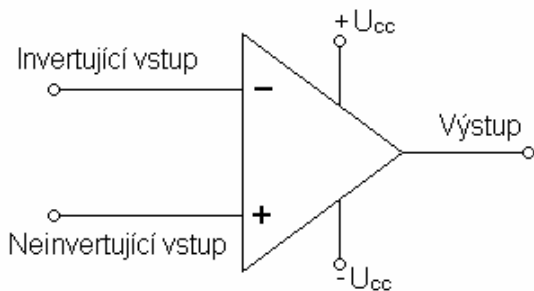


OPERAČNÍ ZESILOVAČ (OZ)



Operační zesilovač je polovodičová součástka vyráběná formou integrovaného obvodu vyznačující se velkým napětovým zesílením vstupního rozdílového napětí (diferenciální napětový zesilovač). Napětové zesílení A_U samotného OZ bývá řádově 10^4 až 10^9 . Zesiluje jak stejnosměrné, tak střídavé napětové signály.

Operační zesilovač má dva vstupy (invertující a neinvertující vstup) a jeden výstup. Kromě toho má další vývody - pro napájení, kmitočtovou kompenzaci a kompenzaci vstupní napětové nesymetrie.

Přivádíme-li vstupní el. signál na *invertující vstup* OZ, dojde kromě zesílení, také k posunutí fáze zesíleného výstupního el. signálu o 180° – opačná fáze (invertovat = převrátit, obrátit).

Přivádíme-li vstupní el. signál na *neinvertující vstup* OZ, dojde k jeho zesílení, avšak fázový posun mezi vstupním a výstupním (zesíleným) el. signálem je nulový (fáze se nezmění).

Rozdělení OZ

1. Podle integrovaného zesilovacího prvku

- Bipolární OZ – základem je integrovaný bipolární tranzistor. Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější OZ, používají se pro zesilování stejnosměrných a střídavých mf napětových signálů.
- BIFET OZ – základem je integrovaný unipolární tranzistor JFET. Vyznačují se vysokým vstupním odporem (impedancí).
- BIMOS OZ - základem je integrovaný unipolární tranzistor MOSFET. Vyznačují se velmi vysokým vstupním odporem (impedancí). Jeho vlastnosti se blíží vlastnostem ideálního OZ. Používají se v oblasti vf techniky, u elektronických měřících přístrojů, atd.

2. Podle použitého napájení

- Symetrické OZ - vyžadují tzv. symetrické napájení (např. +10V a -10 V proti zemi). Jejich vstupní i výstupní elektrický signál proto může být kladný i záporný.
- Nesymetrické OZ - stačí jen jedna polarita napájení, jejich použití je trochu jednodušší co se týče napájecího zdroje. Neumožňují však na výstupu získat záporné napětí, proto se nehodí pro některá zapojení.

Použití OZ

Operační zesilovače byly původně vyvinuty pro realizaci matematických operací (odtud jejich název) v éře analogových počítačů, kde byly používány pro realizaci základních aritmetických operací sčítání, odečítání, dělení a násobení a rovněž pro integraci a derivaci analogových signálů. Časem se ukázalo, že tyto obvody mají daleko širší uplatnění.

Vedle použití operačních zesilovačů v analogových počítačích (dnes již historie), se v současnosti používá v řadě elektronických obvodů jako jsou stejnosměrné i střídavé zesilovače napětového signálu, komparátory (porovnávací obvody), klopné obvody, omezovače amplitudy, aktivní elektronické filtry, převodníky z analogového signálu na digitální a naopak, jsou základem elektronických PID regulátorů, elektronických měřících přístrojů, atd.

