

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.

Rozdělení OZ

1. podle integrovaného zesilovacího prvku
 - a. bipolární OZ – základem je integrovaný bipolární tranzistor; jedná se o nejstarší a nejrozšířenější OZ, používají se pro zesilování stejnosměrných a střídaných 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 měřicích přístrojů apod.
2. podle použitého napájení
 - a. symetrické OZ – vyžadují symetrické napájení (např. +15V a -15V proti zemi); vstupní i výstupní elektrický signál proto může být kladný i záporný
 - b. nesymetrické OZ – stačí jedna polarita napájení

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.

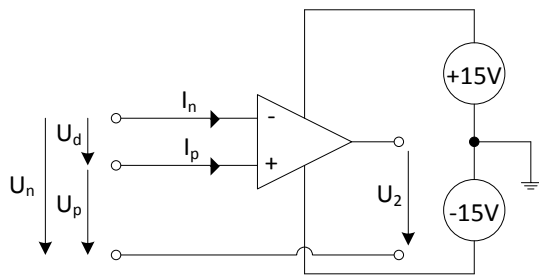
Vedle použití operačních zesilovačů v analogových počítačích (dnes již historie), se v současnosti používají v řadě elektronických obvodů, jako jsou stejnosměrné i střídavé zesilovače napětíového signálu, komparátory (porovnávací obvody), klopné obvody, omezovače amplitudy, aktivní elektronické filtry, převodníky z analogového signálu na

digitální a naopak, jsou základem elektronických PID regulátorů, elektronických měřících přístrojů, atd.

Vlastnosti a parametry OZ

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 kmitočetům 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 elektrický 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 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).

Značka OZ je znázorněna 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 (+). (V následujících schématech je symetrické napájení OZ naznačeno zjednodušeně.)



Vysvětlivky:

I_n – vstupní proud invertujícího vstupu

I_p – vstupní proud neinvertujícího vstupu

U_n – vstupní napětí invertujícího vstupu

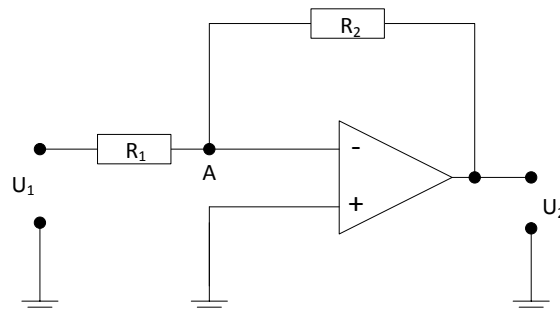
U_p – vstupní napětí neinvertujícího vstupu

U_d – diferenciální vstupní napětí

U_2 – výstupní napětí

Obr. 1: Schématická značka operačního zesilovače

Mezi základní zapojení OZ patří *invertující zesilovač* (viz obr. 2).



Obr. 2: Invertující zesilovač

Na vstup OZ je přivedeno vstupní napětí U_1 , které je přes odpor R_1 připojeno na invertující vstup zesilovače. Na výstupu se objeví zesílené vstupní napětí s opačnou polaritou. Toto napětí se přes odpor R_2 přivede zpět na invertující vstup. Původní napětí se zmenší, protože napětí přivedené z výstupu má opačnou polaritu. Protože OZ má velké zesílení, ustálí se obvod ve stavu, kdy je v bodě A velmi malé (v ideálním případě nulové) napětí. Bod A se často nazývá virtuální zem. Odpořem R_1 protéká proud vyvolaný vstupním napětím. Tento proud nepoteče do vstupu OZ, protože OZ má velký vstupní odpor. Proto poteče přes odpor R_2 do výstupu OZ. Odpořy tak tvoří odporový dělič, který se automaticky nastavuje tak, aby v bodě A bylo nulové napětí. Pak platí:

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_2}{R_2}$$

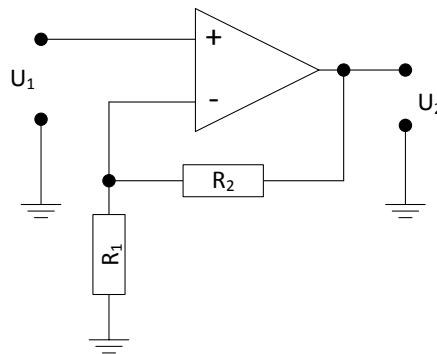
$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Druhým základním zapojením zesilovače je *neinvertující zesilovač* (viz obr. 3). Invertující vstup je uzemněn a vstupní signál přivádíme na neinvertující vstup. Předpokládáme, že

napětí mezi vstupními svorkami i proud tekoucí do obou vstupů OZ jsou velmi malé (ideálně nulové). Napětí na odporu R_1 pak bude přibližně stejné jako vstupní napětí U_1 . Pro zesílení tak platí

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Při použití stejných odporů jako u invertujícího zesilovače je zesílení neinvertujícího zesilovače vždy větší o jedničku. Tento zesilovač má vysoký vstupní odpor, který je dán vstupním odporem OZ (ideálně nekonečný). Pokud odpory R_1 a R_2 nahradíme zkratem, získáme obvod nazývaný sledovač, který se používá např. tam, kde je třeba, aby následující obvody nezatěžovaly zdroj signálu.

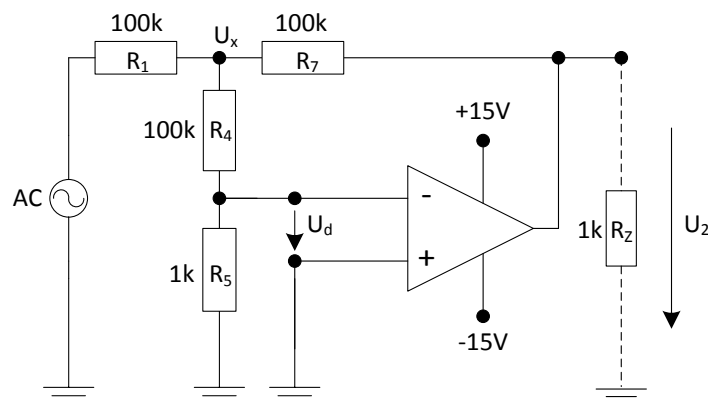


Obr. 3: Neinvertující zesilovač

Měření statických parametrů operačního zesilovače

1. Napětové zesílení v otevřené smyčce A_u

Napětové zesílení při otevřené smyčce zpětné vazby je zesílení definované pro předepsanou zátěž, napájecí napětí a maximálně přípustný (nezkreslený) vstupní signál, při kompenzované nesymetrii vstupů, jedná se tedy o zesílení samotného OZ. Zesílení otevřené smyčky lze měřit pomocí uzavřené záporné zpětné vazby, viz obr. 4.



Obr. 4: Zapojení pro měření napětového zesílení otevřené smyčky s uzavřenou zápornou zpětnou vazbou

Napětové zesílení v otevřené smyčce A_u je dáno poměrem výstupního napětí U_2 a diferenciální vstupního napětí:

$$A_u = \frac{U_2}{U_d}$$

Pro obvod s hodnotami odporů na obr. 4 pak platí:

$$U_d = \frac{U_x}{101}$$

tedy

$$A_u = 101 \cdot \frac{U_2}{U_x}$$

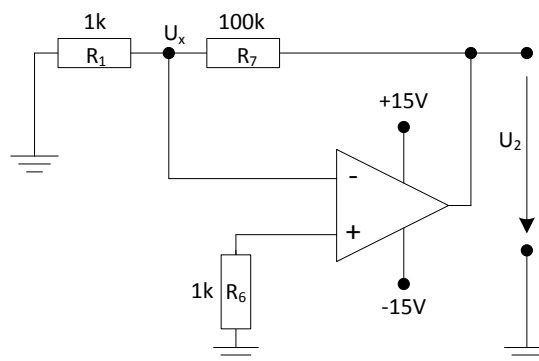
V tomto zapojení je možné změřit také výstupní odpor R_0 . Jelikož je OZ zapojen se zápornou zpětnou vazbou, nelze R_0 změřit z poklesu výstupního napětí po připojení zátěže, protože OZ tento pokles vyrovná právě vlivem záporné zpětné vazby. Mechanismus vyrovnání poklesu výstupního napětí po připojení zátěže ale způsobí, že dojde k nárůstu diferenciálního napětí mezi vstupy OZ a právě z tohoto nárůstu lze R_0 určit. Výstupní odpor je dán vztahem:

$$R_0 = R_Z \cdot \frac{U_{xZ} - U_x}{U_x}$$

kde U_x je napětí před připojením zátěže, U_{xZ} je napětí po připojení zátěže.

2. Vstupní napětěová nesymetrie (offset) U_{10}

Napětěová nesymetrie je definována jako stejnosměrné napětí, které je potřeba přivést mezi vstupy OZ, aby výstupní napětí bylo nulové. Z praktických důvodů se měří obráceně, tedy na vstup OZ v invertujícím zapojení přivedeme nulové napětí a měříme výstupní napětí, to je rovno vstupní napětěové nesymetrii zesílené nastaveným zesílením. Napětěovou nesymetrii měříme v zapojení na obr. 5.



Obr. 5: Zapojení pro měření napětěové nesymetrie vstupů

Vstup zesilovače je uzemněn, výstupní napětí U_2 je tedy dáno vstupní napětíovou nesymetrií a zesílením zesilovače. Hodnota U_2 se změří pomocí stejnosměrného voltmetru. Hodnota U_{10} se poté určí podle vzorce

$$U_{10} = U_2 \frac{R_1}{R_1 + R_7}$$

pro hodnoty odporů uvedené v zapojení dle obr. 5 pak platí

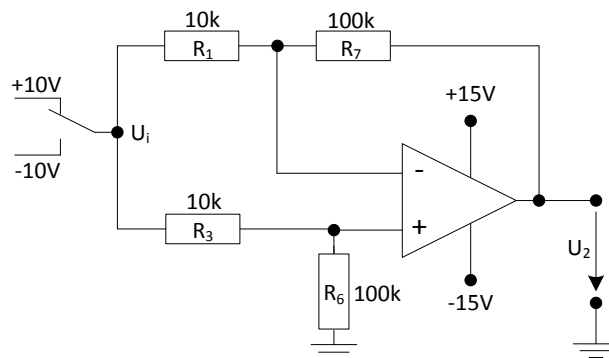
$$U_{10} = \frac{U_2}{101}$$

3. Činitel potlačení souhlasného signálu CMR

Reálný OZ kromě vstupního diferenciálního napětí zesiluje také vstupní souhlasné napětí, což je nežádoucí vlastnost. Pokud dojde ke změně souhlasného napětí o ΔU_s , projeví se to na výstupu OZ změnou o ΔU_2 . Činitel potlačení souhlasného signálu je definován jako poměr těchto změn vyjádřený v dB:

$$CMR = 20 \cdot \log \frac{\Delta U_s}{\Delta U_2} \quad [dB]$$

CMR měříme v zapojení na obr. 6.



Obr. 6: Zapojení pro měření činitele potlačení souhlasného signálu

Na vstupu OZ je třeba vytvořit změnu souhlasného napětí a změřit odpovídající změnu výstupního napětí. Nejprve se tedy na vstup přivede ze stejnosměrného zdroje +10V a změří se výstupní napětí (U_{21}), poté se na vstup přivede napětí -10V a opět se změří výstupní napětí (U_{22}). CMR se určí podle vzorce

