

10. Operační zesilovače a jejich aplikace, parametry OZ. Vlastnosti lineárních operačních sítí a sítí s nelineární zpětnou vazbou

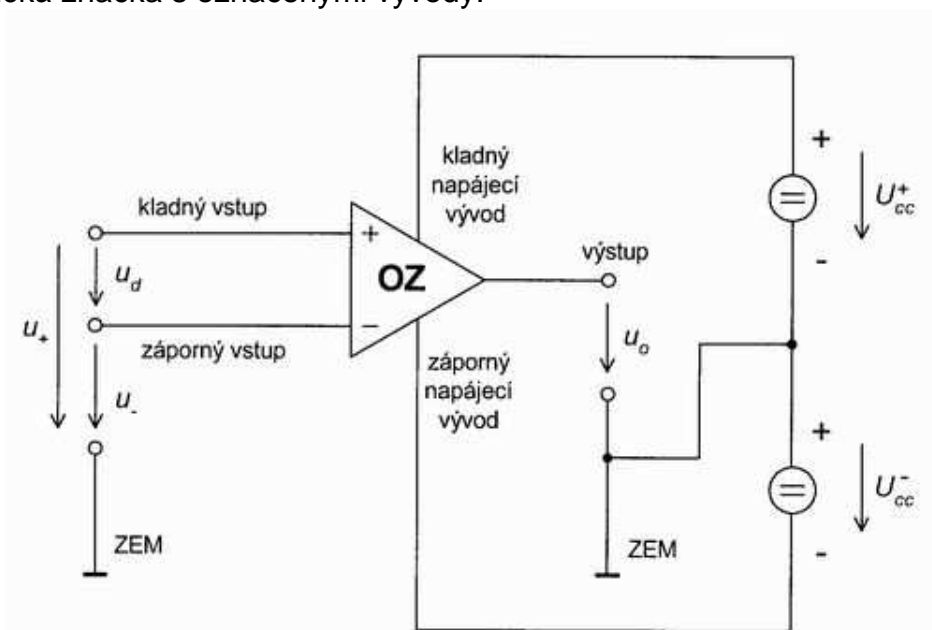
Jak to funguje

Operační zesilovač je součástka, která byla původně vyvinuta pro realizaci matematických operací v analogových počítačích.

Základní OZ má tyto vývody:

- kladný (neinvertující) vstup
- záporný (invertující) vstup
- výstup
- dva napájecí vývody, které se ve schématu většinou nekreslí

Schematická značka s označenými vývody:



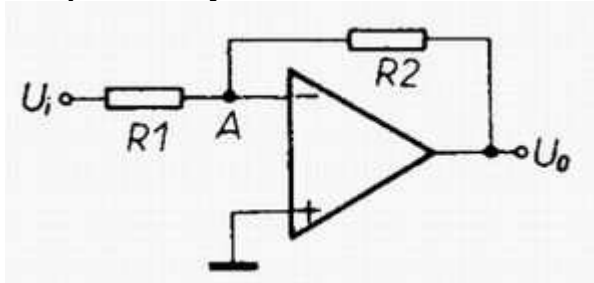
Skutečný operační zesilovač si pro teoretický rozbor idealizujeme pomocí ideálního operačního zesilovače. Následující tabulka udává základní vlastnosti ideálního OZ a jeho srovnání s reálným OZ:

	Ideální OZ	Reálný OZ
Zesílení	Nekonečné	Desítky tisíc (80dB) až jednotky milionů (120dB)
Vstupní odpor	Nekonečný (OZ nezatěžuje předcházející obvody, do jeho vstupů neteče proud)	Až $10^{12}\Omega$
Výstupní odpor	Nulový (lze zanedbat vliv zátěže, zesílení je nezávislé na velikosti výstupního proudu)	Desítky ohmů

Vlastnosti obvodu s OZ zásadním způsobem ovlivňuje zapojení zpětné vazby. Z teorie zpětné vazby lze odvodit, že má-li samostatný OZ zesílení blízké se nekonečnu, jsou vlastnosti celého zapojení závislé pouze na připojené zpětné vazbě.

Základní zapojení OZ

Základním zapojením OZ je **invertující zesilovač**.



Vstupní napětí U_i je přivedeno přes rezistor R_1 na invertující vstup OZ. Ten toto napětí zesílí a na jeho výstupu se tedy objeví zesílené vstupní napětí, avšak s opačnou polaritou. Toto výstupní napětí je přes rezistor R_2 rovněž přivedeno na invertující vstup OZ a protože má opačnou polaritu, zmenšuje vstupní napětí. Protože má OZ velké (ideálně nekonečné) zesílení, ustálí se obvod ve stavu, kdy je v bodě A jen velmi malé (ideálně nulové) napětí. Bod A se proto někdy nazývá virtuální zem. Napětí U_i také vyvolá proud tekoucí rezistorem R_1 . Tento proud však z důvodu vysokého vstupního odporu nemůže téci do vstupu OZ, a proto teče přes rezistor R_2 do výstupu OZ. Rezistory R_1 a R_2 tedy v podstatě tvoří odporový dělič, který má ve středu nulové napětí. Pro nekonečné zesílení OZ lze poté odvodit pro výstupní napětí vztah:

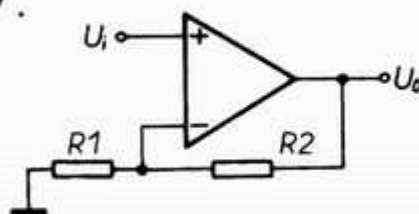
$$U_o = -\frac{R_2}{R_1} U_i$$

Invertující zapojení má ještě tyto důležité vlastnosti:

