

Měření základních vlastností OZ

1. Zadání:

A. Na operačním zesilovači typu MAA 741 a MAC 155 změřte:

- a) Vstupní zbytkové napětí U_{D0}
- b) Amplitudovou frekvenční charakteristiku napěťového přenosu OZ v invertujícím zapojení pro zesílení: 20, 40 dB
Přenos změřte od 100 Hz do kmitočtu $f > f_T$ podle možností použitých přístrojů (krok volte s ohledem na šířku proměřovaného frekvenčního pásma, různý pro různá zesílení)
Pro každé zesílení určete mezní f_m a tranzitní f_T kmitočet zesilovače.
- c) Rychlost přeběhu (Slew Rate) S při $R_Z = 2 \text{ k}\Omega$.

B. Zapojte OZ jako zdroj stejnosměrného proudu řízený napětím (v principu neinvertující zapojení) a změřte na něm závislost výstupního proudu I_2 na zatěžovacím odporu R_Z
($I_2 = 5 \text{ mA}$, $R_Z = 0 - 50 \text{ k}\Omega$): $I_2 = f(R_Z)$
Naměřenou závislost zdůvodněte

Pro všechny případy odvoďte přenos použitých zapojení a zdůvodněte odchylky naměřených hodnot od teoretických. Porovnejte vlastnosti obou typů operačních zesilovačů.

D.cv.: Vlastnosti ideálních a reálných OZ, vnitřní struktura zesilovače, základní parametry a jejich měření.

Literatura:

- Boltík, M. a kol.: Elektronická zařízení pro 4.ročník SPŠE. SNTL, Praha 1988
Kabeš, K.: Operační zesilovače v automatizační technice. SNTL, Praha 1989
Katalog TESLA (konstrukční)
Kolektiv: Elektrická měření - návody k laboratorním cvičením (doplňkové skriptum).
ČVUT, Praha 1992

2. Popis měřeného předmětu:

Operační zesilovač (OZ) je stejnosměrný zesilovač s velkým zesílením a malým vlastním rušením, schopný stabilně pracovat v uzavřené zpětnovazební smyčce. Obvykle má souměrný diferenční vstup, jehož dvě signálové svorky se nazývají neinvertující (+) a invertující (-) vstup a jednu výstupní svorku. Napětí přivedené na neinvertující vstup vyvolá na výstupu napětí stejné polarity, napětí přivedené na invertující vstup vyvolá na výstupu napětí opačné polarity. Všechna vstupní a výstupní napětí OZ jsou vztažena k zemní svorce, která je připojena na společnou zem dvou zdrojů souměrných napájecích napětí $\pm U_B$. Zesilovač s diferenčním vstupem zesiluje rozdílové vstupní napětí u_D přivedené mezi jeho vstupy.

OZ je určen především pro provoz v uzavřené zpětnovazební smyčce a proto je důležitou součástí jeho zapojení obvod zpětné vazby. Ten může být sestaven z pasivních i aktivních součástí a jeho struktura určuje funkci, kterou OZ v daném zapojení zajišťuje.

OZ se uplatňuje zejména v těchto oblastech: analogové výpočetní technice, měřicí technice, automatizační technice, elektronice, chemické instrumentaci a lékařské elektronice.

Katalogové hodnoty použitého OZ:

Studenti si zde sami vypíší nejdůležitější katalogové údaje.

3. Teoretický rozbor:

a) měřeného předmětu

Operační zesilovač s dokonale vyváženým rozdílovým vstupem zesiluje pouze **rozdílové vstupní napětí**

$$u_D = u_N - u_P$$

bez ohledu na absolutní velikost napětí u_N , u_P přivedených na jeho vstupní svorky. Statickou závislost mezi rozdílovým vstupním napětím u_D a výstupním napětím naprázdno u_{V0} vyjadřuje převodní charakteristika. Z ní lze odvodit **stejnosemné rozdílové zesílení zesilovače naprázdno A_0** :