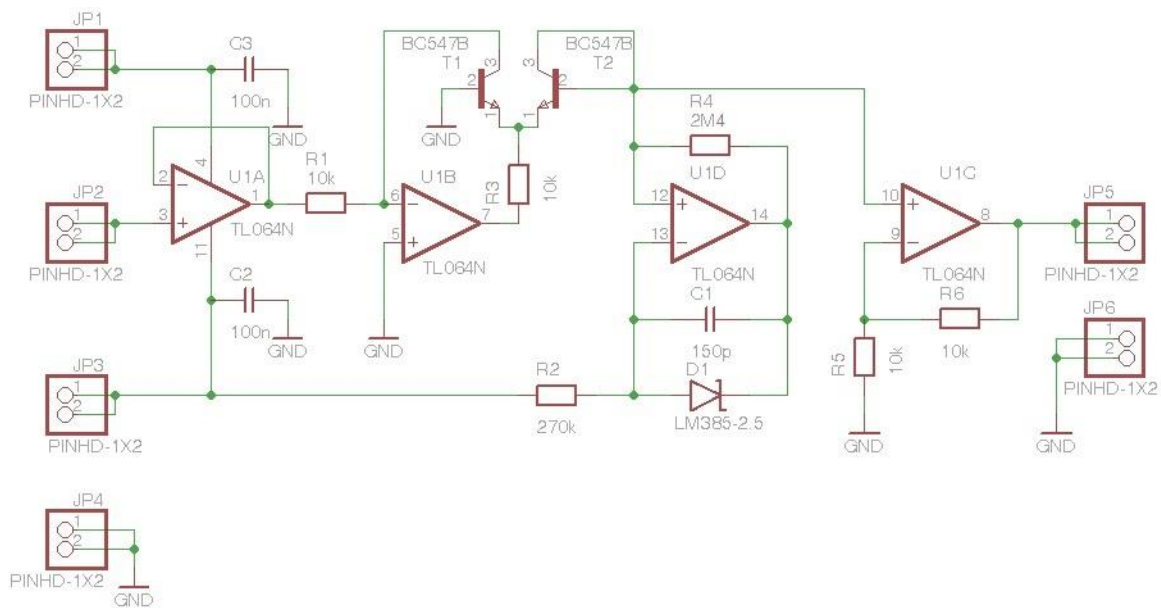
$$CMR = 20 \cdot \log \left(\frac{R_1 + R_7}{R_1} \cdot \frac{\Delta U_i}{\Delta U_2} \right)$$

Hodnota ΔU_i je změna napětí na vstupu (tj. 20V), hodnota ΔU_2 je odpovídající změna napětí na výstupu, tj. $U_{21} - U_{22}$. Pro hodnoty součástek uvedené na obr. 6 tedy platí

$$CMR = 20 \cdot \log \left(\frac{220}{U_{21} - U_{22}} \right)$$

Logaritmujičící operační zesilovač

Logaritmujičící zesilovač slouží k realizaci analogového násobení, dělení, kompresi signálů a k hledání hodnot logaritmických a exponenciálních funkcí. V obvodu záporné zpětné vazby se používá prvek s logaritmickou voltampérovou charakteristikou, tj. polovodičová dioda nebo tranzistor. Zapojení logaritmujičícího zesilovače použitého v praxi je znázorněno na obr. 7.



Obr. 7: Zapojení logaritmujičícího zesilovače

Logaritmujičící zesilovač na obr. 7 je tvořen dvěma NPN tranzistory T1 a T2. U1A slouží jako tzv. sledovač s vysokou impedancí (tj. zesilovač, který poskytuje zesílení rovno 1, tedy např. pokud je na vstup přivedeno 10V, na výstupu dostaneme také 10V). Zesilovač U1B konvertuje vstupní napětí na proud prostřednictvím R1 a T1. Zesilovač U1D, D1 a R4 vytváří tepelně stabilní zdroj proudu o velikosti 1μA, který stanovuje napětí na přechodu báze - emitor tranzistoru T2. U1C pak zesiluje rozdíl mezi napětím na přechodu báze - emitor mezi tranzistory T1 a T2. Výstupní napětí je dáno následujícím vzorcem

$$U_2 = - \left[1 + \frac{R_6}{R_5} \right] \cdot \frac{kT}{q} \cdot \left[\ln \frac{U_1}{(R_1 \times 1 \times 10^{-6})} \right]$$