- Odpor R_1 se řadí paralelně k obvodům předcházejícím \Rightarrow ovlivnění velikosti U_i . Tento odpor ale nelze zvolit moc velký, protože se zásadně podílí na velikosti napěťového zesílení a pro tento účel by měl být naopak poměrně malý
- Oba vstupy pracují s nulovým napětím, a proto se neuplatňuje případné horší potlačení souhlasného signálu CMR (tento parametr vysvětlím v části o dynamických vlastnostech OZ)

Druhým důležitým zapojením je **neinvertující zesilovač**

$$A = \frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$



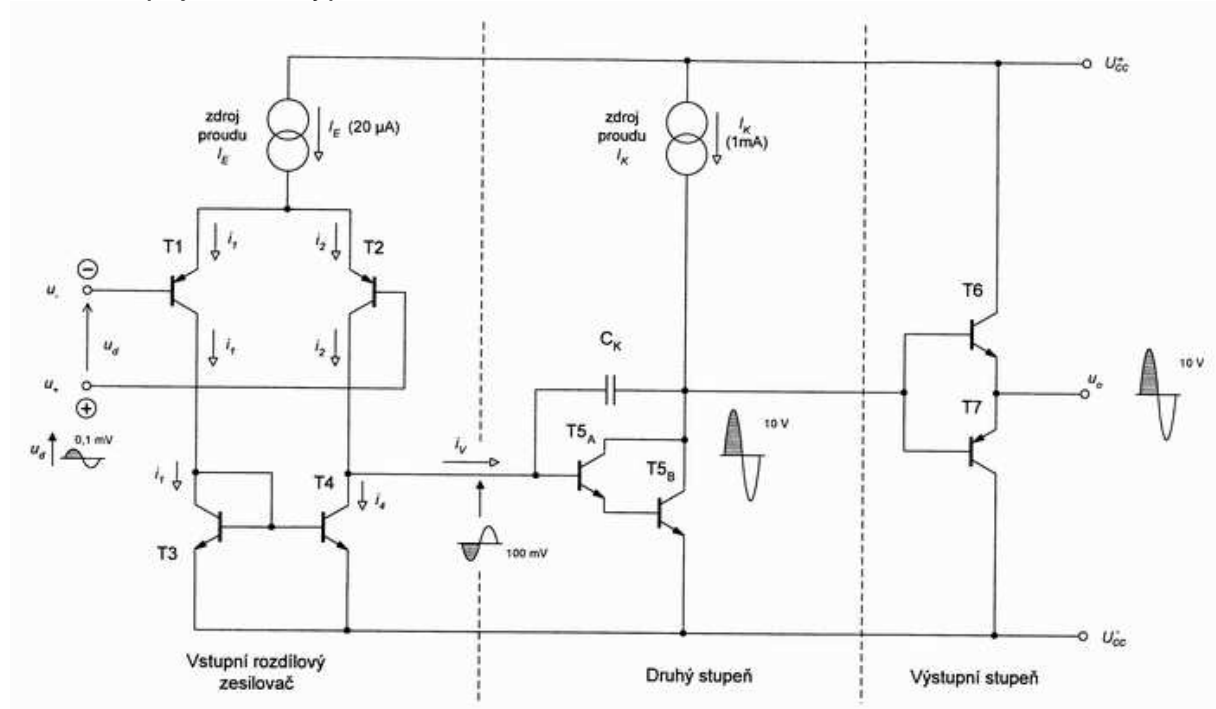
Z uvedeného vztahu pro výpočet napěťového zesílení je tedy zřejmé, že se po přivedení vstupního napětí objeví na výstupu napětí, které bude zesíleno s koeficientem $\frac{R_2}{R_1} + 1$ a toto napětí bude ve fázi s napětím vstupním.

Neinvertující zapojení má ještě tyto důležité vlastnosti:

- Prakticky neovlivňuje předcházející obvody, protože jsou připojeny přímo do neinvertujícího vstupu OZ- vstupní odpor je značně vysoký, ideálně nekonečný
- Oba vstupy pracují na úrovni vstupního signálu a je proto zapotřebí, aby měl OZ dobré potlačení souhlasného signálu CMR

Co se skrývá v symbolické značce

Vnitřní zapojení OZ vypadá asi takto:



Funkce jednotlivých částí obvodu jsou následující:

- Vstupní rozdílový zesilovač- zesiluje rozdílové napětí u_d přibližně 10^3 až 10^4 krát
- Druhý stupeň- tranzistory T5a a T5b jsou zapojeny v tzv. Darlingtonově zapojení. Toto zapojení má malý vstupní proud a neovlivňuje vlastnosti předcházejícího rozdílového zesilovače. Zesílení obou tranzistorů se násobí a tento stupeň poskytuje napěťové zesílení 100-300.
- Výstupní stupeň- realizován komplementárním emitorovým sledovačem, jehož napěťové zesílení je skoro 1 a který odděluje zátěž od předchozích stupňů.
- Kapacita C_K - zlepšuje frekvenční stabilitu zapojení a omezuje základy na výstupu. Její zvětšení má však za následek snížení rychlosti přeběhu výstupního napětí (bude vysvětleno za chvíli u Dynamických parametrů) a tedy celkově horší dynamické vlastnosti daného OZ.

Maximální výstupní napětí OZ je tedy dáno napájecím napětím U_{cc+} a U_{cc-} . Při tomto výstupním napětí je ale OZ v saturaci.