Vlastnosti a parametry operačních zesilovačů

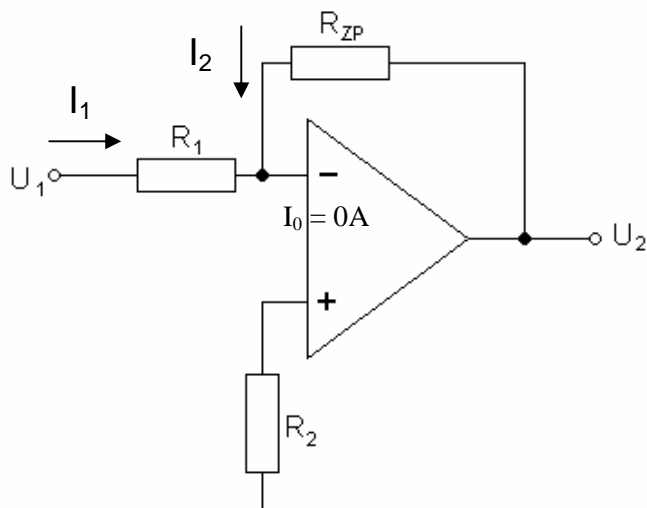
1. Velké napěťové zesílení A_U (ideálně ∞ velké). U reálných OZ je velikost výstupního zesíleného napětí omezena především napájecím napětím.
2. Při zesilování střídavého napětí se zesílení směrem k vyšším kmitočtům zmenšuje. Požadujeme tedy velký rozsah zesilovaných frekvencí střídavého napěťového signálu (ideálně: 0 až ∞ Hz). Proto se u reálných OZ zavádí kmitočtová kompenzace pomocí externích pasivních součástek. Některé OZ mají již tuto kmitočtovou kompenzaci zabudovanou uvnitř a nazýváme ji vnitřní kmitočtovou kompenzací. Avšak vnitřní kompenzace je nastavena pro určitý mezní kmitočet s ohledem na co největší zesílení. V řadě případů je tento kmitočet příliš nízký. Chceme-li tedy dosáhnout širšího přenášeného pásma, volíme operační zesilovač s vnější kompenzací i za cenu menšího zesílení.
3. Zesílení by mělo být nezávislé na zatížení výstupu OZ. To znamená, že by ho neměla ovlivňovat velikost impedance zátěže (odporu). Tento požadavek nelze u tranzistorového zesilovače splnit, ale OZ se splnění této podmínky velmi přibližuje. Jeho výstupní impedance má být co nejmenší, nejlépe nulová.
4. OZ nemá zatěžovat vstupní obvody, ke kterým je připojen a jejichž el. signál zesiluje. Musí tedy vykazovat velkou vstupní impedanci, nejlépe nekonečnou. Tomuto stavu se nejvíce přibližují OZ BIFET a BIMOS se vstupními obvody FET, které mají vstupní odpor velmi vysoký, takže připojené obvody prakticky nezatěžují (vstupem OZ téměř neprochází el. proud).
5. Nulovému vstupnímu napětí musí odpovídat nulové výstupní napětí. Jelikož vstupní obvody OZ nejsou zcela symetrické, na výstupu se OZ se objeví určité napětí i když napětí mezi oběma vstupy je nulové. Tuto nedokonalost je možné a zpravidla i nutné dodatečně kompenzovat. Vstupní napěťová nesymetrie se tedy rovná napětí, které musíme přivést na vstupní svorky OZ, aby výstupní napětí bylo nulové.

Kromě toho dochází samovolně ke změnám vstupní napěťové nesymetrie. Tomuto jevu se obvykle říká drift. Protože nejzávažnějším původcem driftu je změna teploty polovodičových přechodů, vstupní napěťovou nesymetrii se podaří zpravidla vykompenzovat až po zahřátí integrovaného obvodu na provozní teplotu.
6. Vstupní klidový proud - Napětí, které se objeví na výstupu OZ, i když je vstupní signál nulový, je způsobeno nejen vstupní napěťovou nesymetrií, ale i průchodem vstupního klidového proudu vstupním odporem zesilovače. Vzniklé napětí na odporu se pak zesilovačem zesílí a objeví na výstupu. Jedná se tedy o proud, který musíme přivést na vstup zesilovače, abychom na jeho výstupu dosáhli nulového napětí.
7. Malá vlastní spotřeba [mW]
8. Fázový posun mezi vstupním a výstupním napěťovým signálem je 0° nebo 180°
9. Rychlost přeběhu - rychlost změny výstupního napětí, kterou OZ dokáže vyvinout za jednu mikrosekundu. Udává se ve voltech za mikrosekundu (V/ μ s).

Základní zapojení s OZ

Samotný OZ vykazuje velké napěťové zesílení A_U . V běžných praktických aplikacích se však požadují daleko nižší hodnoty. Omezení napěťového zesílení OZ je realizováno pomocí zpětnovazebního rezistoru R_{ZP} zapojeného mezi jeho výstupem a invertujícím vstupem (-). Podle toho, na který vstup OZ přivádíme zesilovaný signál rozlišujeme tyto dva základní zapojení:

1. Invertující zapojení



- R_1 vstupní rezistor
- R_{ZP} zpětnovazební rezistor
- R_2 kompenzace vstupní nesymetrie

Odvození rovnice pro celkové napětové zesílení invertujícího zapojení s OZ:

$I_1 + I_2 = I_0$ vstup ideálního OZ má nekonečný odpor, neodebírá tedy žádný proud ($I_0 = 0A$).

