

# OPERAČNÍ ZESILOVAČE

## Teoretický základ

---

Operační zesilovač (OZ) je polovodičová součástka, která je dnes základním stavebním prvkem obvodů zpracovávajících spojitě analogové signály. Jedná se o elektronický zesilovač s velkým zesílením, velkým vstupním a malým výstupním odporem a dvěma souměrnými vstupy. Jeden ze vstupů je invertující (tj. obrací fázi střídavého signálu, nebo obrací znaménko vstupního napětí), druhý vstup je neinvertující. Kromě toho má OZ další vývody – pro napájení, kmitočtovou kompenzaci a kompenzaci vstupního napětí. OZ slouží primárně k zesilování stejnosměrných signálů, s určitými omezeními lze jimi zesilovat i signály střídavé.

### Definice některých základních pojmů

**Napětové zesílení  $A_u$**  při otevřené smyčce zpětné vazby je zesílení definované pro předepsanou zátěž, napájecí napětí a maximálně přípustný (nezkreslený) vstupní signál, při kompenzované napětové nesymetrii vstupů. (Je to vlastně zesílení samotného OZ, pro praktické použití velké. V konkrétních aplikacích se zesílení pomocí záporné zpětné vazby, viz dále, nastavuje na požadovanou hodnotu.)

**Napětová nesymetrie vstupů  $U_{10}$**  (napětový ofset, vstupní zbytkové napětí) je napětí, které se musí přivést mezi vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové. (Některé OZ mají na kompenzaci  $U_{10}$  zvláštní vstupy.)

**Proudová nesymetrie vstupů  $I_{10}$**  (proudový ofset, vstupní zbytkový proud) je rozdíl proudů mezi oběma vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové.

**Průměrný teplotní součinitel napětové (proudové) nesymetrie vstupů  $\alpha_{U10}$**  je poměr změny napětové (proudové) nesymetrie vstupů k teplotnímu intervalu, v němž změna nastala. Označuje se také jako teplotní drift napětí (proudu).

**Potlačení součtového signálu  $CMR$**  je definováno jako poměr vstupního napětového rozsahu k maximální změně napětové nesymetrie, v tomto rozsahu vyjádřené v dB.

### Rozdělení OZ

1. podle integrovaného zesilovacího prvku
  - a. bipolární OZ – základem je integrovaný bipolární tranzistor; jedná se o nejstarší a nerozšířenější OZ, používají se pro zesilování stejnosměrných a střídavých nízkofrekvenčních signálů
  - b. BIFET OZ – základ tvoří integrovaný unipolární tranzistor JFET; tyto OZ mají vysoký vstupní odpor
  - c. BIMOS OZ – základem je integrovaný unipolární tranzistor MOSFET; tyto OZ mají velmi vysoký vstupní odpor a jeho vlastnosti se blíží vlastnostem ideálního OZ;

používají se v oblasti vysokofrekvenční techniky, u elektronických měřících přístrojů apod.

## 2. podle použitého napájení

- symetrické OZ – vyžadují symetrické napájení (např. +15V a -15V proti zemi); vstupní i výstupní elektrický signál proto může být kladný i záporný
- nesymetrické OZ – stačí jedna polarita napájení

## Použití OZ

Operační zesilovač se nazývá podle matematických operací, které může provádět s analogovým signálem. Analogový napěťový signál se pohybuje v rozmezí  $\pm 10$  V, z toho důvodu bývá napájecí napětí  $\pm 15$  V.

**Násobení signálu** konstantou může provádět invertující a neinvertující zesilovač.

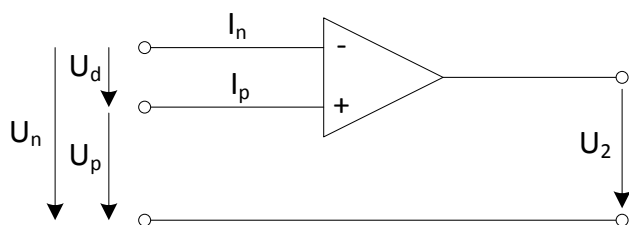
**Sečítání a rozdíl signálů** provádějí sumační zesilovač a rozdílový (diferenční) zesilovač. Komparátor řeší matematickou relaci typu **podmínka** ( $=, \neq, <, >$ ).

Integrační a derivační zesilovač může provádět **integraci, nebo derivaci analogového signálu**. Nelineární členy (exponenciální, logaritmické) mohou provádět **násobení, dělení, umocňování signálů** tím, že je pomocí logaritmů převádí na jednodušší operace.

Kromě matematických operací může OZ provádět i **úpravy a převody elektrických signálů**, jako jsou napěťový sledovač (transformátor impedance), převodník proud  $\rightarrow$  napětí, omezení signálu a podobně.

