REF} , ktorého hodnotu volíme podľa potreby. Pomocou tohto referenčného napätia zosilňovač zisťuje, či je neznáme napätie U_x menšie alebo väčšie ako referenčné U_{REF} . Výstupné napätie nadobúda dve stabilné úrovne: kladné alebo záporné - maximálne výstupné hodnoty (režim saturácie). Na obrázku je prevodová charakteristika komparátora.



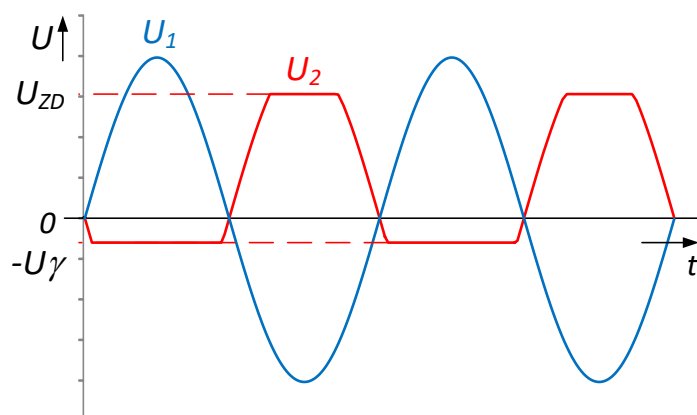
5. Obmedzovač amplitúdy

Sú to obvody, ktoré neovplyvňujú výstupné napätie, pokiaľ neprekročí požadovanú úroveň. Na prekročení napätia reagujú obmedzením napätia. Na obrázkoch sú schéma zapojenia prevodová charakteristika.

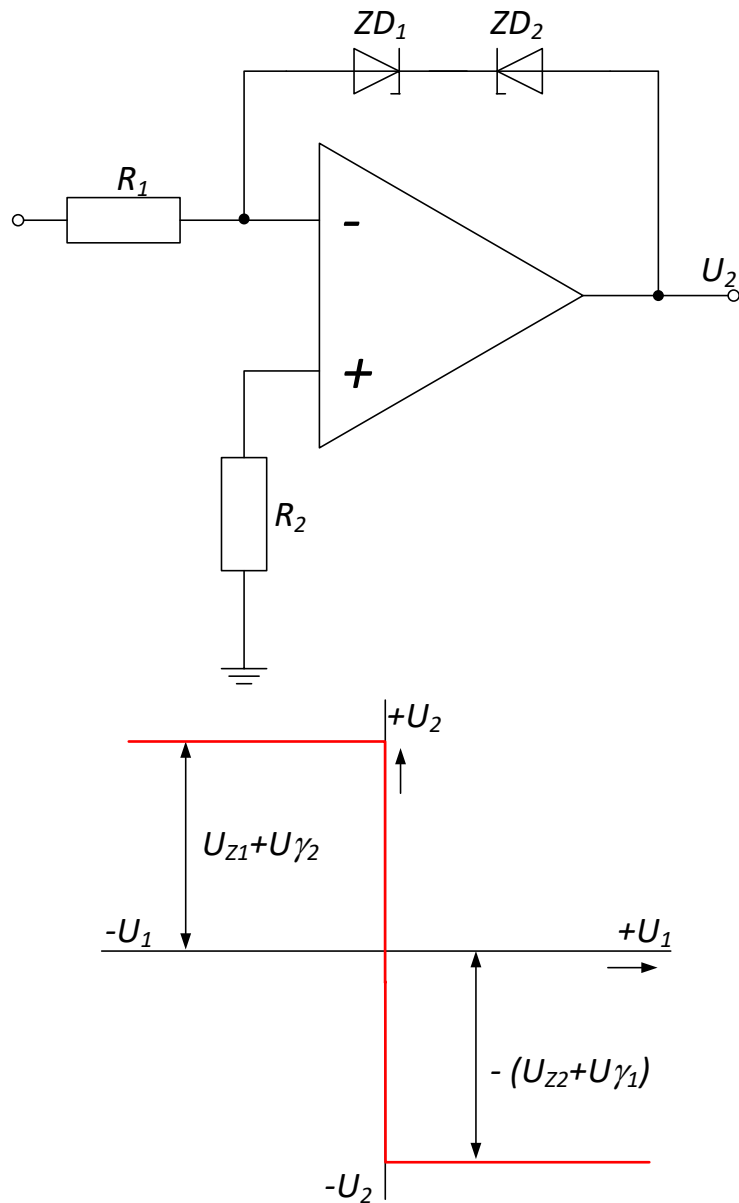


Ak je na vstup privedené kladné napätie, Zenerova dióda ZD je v priepustnom režime. Výstupné napätie U_2 je obmedzené veľkosťou prahového napätia diódy, pričom výstupné napätie je záporné (invertujúce zapojenie). $U_2 = -U_\gamma = -0,7V$.