$$I_1 + I_2 = 0$$

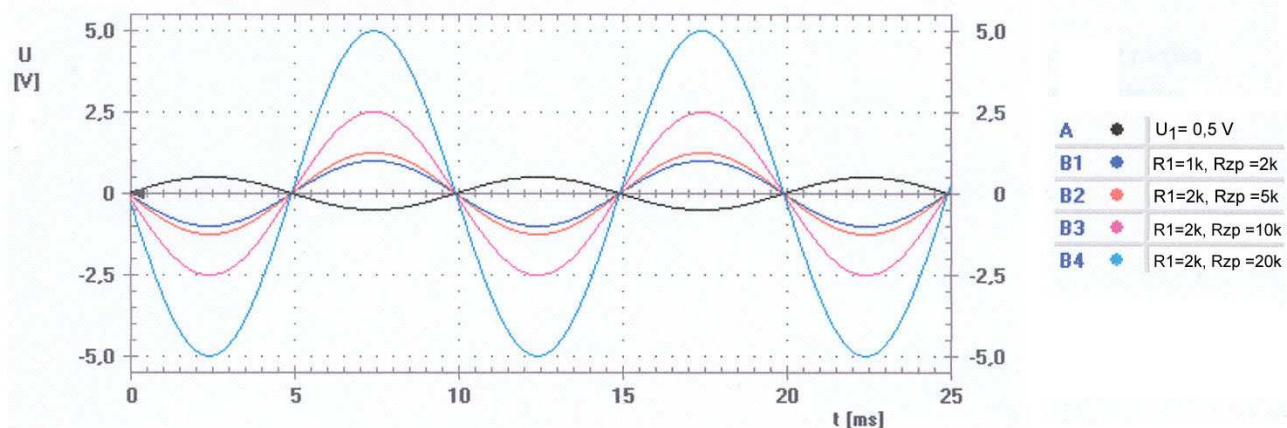
$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_{zp}}$$

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

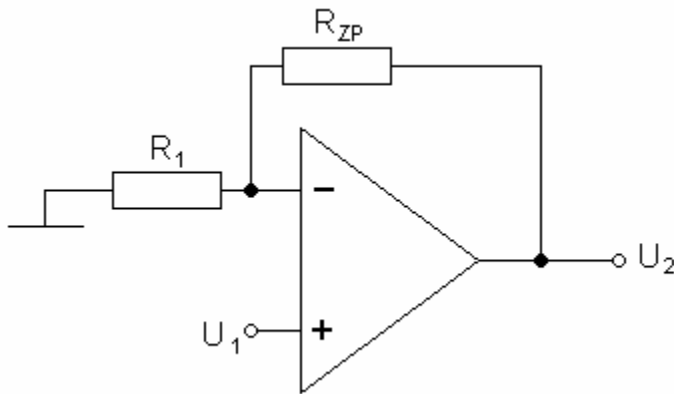
$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_{zp}}{R_1}$$

Poměr $\frac{R_{zp}}{R_1}$ udává celkovou velikost napětového zesílení A_U invertujícího zapojení.

U tohoto zapojení dojde k posunu fáze mezi vstupním a výstupním napětím o 180° . Je-li tedy na vstupu např. kladné napětí, získáme na výstupu invertujícího zapojení zesílené záporné napětí a naopak.



2. Neinvertující zapojení



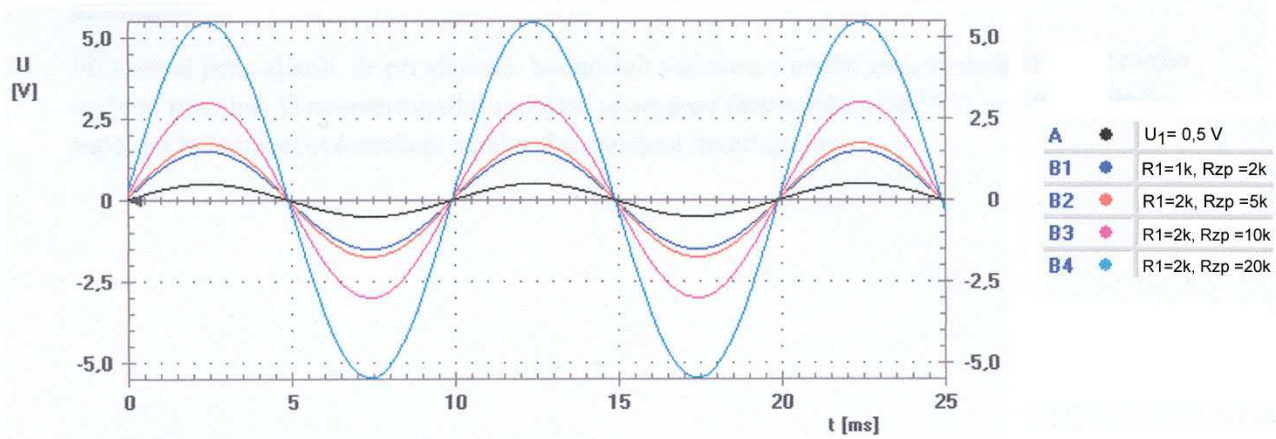
$$U_1 = R_1 \cdot I, \quad U_2 = (R_1 + R_{zp}) \cdot I$$