Vedle použití operačních zesilovačů v analogových počítačích (dnes již historie), se v současnosti používají v řadě elektronických obvodů, jako jsou stejnosměrné i střídavé zesilovače napěťového 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.

Schéma OZ je znázorněno na obr. 1. Obvykle bývá OZ napájený symetrickým napětím a střed napájení je uzemněn. Vstupní a výstupní signály jsou pak uvažovány proti této zemi. Invertující vstup se označuje znaménkem (-) a neinvertující znaménkem (+).



Vysvětlivky:

- $I_n$  – vstupní proud invertujícího vstupu
- $I_p$  – vstupní proud neinvertujícího vstupu
- $U_n$  – vstupní napětí invertujícího vstupu
- $U_p$  – vstupní napětí neinvertujícího vstupu
- $U_d$  – diferenciální vstupní napětí
- $U_2$  – výstupní napětí

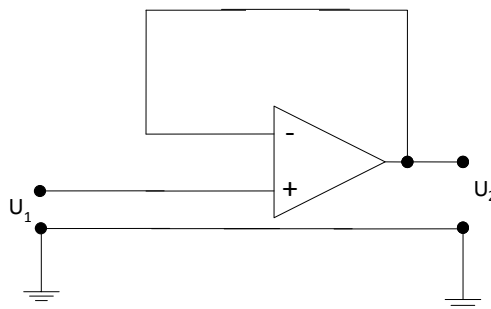
**Obr. 1:** Schématická značka operačního zesilovače

Hodnota  $\Delta U_i$  je změna napětí na vstupu (tj. 20V), hodnota  $\Delta U_2$  je odpovídající změna napětí na výstupu, tj.  $U_{21}-U_{22}$ .

## Základní zapojení s operačními zesilovači

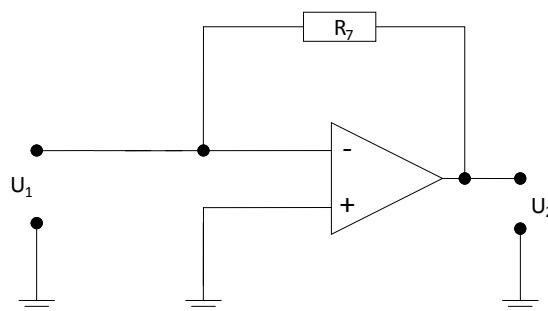
### 1. Napěťový sledovač (násobení jedničkou)

Nejjednodušší, ale často využívané zapojení OZ je sledovač napětí. Sledovač napětí je obvod, vytvořený propojením výstupu s neinvertujícím vstupem. Vstupní signál je přiveden na neinvertující vstup. Na výstupu OZ je napětí identické se vstupním napětím (napětí na vstupu sleduje napětí na výstupu). Protože toto zapojení má vysoký vstupní odpor a malý výstupní odpor, nazývá se někdy impedanční převodník. Používá se na převod napětí ze zdroje s vysokým vnitřním odporem až desítek MW (například pH elektroda) na malou výstupní impedanci, typicky desítky W (například pro magnetoelektrický měřicí přístroj), (izoluje zdroje napětí o vysokém výstupním odporu („měkký“ zdroj, tj. zdroj, který není schopen dodávat proud) od vstupů s nízkou impedancí).



### 2. Převodník proud/napětí

Převodník proud/napětí se používá k vyhodnocení signálu z čidel s proudovým výstupem, např. fotonásobičů, elektrod apod. Zapojení převádí proudový signál  $i_{vstup}$  na signál napěťový  $U_2$ , chování se dá popsat následujícím vztahem:

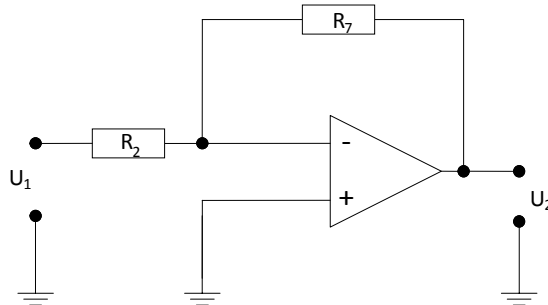


$$U_2 = -i_{vstup} R_7$$

Protože vstupní odpor OZ je velký, prochází proud zpětnovazebním odporem  $R_7$ . Vzhledem k velkému zesílení OZ se zpětná vazba snaží udržet napětí blízké potenciálu neinvertujícího vstupu, tedy nulové (virtuální zem). Výstupní napětí je tedy úbytek napětí na odporu  $R_7$ .