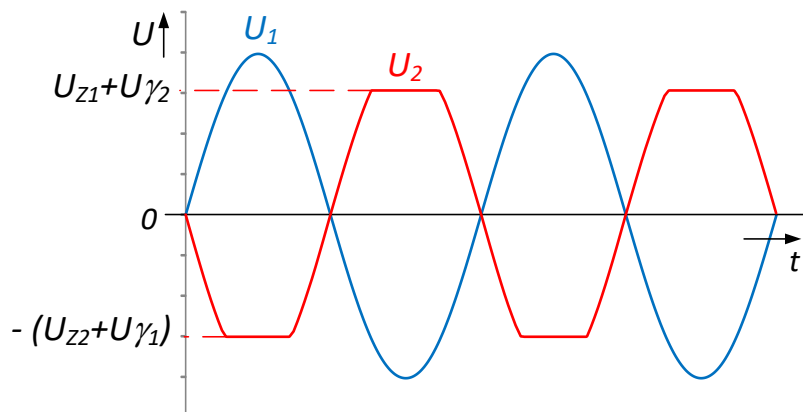
Ak je na vstup privedené záporné napätie, Zenerova dióda ZD je v závernom režime. Výstupné napätie U_2 je obmedzené veľkosťou Zenerovho (prierazné) napätia diódy, pričom výstupné napätie je kladné (invertujúce zapojenie). $U_2 = U_Z$.



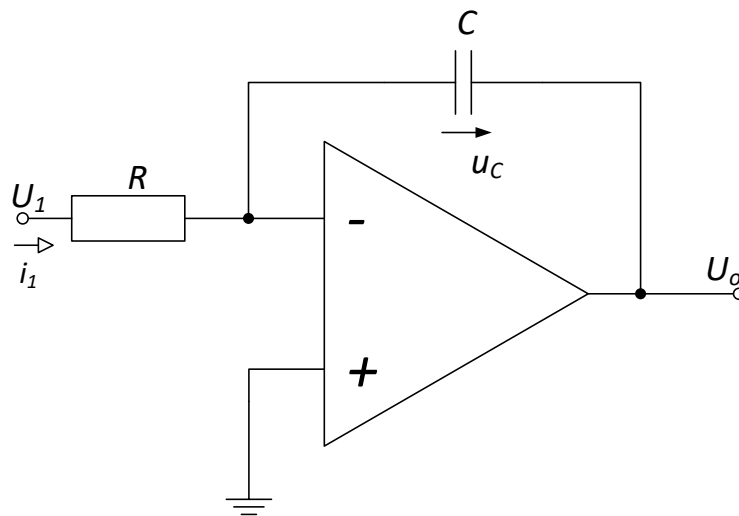
Ak zapojíme do spätnej väzby OZ dve zenerove diódy proti sebe, získame symetrický (súmerný) obmedzovač amplitúdy.



V prípade kladného aj záporného napätia na invertujúcom vstupe OZ je vždy jedna Zenerova dióda polarizovaná priepustne (úbytok napätia je rovný prahovému napätiu $U_\gamma = 0,7V$) a druhá Zenerova dióda je polarizovaná záverne (úbytok napätia je rovný Zenerovmu napätiu U_{ZD}). Výstupné napätie U_2 bude maximálne súčtom týchto dvoch napätí $U_\gamma + U_{ZD}$.



6. Integrovaný člen - integrátor



Pre napätie na kondenzátore platí:

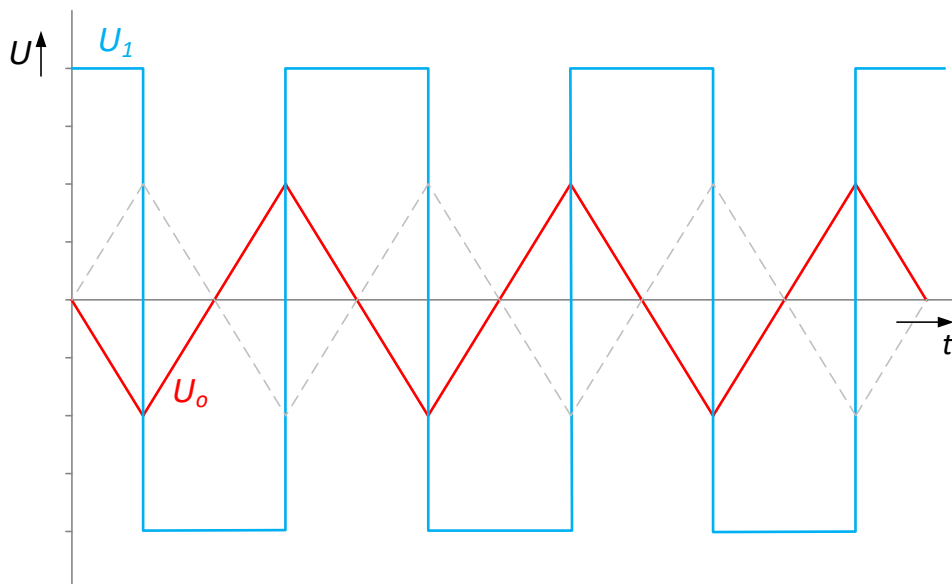
$$u_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_1(t)}{R_1} dt$$

Z čoho je možné získať bežne udávaný vzťah pre výstupné napätie:

$$u_o = \frac{1}{R_1 C} \int u_1(t) dt - u_o(t = 0)$$

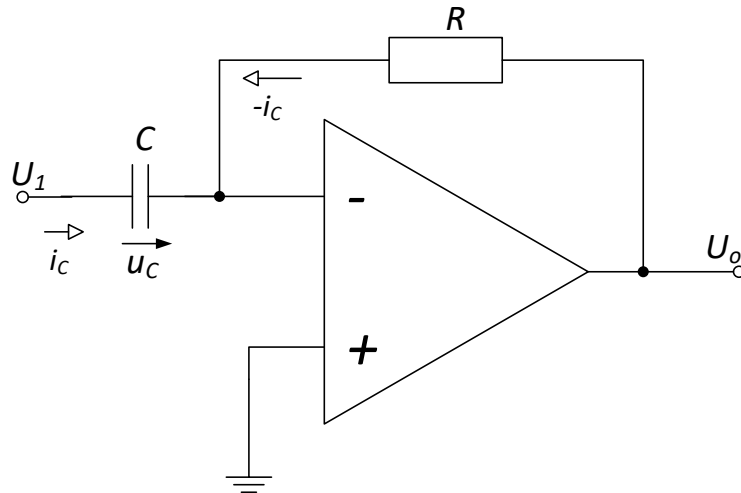
kde $u_o(t = 0)$ symbolizuje napätie na výstupe pri "spustení" integrátora a RC je časová konštanta integrátora.

Ak privedieme na vstup OZ skokom sa meniace napätie (obdĺžnikový priebeh), získame vplyvom nabíjania a vybíjania kondenzátora zapojeného v spätnej väzbe OZ na výstupe približne trojuholníkový priebeh napätia.



7. Derivačný člen- derivátor

Aj integrátor a derivátor sa používa napríklad v elektronických regulačných obvodoch.



Pre prúd i_C platí známy vzťah

$$i_C = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \frac{du_1(t)}{dt},$$

potom

$$u_o = -R \cdot i_C = -RC \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$$

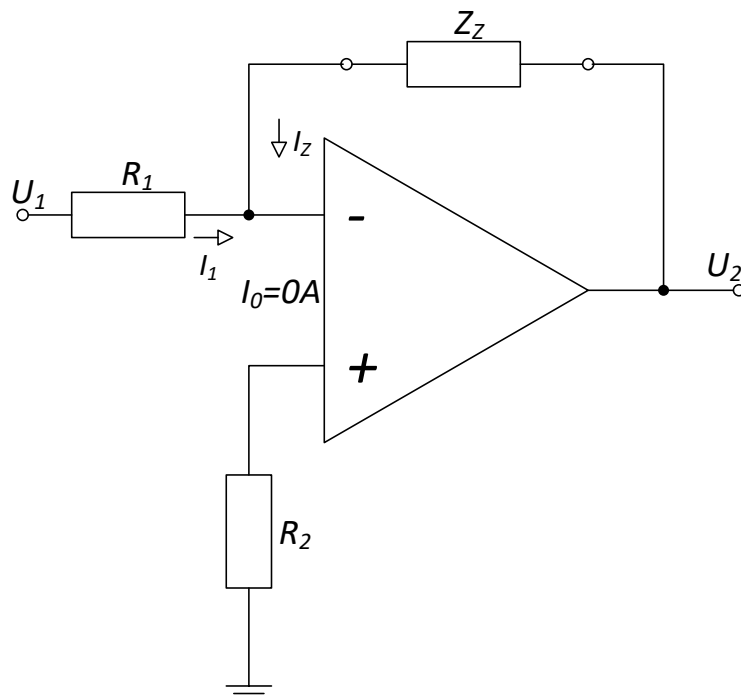
Derivačný článok teda plní opačnú funkciu ako integrátor.