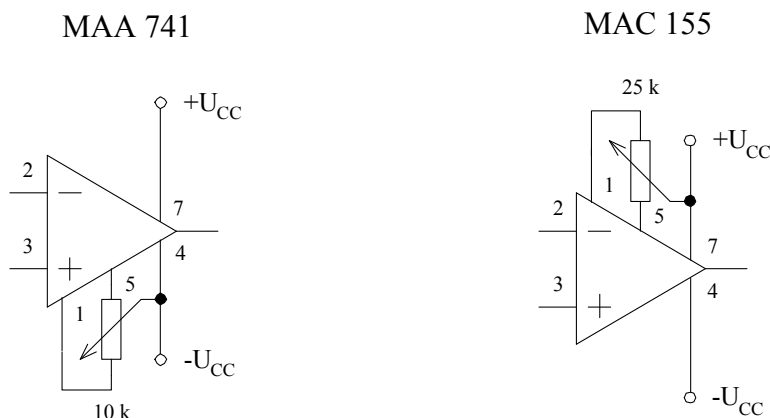
$$A_0 = \frac{u_{V0}}{u_D}$$

Ideální operační zesilovač má $A = \infty$.

Překročí-li vstupní rozdílové napětí hodnotu $\pm u_{Dmax}$, dochází k přebuzení OZ, zesilovač pracuje v nelineární oblasti, jeho výstupní napětí dosáhne hodnoty maximálního výstupního napětí $\pm u_{Vmax}$ a při dalším zvyšování vstupního napětí se již nemění. Hodnota $\pm u_{Vmax}$ udává, jaké nejvyšší napětí lze na výstupu nezátíženého OZ získat.

Důležitou vlastností OZ je **vstupní offset**, pod kterým rozumíme všechny nežádoucí signály generované v zesilovači a projevující se ekvivalentně na jeho vstupu, které nelze žádnými prostředky trvale kompenzovat. Je způsoben ne zcela

dokonalým vyvážením obou částí vstupního rozdílového obvodu OZ a projevuje se vznikem výstupního napětí i v případě, že vstupní napětí je nulové. Patří sem hlavně **vstupní zbytkové napětí** (napěťový ofset) U_{D0} , což je rozdílové napětí, které je nutné přivést mezi vstupy zesilovače, abychom na výstupu dostali nulové napětí při $u_N = u_P = 0$. Při přesných měřeních je tedy nutné vliv napěťového ofsetu kompenzovat. To je možné buď přivedením kompenzačního napětí do nepoužitého vstupu OZ nebo kompenzačního proudu do zvláštních k tomu určených vývodů součástky. Na obr.17 je naznačen způsob kompenzace napěťového ofsetu u dvou často používaných typů operačních zesilovačů.

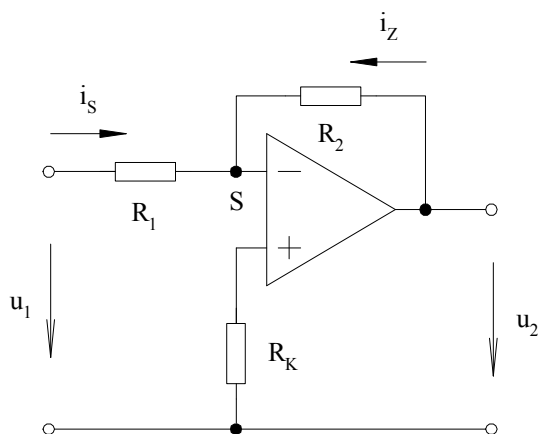


Obr. 17

Vstupní ofset se mění s časem, s teplotou a s kolísáním napájecích napětí. Tato nestálost ofsetu se nazývá **drift OZ**.

Operační zesilovač lze použít např. v těchto zapojeních:

Invertující zesilovač



Obr. 18

Zesilovač je buzen do invertujícího vstupu, který se v důsledku paralelní napěťové zpětné vazby chová jako virtuální zem. Při odvození výstupního napětí a napěťového přenosu se využívá vztahu, který platí pro uzel S:

$$i_s + i_z = 0$$

Pro potlačení vlivu vstupního klidového proudu se mezi neinvertující vstup a zem zapojuje kompenzační rezistor

$$R_K = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Neinvertující zesilovač

Vstupní signálové napětí u_1 se přivádí na neinvertující vstup operačního zesilovače (obr. 19a). Aby byla splněna podmínka nulového vstupního diferenčního napětí u_D musí se zpětnou vazbou trvale zajišťovat stejné napětí u_1' na invertujícím vstupu OZ. Přitom platí:

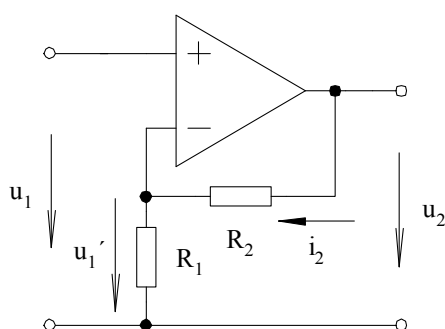
$$u_1' = u_1$$

Z této podmínky se dá opět odvodit vztah pro u_2 i A_u .