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

$$A_U = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_{zp}}{R_1}$$

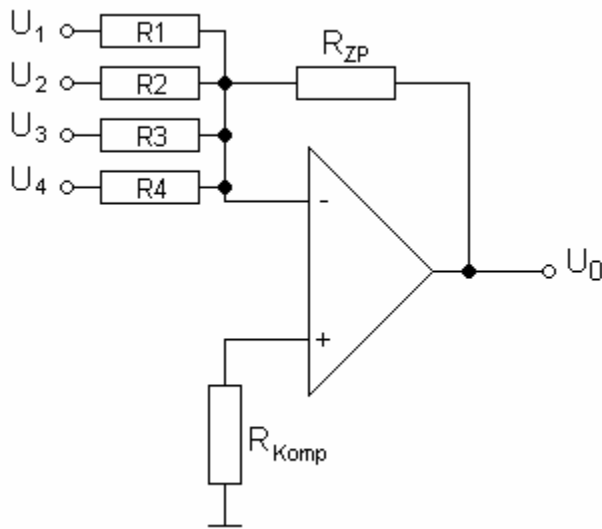
$$A_U = 1 + \frac{R_{zp}}{R_1}$$

Vstupní napěťový signál je ve fázi s výstupním zesíleným napěťovým signálem. Je-li tedy na vstupu např. kladné napětí, na výstupu získáme zesílené napětí téže polaroty.



Vybraná zapojení s operačním zesilovačem

1. Součtový zesilovač – Sumátor



Pokud na invertující vstup OZ přivedeme více napěťových signálů, poteče do něj proud, který se rovná součtu jednotlivých proudů. Takový zesilovač pak nazýváme sumační (součtový). Velikost proudů je dána Ohmovým zákonem:

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

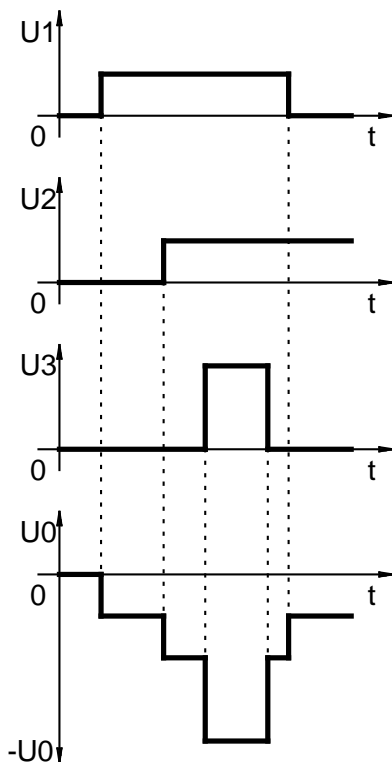
Výstupní napětí U_0 je pak dáno vztahem:

$$U_0 = - \left(\frac{R_{ZP}}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_{ZP}}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_{ZP}}{R_3} \cdot U_3 + \frac{R_{ZP}}{R_4} \cdot U_4 \right)$$

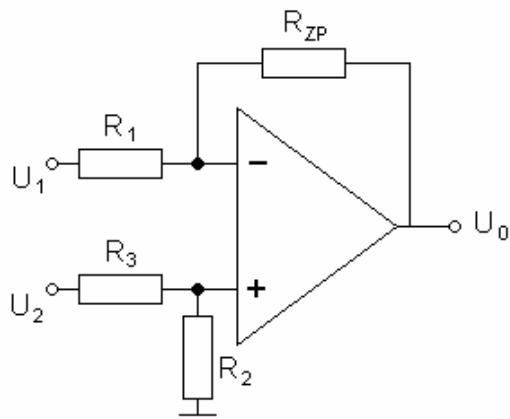
Jsou-li hodnoty všech rezistorů stejné ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{zp}$), je velikost výstupního napětí u_0 dána přímo vztahem: $U_0 = -(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$