Na základě typu tranzistorů vstupního zesilovače rozdělujeme OZ do dvou skupin:

- Bipolární tranzistory- s těmito tranzistory lze dosáhnout malé napěťové nesymetrie. Nevýhodou je poměrně velký vstupní klidový proud a malý vstupní odpor (pojmy vysvětlím hnedka v následující části)
- Tranzistory řízené polem- mají malý vstupní klidový proud a vysoký vstupní odpor. Nevýhodou je větší napěťová nesymetrie.

Vlastnosti reálného OZ

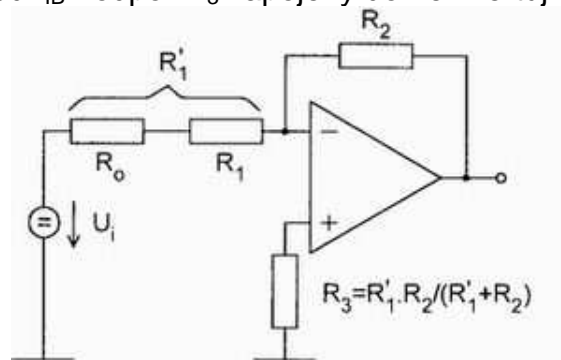
Statické parametry

Z výše uvedeného popisu konstrukce OZ plynou některé důležité vlastnosti reálného OZ.

- *Vstupní napěťová nesymetrie*- napětí, které je zapotřebí přivést mezi vstupní svorky OZ, aby na výstupu OZ bylo napětí 0V. Vstupní napěťová nesymetrie vzniká, protože tranzistory T1 a T2 ve vstupním zesilovači nikdy nejsou přesně stejné. Typická hodnota vstupní napěťové nesymetrie je do 10mV. Při její kompenzaci postupujeme, jak uvádí odborná literatura, dle pokynů výrobce :-)
- *Vstupní klidový proud* I_{IB} - do bází tranzistorů vtéká jistý proud (typicky 80nA)
- *Vstupní proudová nesymetrie* I_{IO} - vzniká ze stejného důvodu jako nesymetrie napěťová- tranzistory T1 a T2 však nemohou být vyrobeny úplně stejně a jejich vstupní proud je tudíž rozdílný. Typická hodnota je 20nA.

Kompenzace:

Vstupní proudy I_{IB} a proudová nesymetrie I_{IO} se uplatňují pouze tehdy, je-li vstup OZ spojen se zemí přes velkou impedanci. Nejjednodušší kompenzace vstupních proudů I_{IB} - odpor R_3 zapojený do neinvertujícího vstupu OZ:



Shodné vstupní proudy vyvolají na odporech R_3 a $R_1' || R_2$ shodné napěťové úbytky a nevyvolají tedy chybu na diferenčním vstupu. Nevýhodou tohoto zapojení je zhoršení (snížení) horního mezního kmitočtu celého zesilovače.

Uvedené zapojení nekompensuje za proudovou nesymetrii I_{IO} . Ta je však většinou velmi malá a pro praktické aplikace ji lze zanedbat.

- *CMR (Common Mode Rejection)*-Potlačení součtového signálu – Zesílení ideálního OZ je dáno pouze rozdílem napětí mezi invertujícím a neinvertujícím

vstupem. Ve skutečnosti však nelze nikdy zcela vyloučit vliv potenciálu obou vstupů vůči zemi. Schopnost potlačení tohoto, tzv. součtového signálu, vyjadřuje koeficient CMR, který dosahuje u běžných OZ hodnoty 90dB, u lepších až 120dB.

Nelineární a dynamické parametry

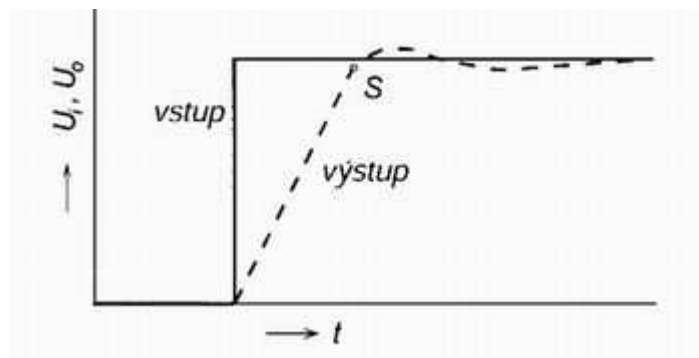
Nelineární a dynamické parametry udávají meze, ve kterých platí popis pomocí lineárních koeficientů.

Důležité katalogově udávané parametry:

- Mezní hodnota vstupního dif. napětí $U_{lp\ max}$
- Mezní hodnota vstupního souhlasného napětí $U_{l\ max}$
- Rozkmit výstupního napětí- většinou se blíží napájecímu napětí $\pm U_{cc}$
- Minimální a maximální napájecí napětí U_{cc}
- Minimální zatěžovací odpor

Dále následují některá dynamická omezení:

- Rychlost přeběhu (Slew rate)- nejvyšší rychlost změny výstupního napětí, jakou je schopen OZ vyvinout jako odezvu na skokovou změnu vstupního napětí



Pro výpočet rychlosti přeběhu je definován vztah:

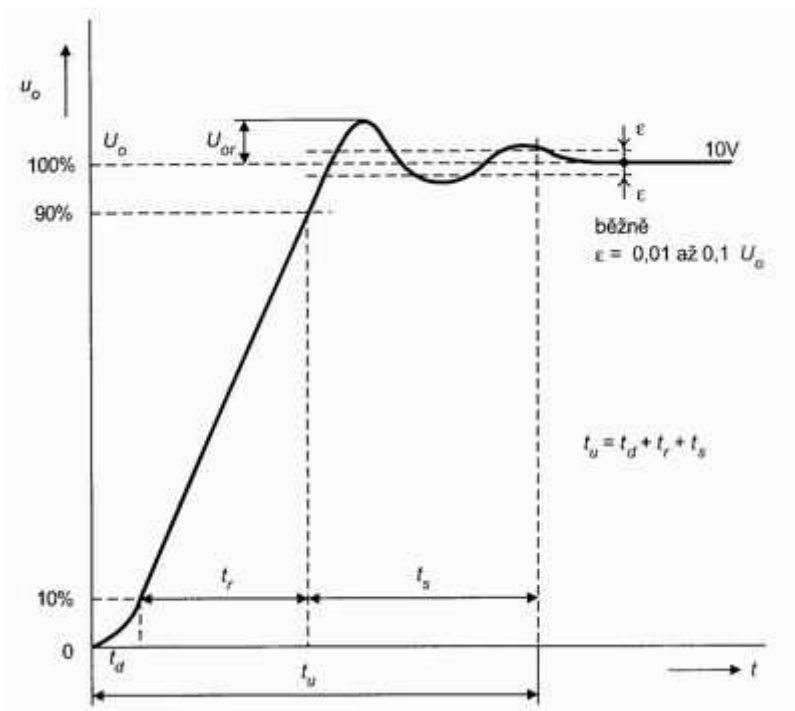
$$S = \frac{\Delta u_0}{\Delta t}$$

Běžné OZ mají rychlost přeběhu $0,5-5V / \mu s$, speciální až $100V / \mu s$.

- Mezní kmitočet f_p udává frekvenci, při které dosáhne strmost sinusovky o amplitudě U_{om} rychlosti přeběhu S , přičemž dochází ke zkreslení maximálně 1%. Sinusovka má maximální strmost při průchodu nulou.

$$\text{Platí } f_p = \frac{S}{2\pi U_{om}} \cdot 10^3 \text{ [kHz, V / } \mu s, V]$$

- Doba ustálení t_s - časový interval od průchodu signálu určitou úrovní (většinou 90%) do doby, v níž signál naposledy dosáhne úrovně, která se liší od ustálené hodnoty o zvolenou hodnotu ε . To tedy není moc hezká definice, ale doufám, že následující obrázek to dostatečně vysvětlí:

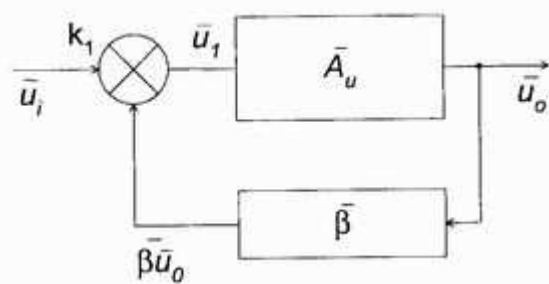


- Doba zotavení t_z - udává schopnost OZ vyvést výstup v určitém čase ze saturace

Vliv záporné zpětné vazby na vlastnosti zesilovače

Protože se ve většině zapojení s OZ setkáváme se zápornou zpětnou vazbou, rád bych se zde alespoň krátce zmínil o jejím vlivu na vlastnosti zesilovače. ZZV přivádí část výstupního signálu zpět na vstup zesilovače a zároveň obrací fázi tohoto signálu.

Formálně lze zpětnou vazbu vyjádřit následujícím obrázkem:



Situaci lze také popsat vztahem:

$$\bar{A}_z = \frac{\bar{u}_o}{u_i} = k_1 \frac{\bar{A}_u}{1 - \bar{\beta} \bar{A}_u}$$

kde \bar{A}_z označuje zisk struktury se ZV, $\bar{\beta}$ je činitel ZV (udává míru přenosu z výstupu na vstup), k_1 je přenosová konstanta vstupního obvodu. Všechny veličiny kromě k_1 mohou být obecně komplexní, což také vyjadřuje pruh nad nimi.

Aby byl systém stabilní, musí pro zisk zpětnovazební smyčky platit: $\overline{\beta A_u} \neq 1$

Pro zapojení invertujícího i neinvertujícího zesilovače lze činitel zpětné vazby $\bar{\beta}$ přepsat následujícím způsobem:

$$\bar{\beta} = -B$$

kde

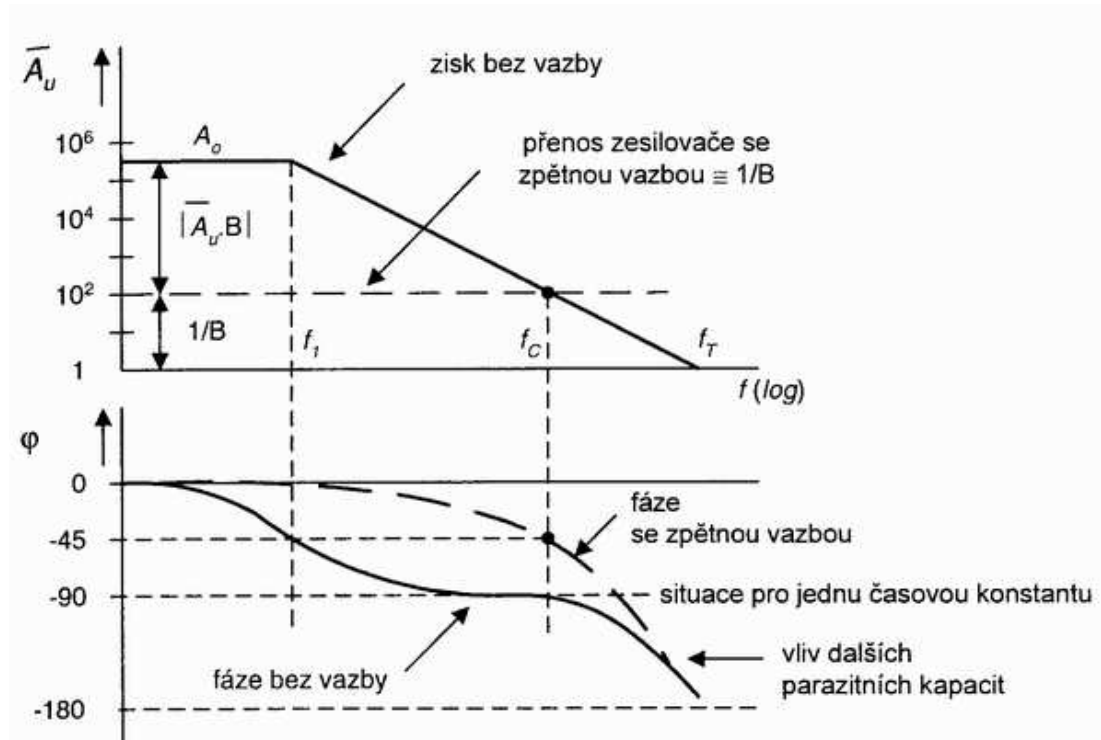
$$\bar{B} = B = \frac{R1}{R1 + R2}$$

B vyjadřuje reálný přenos struktury.

Výše uvedený vztah pro zisk celé struktury lze tedy přepsat do tvaru:

$$\bar{A}_N = \frac{\bar{A}_U}{1 + B\bar{A}_U} = \frac{1}{B} \frac{1}{1 + 1/(B\bar{A}_U)}$$

Takto vyjádřenou kmitočtovou závislost lze zakreslit do grafů vyjadřujících absolutní hodnotu a fázi zesílení:

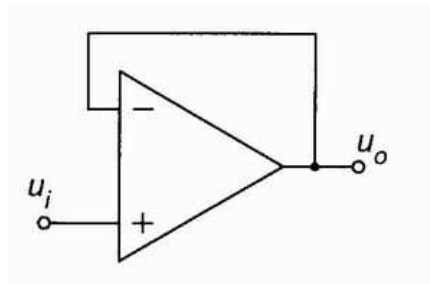


Z obrázku je patrné, že ZV snižuje zesílení zesilovače, avšak významně rozšiřuje jeho frekvenční pásmo, ve kterém je změna fáze menší než 45°, z kmitočtu f_1 až na kmitočtet f_c , pro který platí vztah:

$$f_c = f_1(1 + BA_0)$$

Tranzitní kmitočtet f_T , na kterém má zesilovač jednotkové zesílení (0dB), je dán vztahem: $f_T = A_0 f_1$

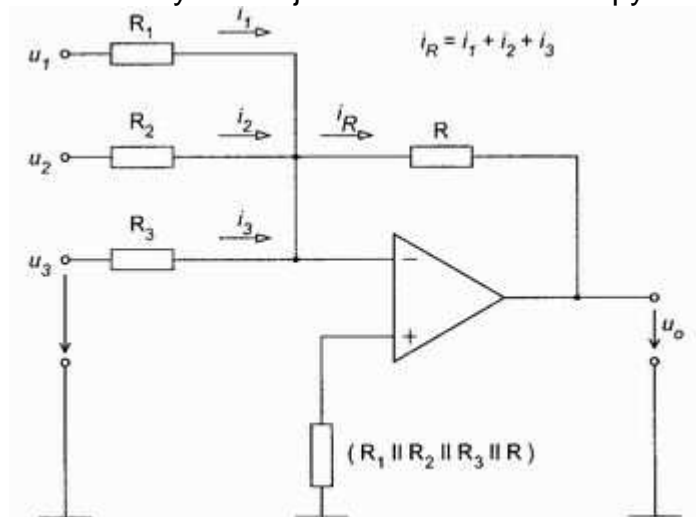
Důležitá zapojení s OZ Sledovač



Jde o zapojení neinvertujícího zesilovače se ziskem $A_N=1$
Má největší vstupní odpor ze všech možných zapojení, a proto se používá k oddělení zdrojů signálu s velkým výstupním odporem.

Součtový invertující zesilovač

Jako ilustraci uvádím součtový invertující zesilovač se 3 vstupy:



Invertující vstup OZ je v tomto zapojení virtuální zemí, platí tedy:

$$i_1 = u_1 / R_1, i_2 = u_2 / R_2, i_3 = u_3 / R_3$$

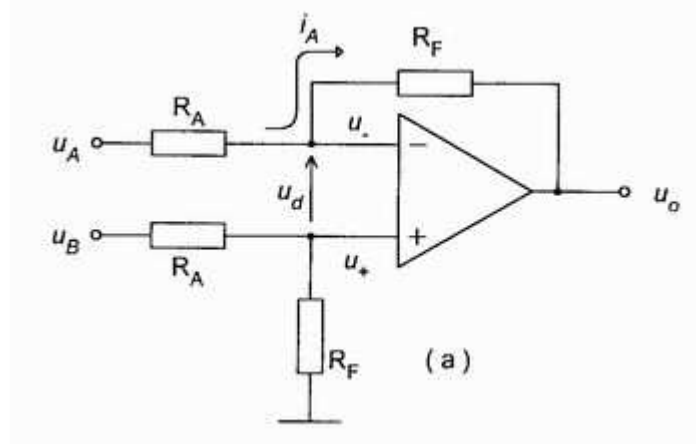
Pro ideální OZ platí $i_1 = i_2 = i_3$, všechny proudy tedy protékají přes zpětnovazební odpor R. Nyní lze výstupní napětí popsat jako:

$$u_0 = -i_R R = -(u_1 R / R_1 + u_2 R / R_2 + u_3 R / R_3)$$

pro $R_1 = R_2 = R_3$ tedy platí:

$$u_0 = u_1 + u_2 + u_3$$

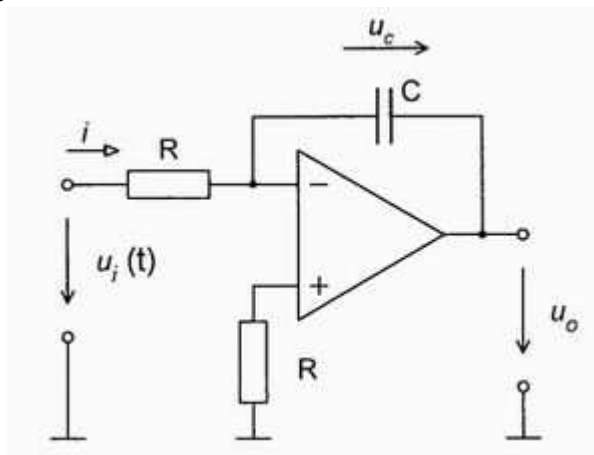
Rozdílový zesilovač



Analýzu rozdílového zesilovače lze jednoduše provést pomocí principu superpozice-uzemníme svorku u_A a vypočteme výstupní napětí a poté provedeme to samé se svorkou u_B . Vypočtené „příspěvky“ obou svorek sečteme a získáme:

$$u_O = (u_B - u_A)R_F / R_A$$

Integrační zesilovač



Pro napětí na kondenzátoru C platí:

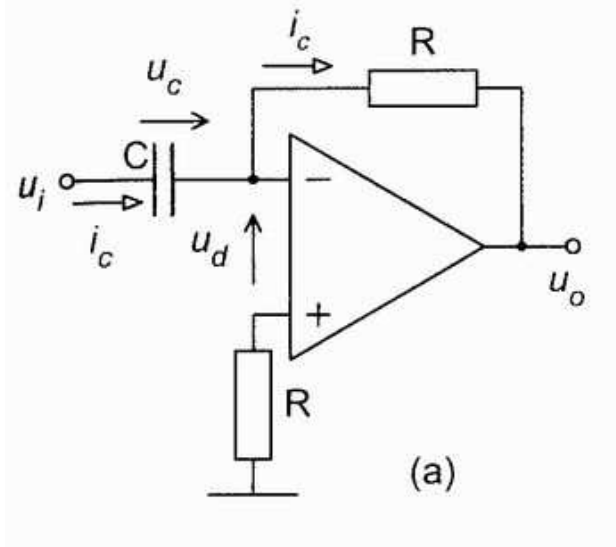
$$u_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_i(t)}{R} dt$$

Z čehož lze získat běžně udávaný vztah pro výstupní napětí

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt - u_o(t=0)$$

kde $u_o(t=0)$ symbolizuje napětí na výstupu při „spuštění“ integrátoru a RC je časová konstanta integrátoru

Derivační zesilovač

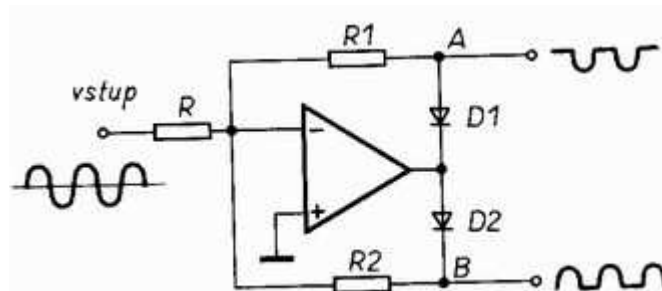


Pro proud i_c platí známý vztah $i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$

Potom: $u_o = -Ri_c = -RC \frac{du_i}{dt}$

Usměrňovač

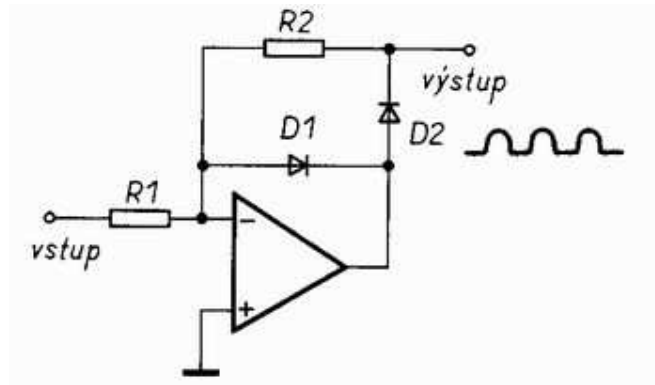
Dvoucestný usměrňovač



Přivedeme-li na vstup dvoucestného usměrňovače kladné napětí, objeví se na výstupu OZ napětí záporné. Dioda D2 je zavřena, smyčka zpětné vazby se uzavírá přes diodu D1 a rezistor R1. Zpětná vazba se snaží udržet na invertujícím vstupu nulové napětí (virtuální zem) a napětí v bodě A bude dáno poměrem $R1/R$. Jestliže nebude překročeno maximální výstupní napětí OZ a výstup se nedostane do saturace, je napětí v bodě A nezávislé na úbytku napětí na D1.