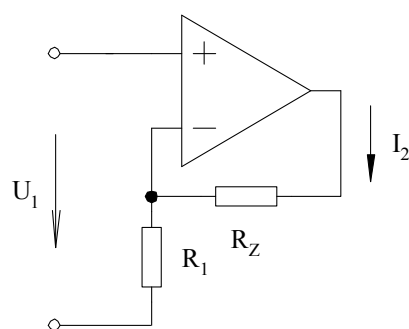
Je-li $R_2 \gg R_1$ platí pro napěťové zesílení

$$A_u = \frac{R_2}{R_1}$$

Je-li $R_2 = 0$ dostaneme tzv. napěťový sledovač s $A_u = 1$. Ten se vyznačuje velmi velkým vstupním a velmi malým výstupním odporem.



Obr. 19a



Obr. 19b

Neinvertující zesilovač s OZ můžeme též použít pro zapojení ss zdroje proudu řízeného napětím (obr. 19b).

Opět lze jednoduše odvodit vztah mezi výstupním proudem I_2 a vstupním napětím U_1 při zatěžovacím rezistoru R_z . Přitom velikost výstupního proudu I_2 nezávisí na velikosti R_z , tedy zapojení se chová vůči R_z jako zdroj proudu řízený napětím U_1 . Od určité hodnoty R_z však dochází k poklesu velikosti proudu I_2 v důsledku toho, že OZ již nebude schopen na výstupu dodat napětí potřebné pro udržení nastaveného proudu. Pro maximální hodnotu odporu R_{zmax} , při které je schopen OZ ještě udržet proud zátěží I_2 přitom platí:

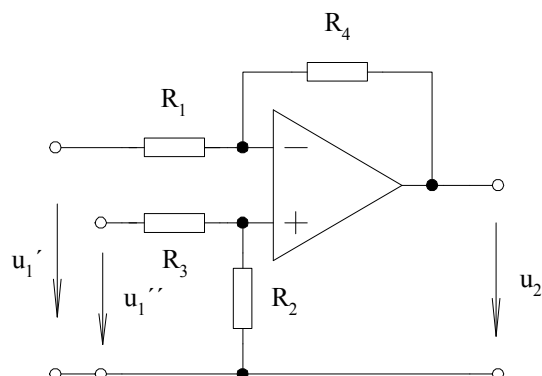
$$U_1 + R_{zmax} \cdot I_2 = U_{2sat}$$

$$R_{zmax} = \frac{U_{2sat} - U_1}{I_2}$$

kde U_{2sat} je velikost saturačního napětí na výstupu OZ

Rozdílový zesilovač

Vyznačuje se současným signálovým buzením obou vstupů OZ. Vstupy zesilovače lze budít buď přímo rozdílovým napětím $u_{1D} = u_1' - u_1''$ nebo napětími u_1' a u_1'' proti zemi.

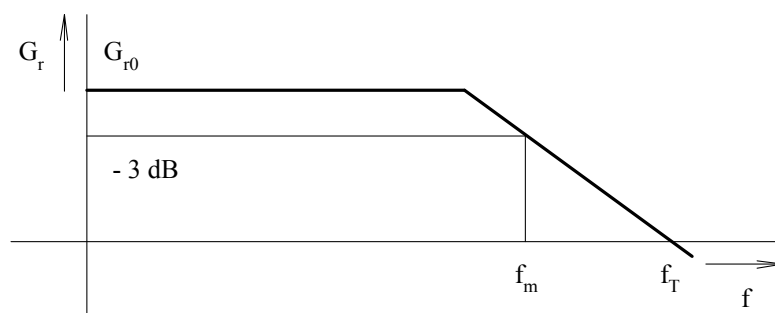


Obr. 20

Závislost mezi výstupním napětím u_2 a vstupními napětími u_1' a u_1'' se odvodí s využitím věty o superpozici. Rozdílové zesílení je definováno vztahem:

$$G_r = \frac{u_2}{u_1' - u_1''}$$

Odvození průběhu frekvenční charakteristiky rozdílového zesílení vychází z poznatku, že většina OZ se chová jako ideální zesilovač s jednoduchým zpoždovacím členem na výstupu (obr.21).