Společný bod všech odporů je na nulovém potenciálu, který musíme zachovat, proto je nezbytný kompenzační odpor v neinvertujícím vstupu. Kompenzační odpor spočítáme jako paralelní spojení

všech odporů: $\frac{1}{R_{komp.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_{ZP}}$. Příklad pro tři vstupní napětí:



2. Rozdílový (diferenční) zesilovač



Toto zapojení se nejčastěji používá pro sledování dvou napěťových signálů s velmi málo odlišnými hodnotami napětí, výstupní napětí je pak úměrné rozdílu napětí na vstupech (OZ zesiluje rozdíl obou vstupních napětí).

Invertující zesilovač zesiluje napětí U_1 a neinvertující zesilovač zesiluje U_2 .

Má-li diferenční zesilovač skutečně zesilovat jen rozdílové napětí, musí se dodržet následující podmínka:

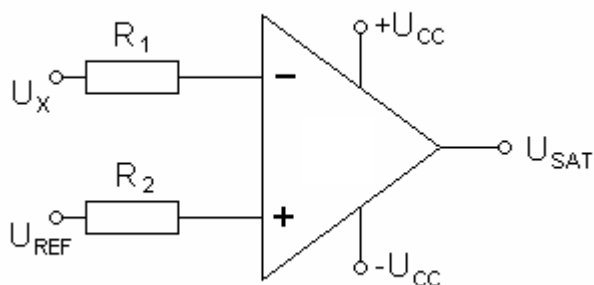
$$\frac{R_{ZP}}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

To znamená, že dvojice odporů R_2 a R_3 musí být ve stejném poměru jako R_{ZP} a R_1 . Velmi záleží na tom, aby použité rezistory byly přesné. Výstupní napětí U_0 je dáno vztahem:

$$U_0 = \frac{R_{ZP}}{R_1} \cdot (U_2 - U_1)$$

3. Komparátor

Komparace = porovnání, srovnání



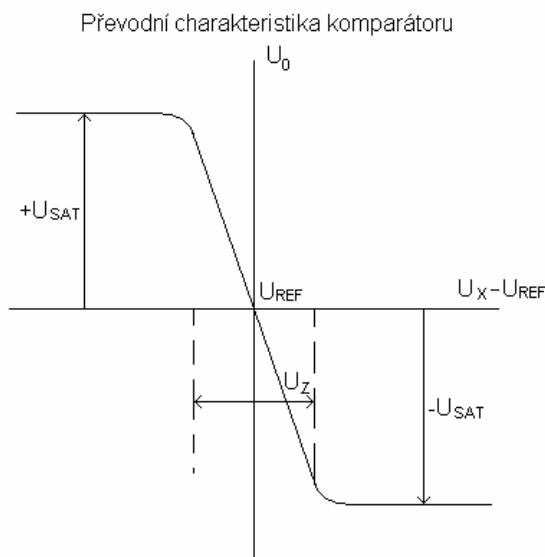
Je to obvod, který se používá k porovnání dvou napěťových signálů. Využívá se např. v obvodech číslicových voltmetrů, k převedení analogové hodnoty měřeného napětí do digitální podoby (log.0 a log.1).

U OZ není zavedena zpětná vazba omezující zesílení OZ. Stačí nepatrné vstupní napětí a výstup OZ se dostane do tzv. saturace.

Saturace je ustálený stav výstupu, kdy se zesilovač otevře naplno a dále již nereaguje na napěťové změny na vstupu. Na výstupu OZ je maximální výstupní napětí U_{SAT} (tato hodnota je dána především velikostí napájecího napětí U_{CC}). Rozhodující je, zda se otevřel do kladných či záporných hodnot.

Na první vstup komparátoru přivedeme neznámé napětí U_X , které komparátor porovnává s referenčním napětím U_{REF} , jehož hodnotu volíme podle potřeby. Pomocí tohoto referenčního napětí zesilovač zjišťuje, jestli je neznámé napětí U_X menší nebo větší než referenční U_{REF} . Výstupní napětí nabývá dvou stabilních úrovní: kladné nebo záporné maximální výstupní hodnoty (režim saturace).

Funkce komparátoru:



komparátoru (rozdílení velikostí napětí U_x a U_{REF}). Jsou-li obě napětí shodná, výstupní napětí OZ je nulové.