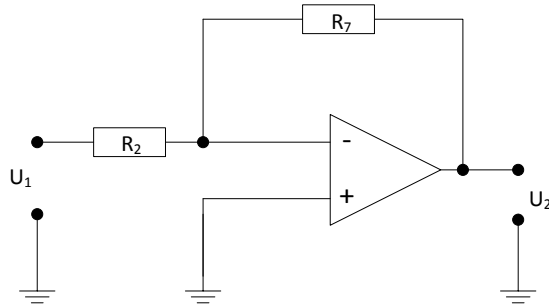
kde $k=1,38 \times 10^{-23}$, $q=1,602 \times 10^{-19}$ a T je teplota v K. Pro hodnoty odporů na obr. 7 a pro $T=300K$ platí

$$U_2 = -51,68 \times 10^{-3} \times \left[\ln \frac{U_1}{0,01} \right] V$$

Možná zapojení s operačními zesilovači

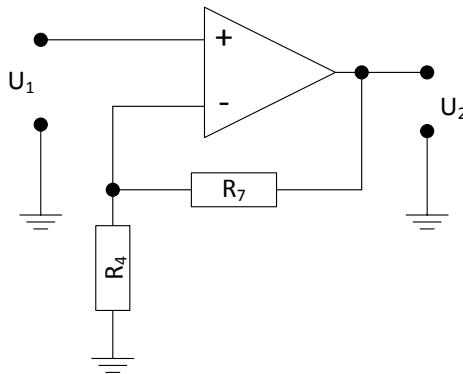
Operační zesilovače je možné používat v mnoha různých zapojeních. Mezi základní zapojení s operačními zesilovači patří tyto:

1. invertující zesilovač



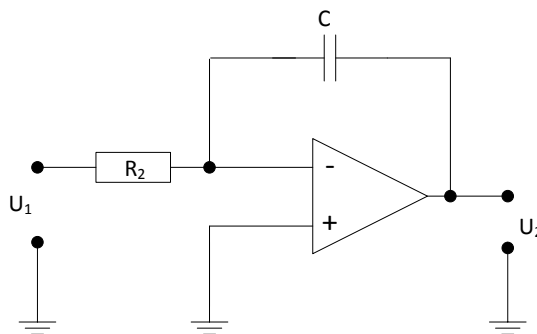
$$A_u = -\frac{R_7}{R_2}$$

2. neinvertující zesilovač



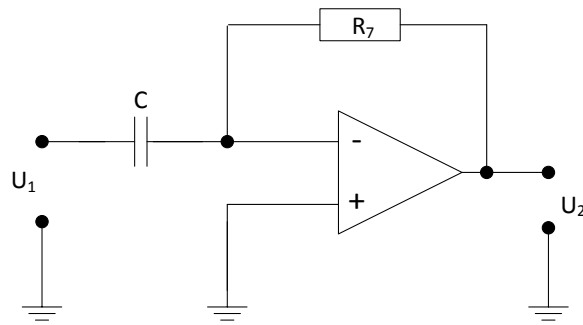
$$A_u = \frac{R_7}{R_4} + 1$$

3. integrační zesilovač



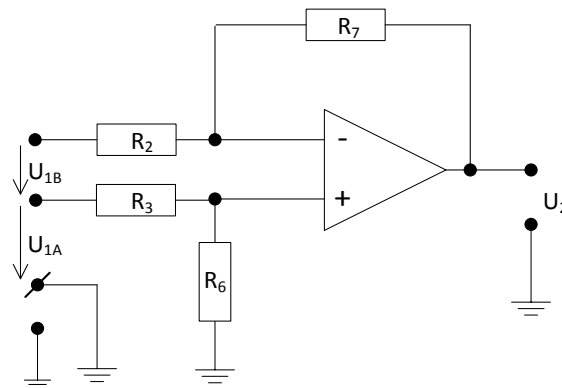
$$U_{2(t)} = -\frac{1}{R_2 C} \int U_1(t) dt + U_0$$