8. Prevodník napätie/prúd

Využitá sa v aplikáciách, kde je potrebný zdroj konštantného prúdu, ktorého veľkosť je nutné riadiť napätím.

$$I_1 + I_Z = I_0 = 0$$

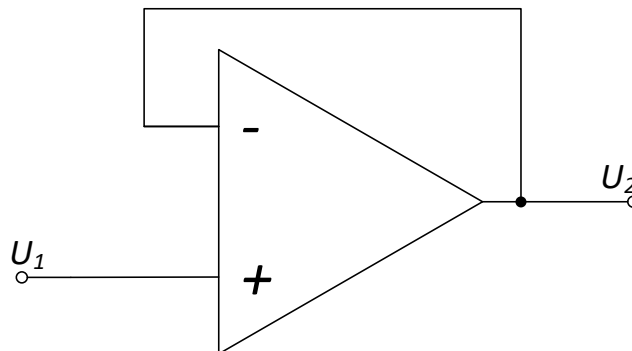
$$I_Z = -I_1 = -\frac{U_1}{R_1}$$



Prúd tečúci záťažou Z_Z nezávisí od jej impedancie Z_Z a je úmerný vstupnému napätiu U_1 , ktorým je možné riadiť jeho veľkosť.

9. Sledovač

Jedná sa o zapojenie neinvertujúceho zosilňovača so ziskom $A_u = 1$. Má najväčší vstupný odpor zo všetkých možných zapojení, a preto sa používa na oddelenie zdrojov signálu s veľkým výstupným odporom.



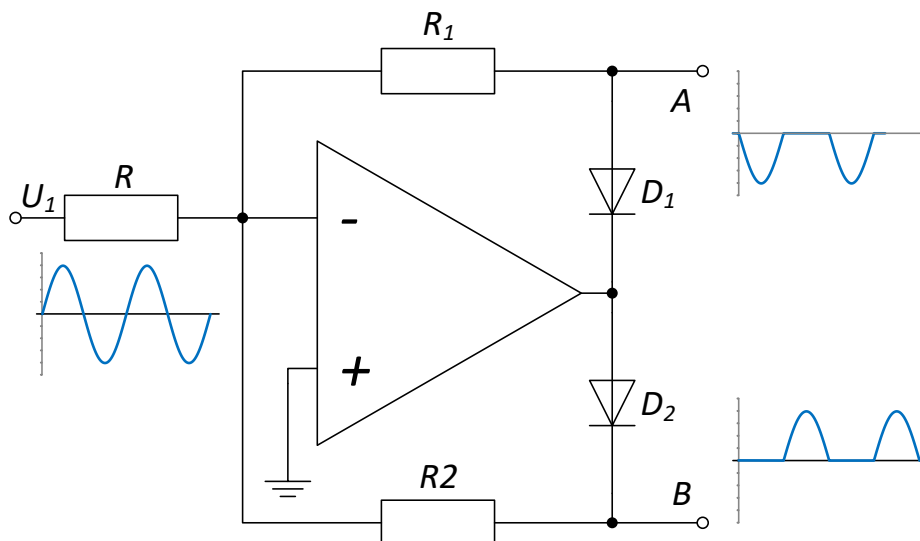
Neinvertujúci zosilňovač má zosilnenie (ako bolo odvodené)

$$A_u = 1 + \frac{R_{SV}}{R_1}$$

Keďže $R_{SV} = 0$ a $R_1 \rightarrow \infty$, potom pomer $R_{SV}/R_1 = 0$, čiže $A_u = 1$.

10. Usmerňovač

Dvojcestný usmerňovač



Ak privedieme na vstup dvojcestného usmerňovača kladné napätie, objaví sa na výstupe OZ záporné napätie. Dióda D_2 je zatvorená, slučka spätnej väzby sa uzatvára cez diódu D_1 a rezistor R_1 . Spätná väzba sa snaží udržať na invertujúcom vstupe nulové napätie (virtuálne zem) a napätie v bode A bude dané pomerom R_1/R . Ak nebude prekročené maximálne výstupné napätie, OZ a jeho výstup sa nedostane do saturácie, potom je napätie v bode A nezávislé od úbytku napätia na D_1 . Ak privedieme na vstup záporné napätie, bude uzavretá dióda D_1 a spätná väzba sa uzavrie cez D_2 a R_2 .