Neznámé napětí U_x se porovnává se známým (referenčním) napětím U_{REF} . Výstupní napětí se nachází v jedné ze dvou stabilních úrovní: kladné nebo záporné maximální napětí ($+U_{SAT}$ nebo $-U_{SAT}$)

Pokud je $U_x < U_{REF}$, uplatňuje se hodnota U_{REF} na neinvertujícím vstupu OZ, proto je výstupní napětí kladné ($+U_{SAT}$).

Pokud je $U_x > U_{REF}$, uplatňuje se hodnota U_x na invertujícím vstupu OZ, proto je výstupní napětí záporné ($-U_{SAT}$).

Pro $U_x = U_{REF}$ (popřípadě U_x je téměř shodné s U_{REF}) nastává přechodný stav vyznačený v převodní charakteristice komparátoru jako U_Z . Napětí U_Z je nejmenší rozdíl vstupních napětí, který udává tzv. rozlišovací schopnost

4. Omezovač amplitudy

Jsou to obvody, které neovlivňují výstupní napětí, pokud nepřekročí požadovanou úroveň. Na překročení napětí reagují omezením napětí.

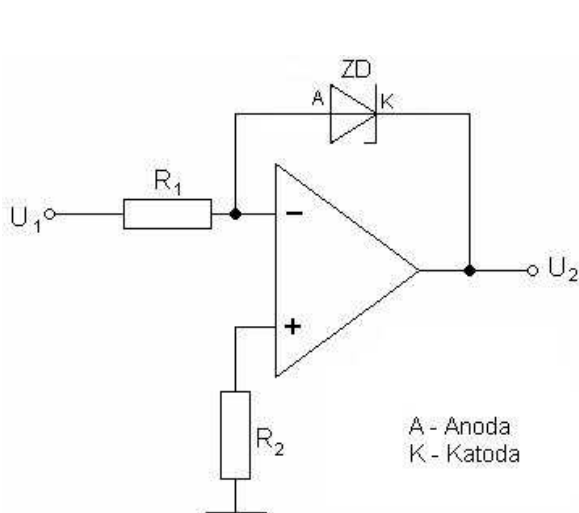
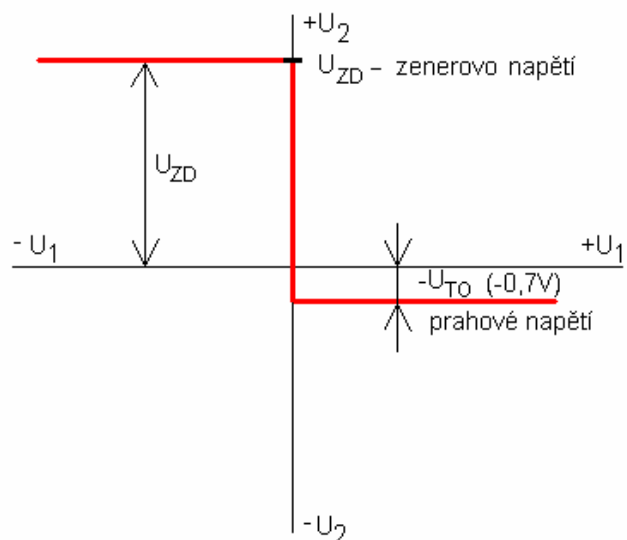