4. derivační zesilovač



$$U_{2(t)} = -R_7 C \frac{dU_1}{dt}$$

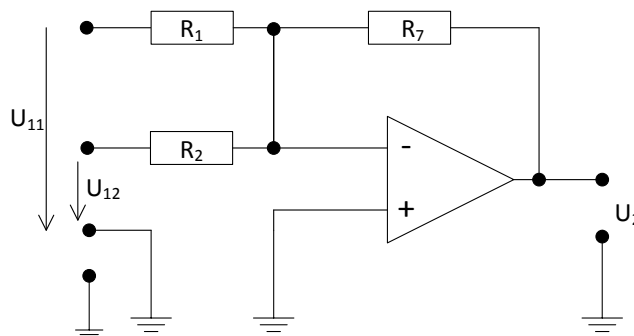
5. rozdílový



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

Pozn.: vzorec platí pro $\frac{R_7}{R_2} = \frac{R_6}{R_3}$

6. součtový



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

Pozn.: vzorec platí pro $R_1=R_2$, v obecném případě platí $U_2 = -R_7 \left(\frac{U_{11}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} \right)$.

Zadání

1. Sestavte invertující zesilovač a navrhnete odpory R_1 a R_2 tak, aby jeho napěťové zesílení A_u bylo rovno přibližně a) -0,1 b) -10. Ověřte zesílení napětí pro tři hodnoty vstupního napětí a frekvenci 1kHz. Vstupní a výstupní napětí odečítejte na osciloskopu.
2. Sestavte neinvertující zesilovač a navrhnete odpory R_1 a R_2 tak, aby jeho napěťové zesílení A_u bylo rovno přibližně a) 10 b) 100. Ověřte zesílení napětí pro tři hodnoty vstupního napětí a frekvenci 1kHz. Vstupní a výstupní napětí odečítejte na osciloskopu.
3. V zapojení podle obr. 4 změřte závislost zesílení A_u operačního zesilovače na frekvenci v rozsahu 10Hz až 15kHz. Frekvence vynášejte do grafu v logaritmické míře, zesílení vyneste v dB.

$$A_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad [dB]$$

Pozn.: Zesílení je nutné měřit za podmínky, kdy výstupní signál není zkreslený, proto tvar signálu neustále kontrolujeme na osciloskopu. Při přebuzení je nutné snížit vstupní napětí.

4. V tomtož zapojení změřte výstupní odpor zesilovače R_0 . Použijte zatěžovací odpor o velikosti $R_Z=1k\Omega$, vstupní napětí $U_1=10V$ a frekvence $f=1kHz$. Nejprve změřte hodnotu U_x bez zatěžovacího odporu, poté připojte zatěžovací odpor a změřte hodnotu U_{xz} .
5. V zapojení podle obr. 5 změřte vstupní napěťovou nesymetrii zesilovače. Ke změření výstupního napětí U_2 použijte stejnosměrný voltmetr.
6. V zapojení podle obr. 6 určete činitel potlačení souhlasného signálu CMR. Nejprve na vstup OZ přiveďte +10V ze stejnosměrného zdroje a změřte výstupní napětí U_{21} , poté na vstup přiveďte -10V a změřte výstupní napětí U_{22} .
7. V zapojení podle obr. 7 změřte závislost výstupního napětí U_2 logaritmujícího operačního zesilovače na vstupním napětí U_1 . Změřené hodnoty porovnejte s teoretickým výpočtem U_2 (vyneste do stejného grafu jako změřené hodnoty U_2).

Použitá literatura

- ONDRÁČEK, Zdeněk: Elektronika pro fyziky, Masarykova univerzita v Brně, Brno 1998, ISBN 80-210-1741-4
- MORAVČÍK, Lukáš: Úlohy pro fyzikální praktikum – Operační zesilovače, Masarykova univerzita, Brno 2007
- RONEŠOVÁ, Andrea: Měření statických parametrů operačních zesilovačů, Plzeň 2005
- Operační zesilovač, návod laboratorní práce, VŠCHT, Praha