### 3. Invertující zesilovač

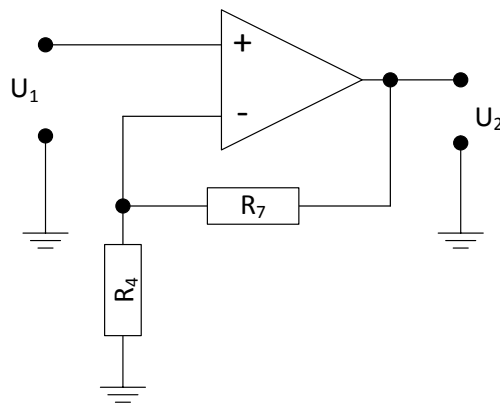
Za předpokladu ideálního zesilovače se proud  $i_{\text{vstup}}$  vstupující do zesilovače musí rovnat proudu  $i_{\text{výstup}}$ , který prochází zpětnou vazbou a výstupní napětí se musí rovnat napětí na zpětnovazebném odporu  $R_7$ .



Velikost napěťového zesílení  $A_u$  neinvertujícího zapojení je dána poměrem  $A_u = \frac{R_7}{R_2}$

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

### 4. Neinvertující zesilovač

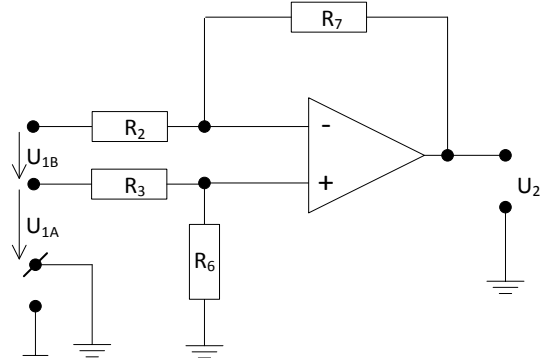


$$A_u = \frac{R_7}{R_4} + 1$$

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 polarity.

## 5. Rozdílový zesilovač (rozdíl signálů)

Toto zapojení se používá pro sledování dvou signálů s velmi málo odlišnými hodnotami napětí, výstupní napětí je úměrné rozdílu napětí na vstupech. Pro operaci rozdílu dvou signálů se často používá vlastností neinvertujícího a invertujícího vstupu.



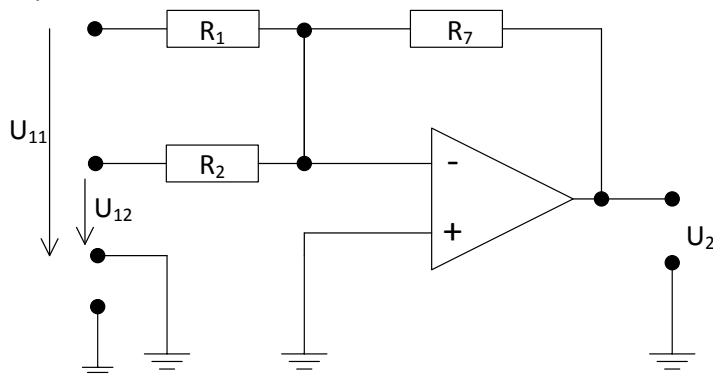
$$U_2 = (U_{1A} - U_{1B}) \frac{R_7}{R_2}$$

za podmínky:  $R_7/R_2 = R_6/R_3$ . Poměr odporů  $R_7/R_2$  umožňuje násobení rozdílu konstantou a proto se daného zapojení používá k zesilování rozdílového napětí.

Lze na něj pohlížet tak, že invertující zesilovač zesiluje napětí  $U_1$  a neinvertující zesilovač zesiluje  $U_2$ , takže napětí  $U_2$  musí být zmenšeno odporovým děličem  $R_3/R_2$ , tak aby zesílení obou větví bylo stejné.

## 6. Součtový zesilovač (sčítání signálů)

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 proudu je dána Ohmovým zákonem:



$$U_2 = -\frac{R_7}{R_1}(U_{11} + U_{12})$$

Pro  $R_1=R_2$ . Součet a násobení konstantou lze docílit hodnotami odporů  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_7$ .

## 7. Komparátor

OZ reaguje na rozdíl napětí na vstupech. Protože zesílení OZ bez zavedené zpětné vazby je velmi vysoké (reálně 105 - 106), stačí velmi malý rozdíl napětí na vstupech a na výstupu se objeví saturační napětí (kladné, nebo záporné, podle smyslu difference napětí na vstupech). OZ v takovémto zapojení slouží jako komparátor. Komparátoru se nejčastěji využívá jako signalizátoru odchylky napětí na senzorech (např. tepelné čidlo apod.) od referenční hodnoty hlídané veličiny. Výstupem je vlastně digitální signál s informací 1 bit.