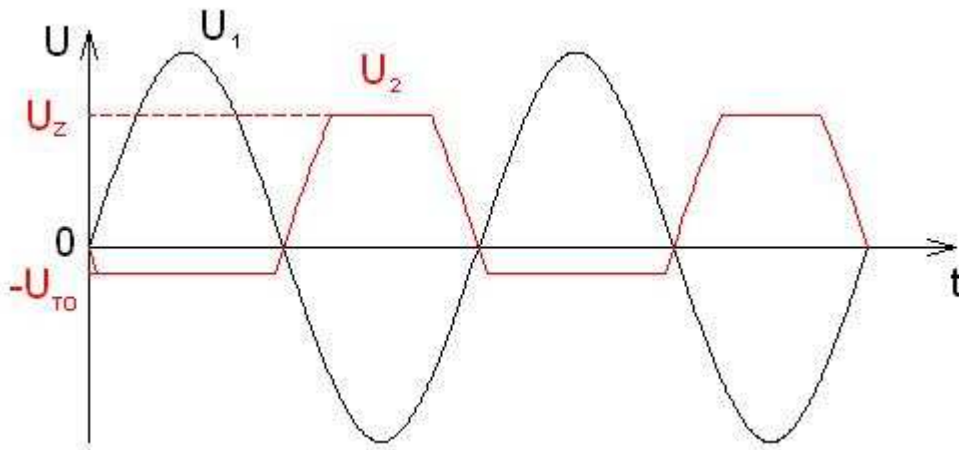
schéma zapojení



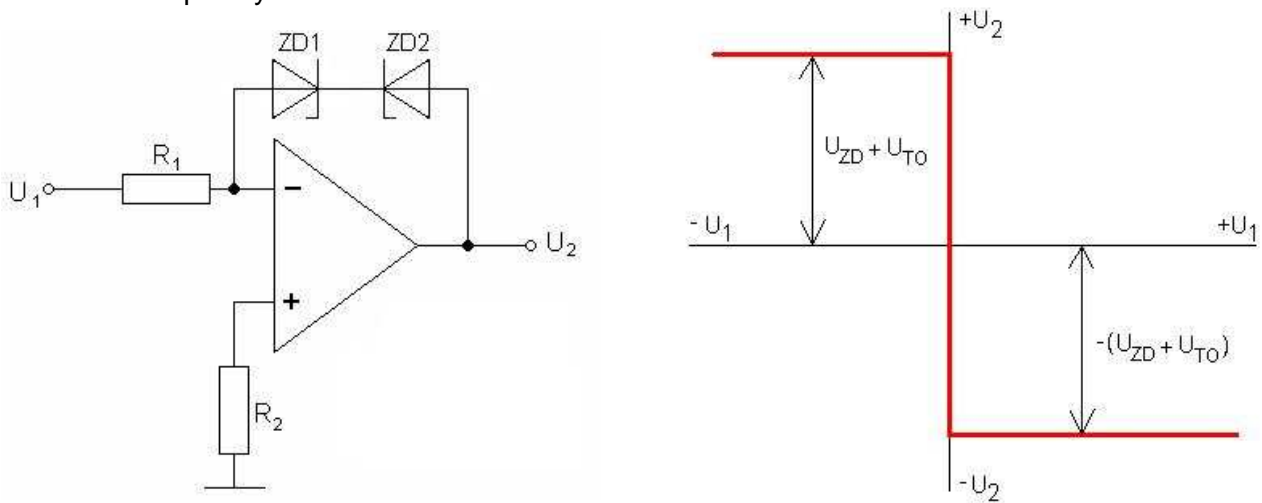
převodní charakteristika

Je-li na vstup přivedeno kladné napětí, zenerova dioda ZD je v propustném režimu. Výstupní napětí U_2 je omezeno velikostí prahového napětí diody, přičemž výstupní napětí je záporné (invertující zapojení). $U_2 = -U_{T0} = -0,7V$

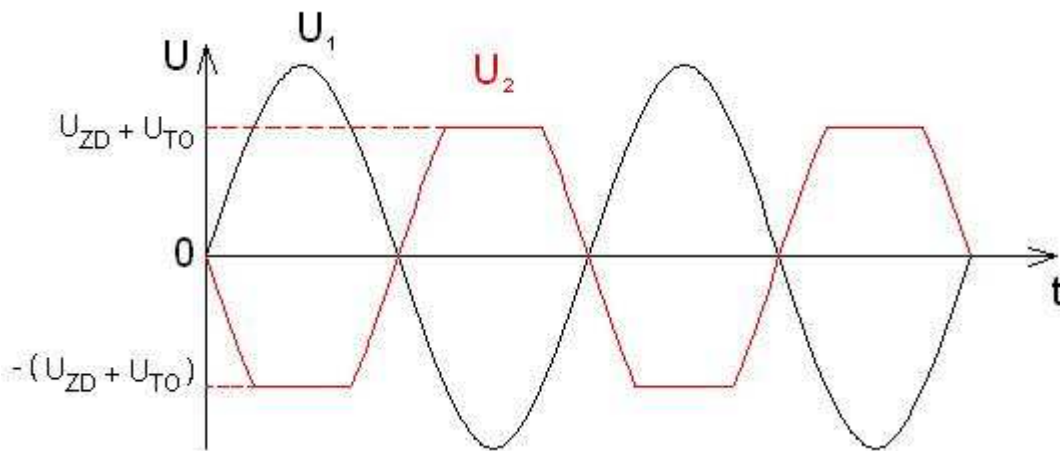
Je-li na vstup přivedeno záporné napětí, zenerova dioda ZD je v závěrném režimu. Výstupní napětí U_2 je omezeno velikostí zenerova (průrazné) napětí diody, přičemž výstupní napětí je kladné (invertující zapojení). $U_2 = U_Z$