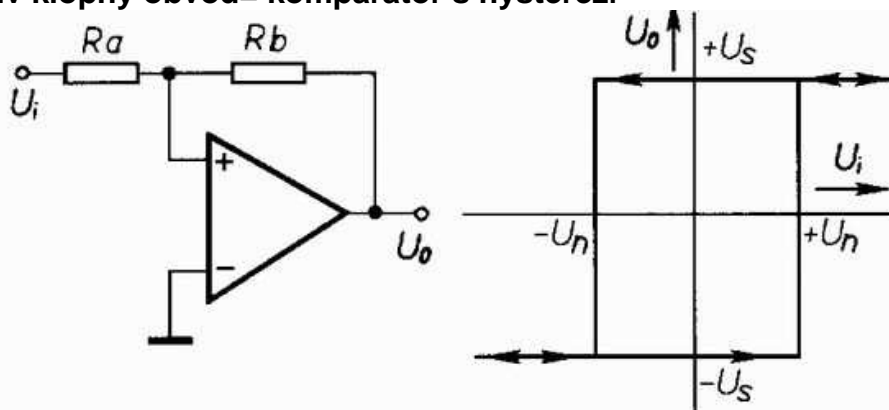
Přivedeme-li na vstup záporné napětí, bude uzavřena dioda D1 a zpětná vazba se uzavře přes D2 a R2.

Jednocestný usměrňovač



Pracuje na podobném principu jako usměrňovač dvoucestný. Protože však nepožadujeme výstup z bodu A, byl vypuštěn rezistor R1.

Schmittův klopný obvod= komparátor s hysterezí

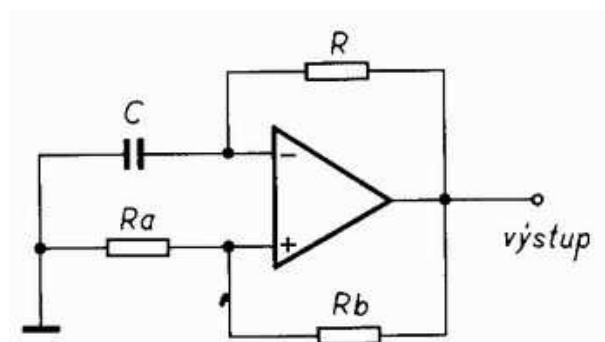


Předpokládejme, že na výstupu je záporné saturační napětí $-U_S$. Zvětšujeme-li nyní napětí na vstupu od záporného napájecího napětí, zůstává výstup beze změny, dokud nedosáhne napětí na vstupu $+U_n$. V ten okamžik bude také napětí na neinvertujícím vstupu „kladnější“ než na invertujícím a výstupní napětí klopného obvodu se skokem změní ze záporného saturačního napětí $-U_S$ na kladné $+U_S$. Zmenšujeme-li nyní napětí na vstupu, musíme dosáhnout hodnoty $-U_n$, aby se výstup překlátil zpět na záporné saturační napětí $-U_S$.

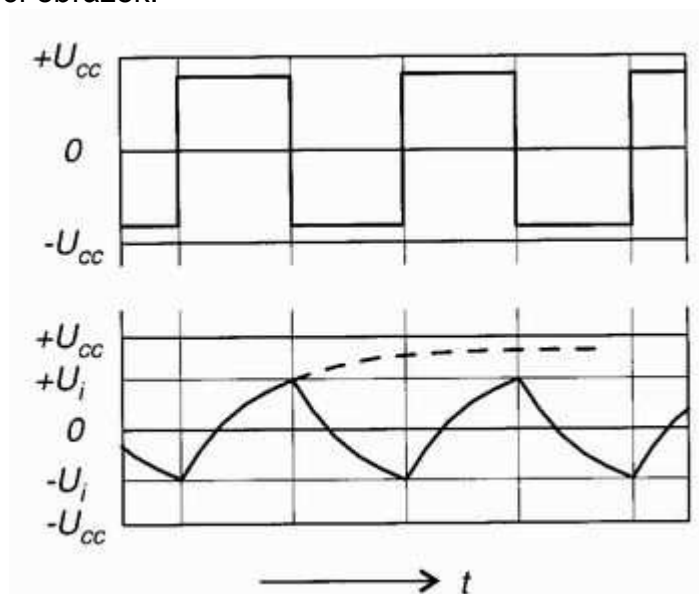
Napětí, při kterém se obvod překlápí, je závislé na výstupním saturačním napětí a poměru odporů R_a a R_b

$$U_n = \pm U_S \frac{R_a}{R_a + R_b}$$

Multivibrátor



Na výstupu je signál s pravoúhlým průběhem a se střídou velmi blízkou 1:1, jak ilustruje následující obrázek:



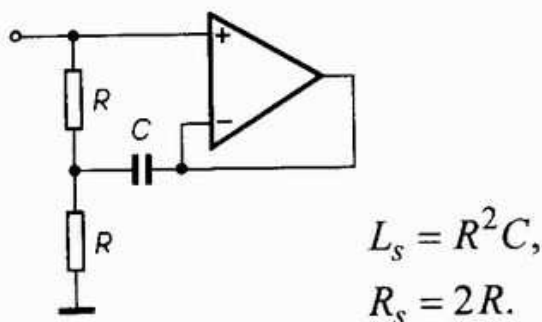
Předpokládejme, že na výstupu je kladné napětí, které se blíží kladnému napájecímu napětí U_{CC} . Kondík C se nabíjí přes rezistor R z výstupu tak dlouho, dokud napětí na něm nedosáhne napětí na neinvertujícím vstupu OZ. Pak se napětí na výstupu skokem změní z kladného na záporné a kondík se vybíjí (nabíjí se na záporné napětí) atd.