Obr. 21

Mezní kmitočet f_m je kmitočet při kterém poklesne rozdílové zesílení o - 3dB vzhledem k ss zesílení G_{r0} .

Tranzitní kmitočet f_T je kmitočet při kterém je rozdílové zesílení rovno 1. Tranzitní frekvence tedy definuje šířku pásma přenosu operačního zesilovače, tj. oblast, ve které je rozdílové zesílení zesilovače pro malé signály $G_r \geq 1$. V této oblasti je součin $G_r \cdot f$ konstantní a platí vztah

$$A_0 \cdot f_0 = f_T$$

kde A_0 je stejnosměrné rozdílové zesílení naprázdno

f_0 mezní frekvence při zesílení A_0

Kromě rozdílového zesílení je u operačního zesilovače definováno ještě tzv. **součtové zesílení** G_S vztahem:

$$G_S = \frac{u_2}{\frac{u_1' + u_1'}{2}}$$

a **činitel potlačení součtového napětí CMRR** daný vztahem:

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{G_R}{G_S}$$

Operační zesilovač je tím kvalitnější, čím větší má CMRR. Činitel CMRR je závislý na frekvenci a proto při jeho měření je potřeba udat při jaké frekvenci byl stanoven.

Pro zpracování velkých signálů je důležitou veličinou operačního zesilovače **mezní rychlost přeběhu S** , udávající největší rychlost změny výstupního napětí operačního zesilovače ($V/\mu s$) při zatížení jmenovitým odporem zátěže R_z a **mezní výkonová frekvence f_M** , tj. frekvence, při které lze na výstupu zesilovače získat ještě maximální výstupní napětí $\pm U_{vmax}$.

Zpracováváme-li operačním zesilovačem střídavé sinusové napětí o frekvenci f_M , je okamžitá hodnota jeho výstupního napětí

$$u_V = U_{Vm} \cdot \sin 2\pi \cdot f_M \cdot t$$

kde U_{Vm} je amplituda výstupního napětí.

Derivováním u_V podle času zjistíme rychlost změny výstupního napětí zesilovače.

Platí

$$\frac{du_V}{dt} = 2\pi \cdot f_M \cdot U_{Vm} \cdot \cos 2\pi \cdot f_M \cdot t$$

Strmost sinusové funkce je největší v bodě, ve kterém prochází nulou. Protože v tomto bodě platí $\sin 2\pi f_M t = 0$ (popř. $\cos 2\pi f_M t = 1$), odvodíme vztah

$$\left(\frac{du_V}{dt} \right)_{\max} = S = 2\pi \cdot f_M \cdot U_{Vm}$$

Z toho pro mezní výkonovou frekvenci

$$f_M = \frac{S}{2\pi \cdot U_{Vm}} \quad (\text{MHz}, V / \mu s, V)$$

Chceme-li např. na výstupu operačního zesilovače MAA 741 s $S = 0,5 V/\mu s$ odebrat při jmenovitém zatížení sinusové napětí o amplitudě 10 V, lze to pouze do frekvence

$$f = f_M = \frac{0,5}{2\pi \cdot 10} = 8 \text{ kHz}$$

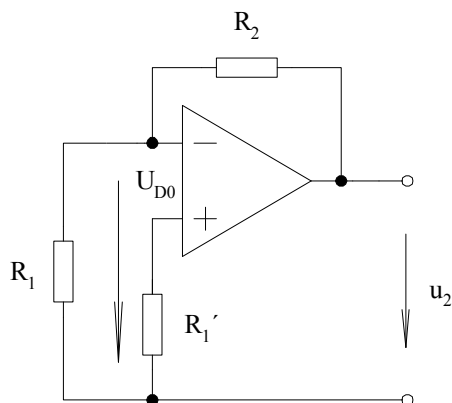
při napětí o amplitudě 1 V do frekvence 80 kHz atd.