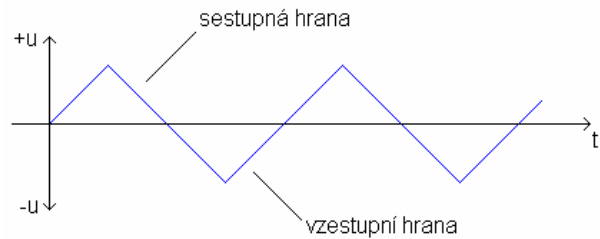
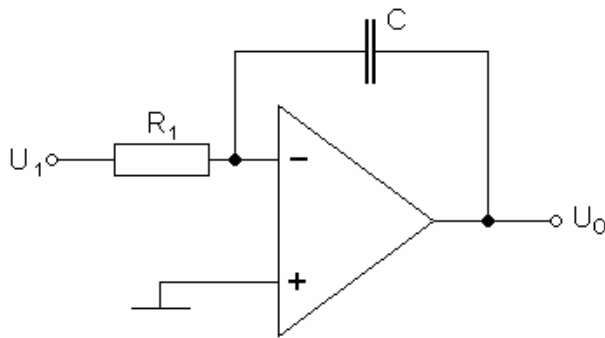
Zapojíme-li do zpětné vazby OZ dvě zenerovy diody proti sobě, získáme *symetrický (souměrný) omezovač amplitudy*.



V případě kladného i záporného napětí na invertujícím vstupu OZ je vždy jedna zenerova dioda polarizována propustně (úbytek napětí je roven prahovému napětí $U_{T0}=0,7V$) a druhá zenerova dioda je polarizována závěrně (úbytek napětí je roven zenerovu napětí U_{ZD}). Výstupní napětí U_2 bude rovno maximálně součtu těchto dvou napětí $U_{T0}+U_{ZD}$ (sériové spojení obou diod) s opačnou polaritou oproti vstupu (invertující zapojení s OZ).

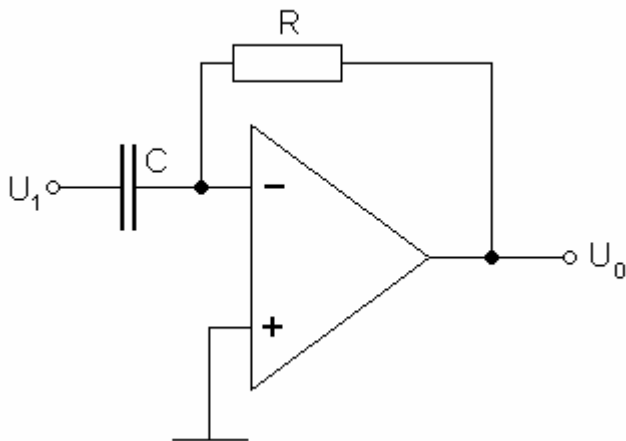


5. Integrační člen



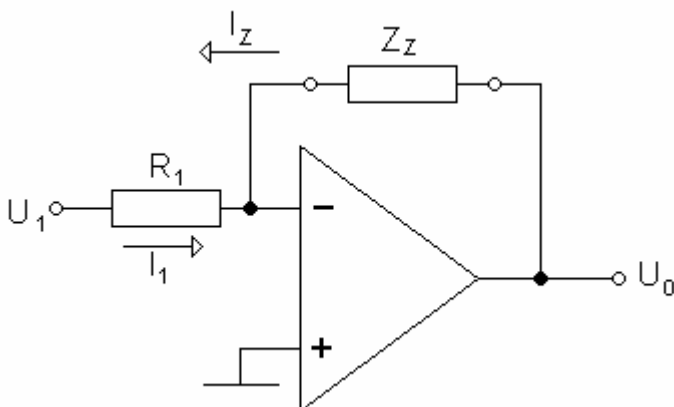
Přivedeme-li na vstup OZ skokově proměnné napětí (obdélkový průběh), získáme vlivem nabíjení a vybíjení kondenzátoru zapojeného ve zpětné vazbě OZ na výstupu přibližně trojúhelníkový průběh napětí.

6. Derivační člen



Používá se například v elektronických regulačních obvodech.

7. Převodník napětí/proud



Využitá se v aplikacích, kde je potřeba zdroj konstantního proudu, jehož velikost je nutné řídit napětím.

$$I_1 + I_z = I_I = 0$$

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

Proud tekoucí zátěží Z_z nezávisí na její impedanci Z_z a je úměrný vstupnímu napětí U_1 , kterým je možno řídit jeho velikost.