Při měření od sebe důsledně odlišujte hodnotu mezní přenosové frekvence f_m , která závisí na nastaveném přenosu zesilovače a mezní výkonovou frekvenci f_M , která je dána požadovanou amplitudou výstupního napětí. Skutečně naměřená hodnota mezní

frekvence je pak samozřejmě dána nižší hodnotou z hodnot f_m a f_M a měření je tím zkresleno.

b) měřicí metody

Základní zapojení pro měření vstupního zbytkového napětí U_{D0} všech druhů operačních zesilovačů je na obr.22:



Obr. 22

Při měření se využívají zesilovací schopnosti zesilovače. Ze vztahu pro jeho výstupní napětí

$$u_v = (U_{D0} - \frac{u_2}{A_0}) \cdot (1 + \frac{R_2}{R_1})$$

lze odvodit vztah pro vstupní zbytkové napětí

$$U_{D0} = u_2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (1 + \frac{R_1 + R_2}{A_0 \cdot R_1})$$

Pro

$$A_0 \gg \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

lze druhý člen v závorce zanedbat a platí

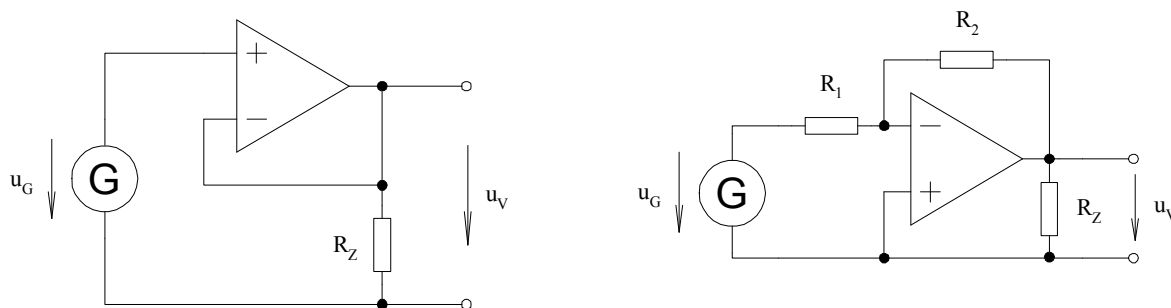
$$U_{D0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_2$$

Podle předcházející rovnice se tedy vstupní zbytkové napětí U_{D0} čte na výstupu zesilovače zesílené v poměru

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} \doteq \frac{R_2}{R_1} \quad R_1' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

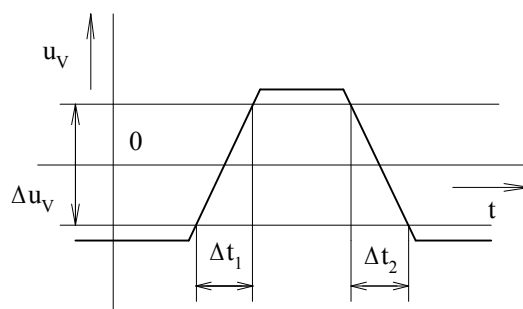
S výhodou volíme tento poměr 1000. Výstupní napětí ve V odpovídá potom vstupnímu napětí v mV. Při zesílení $A_0 = 10^5$ a poměru 1000 je chyba měření asi 1 %. Důležité je, aby při měření nepřekročilo výstupní napětí zesilovače lineární oblast a aby měřidlo příliš nezatěžovalo výstup zesilovače.

Mezní rychlost přeběhu S můžeme měřit v jednom ze dvou zapojení:



Obr. 23

V prvním případě (obr. 23 vlevo) je zesilovač zapojen jako sledovač napětí, v druhém (obr. 23 vpravo) jako invertor. V obou případech pracuje operační zesilovač s jmenovitým odporem zátěže R_Z a je buzen pravouhlejším signálem s velkou strmostí náběžné a doběžné hrany v rozsahu jmenovitého výstupního napětí $\pm U_{Vmax}$. Amplituda budícího signálu je zvolena tak, že je zesilovač v obou polaritách stále mírně přebuzen. Tím se zaoblené části odezvy zesilovače posunou mimo rozsah jmenovitého výstupu zesilovače a měření je přesnější. Odezvu zesilovače na měřicí signál u_G pozorujeme na stínítku osciloskopu a vyhodnotíme z ní strmost S_+ stoupající části odezvy a strmost S_- klesající části odezvy



Obr. 24

$$S_+ = \frac{\Delta u_V}{\Delta t_1} \qquad S_- = \frac{\Delta u_V}{\Delta t_2}$$

Hodnoty S_+ a S_- bývají rozdílné a kvalita zesilovače se posuzuje vždy podle nižší hodnoty.