Kmitočet multivibrátoru:

$$f = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + \frac{2Ra}{Rb}\right)}$$

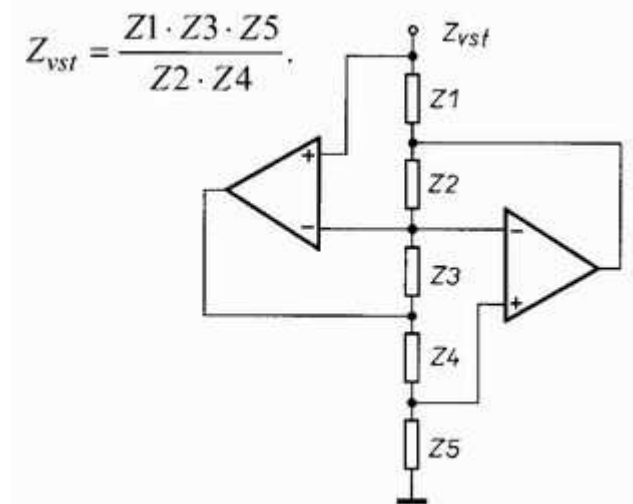
Syntetický induktor

Použití klasických induktorů v integrovaných obvodech je velmi složité a byla zde proto snaha nahradit tyto klasické induktory jinými zapojeními s podobnými vlastnostmi. Nejjednodušší principiální zapojení je uvedeno na následujícím obrázku:



Nevýhodou tohoto syntetického induktoru je značný sériový odpor R_s .

Zapojení pro realizaci impedančních invertorů a konvertorů



Toto zapojení umožňuje realizovat různé impedance.
Vztah pro vstupní impedanci obvodu je uveden u obrázku.

Vypuštěním impedance Z5 dostaneme obecný impedanční konvertor označovaný GIC.

Jestliže zvolíme za impedanci Z4 kondenzátor ($Z4 = 1/(pC)$) a impedance Z1, Z2, Z3, Z5 nahradíme rezistory, bude obvod pracovat jako GIC, který transformuje kapacitu C na vstup jako indukčnost L:

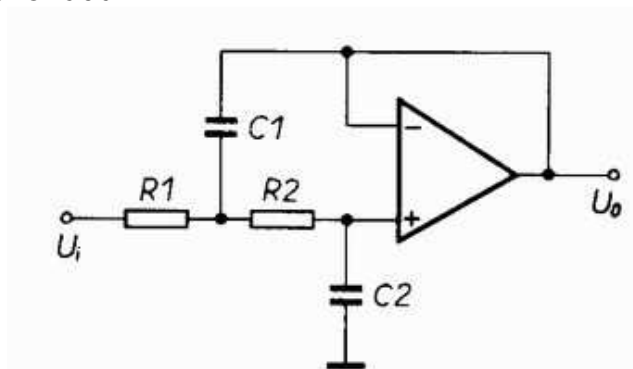
$$L = \frac{R1R3R5}{R2} C$$

Aktivní filtry

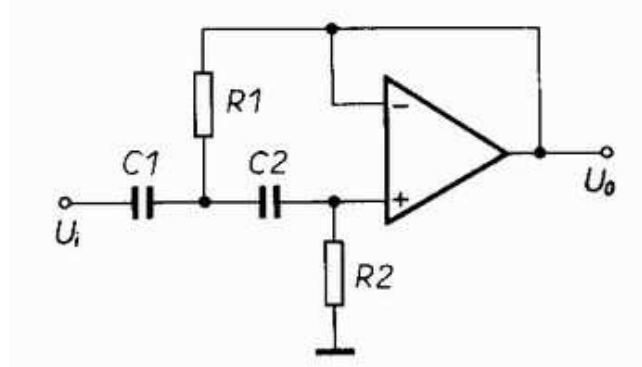
Filtry s OZ jsou obvykle jednodušejší realizovatelné, než filtry pasivní. Jejich návrh je navíc možné provést tak, aby nebylo nutné použít cívek.

Pro ilustraci bych zde uvedl dolní a horní propust druhého řádu. K výpočtu hodnot jednotlivých prvků na zvoleném kritickém kmitočtu f_m použijeme tabulky s příslušnými koeficienty.

Dolní propust druhého řádu:



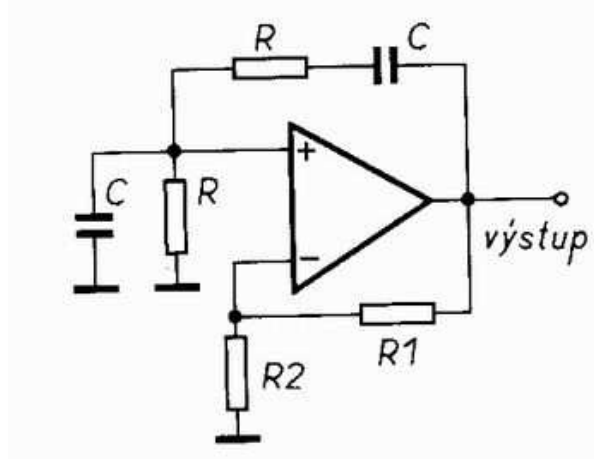
Horní propust druhého řádu



Oscilátory

Dalším důležitým využitím OZ jsou generátory signálu s harmonickým (sinusovým) průběhem.

Jako základní zapojení se využívá oscilátor s Wienovým členem:



Samotný Wienův člen je zapojen ve větvi kladné zpětné vazby. Ve větvi záporné zpětné vazby se pomocí R_1 a R_2 nastavují zesílení mezi vstupem a výstupem blízké 3. Zesílení OZ tak vlastně kompenzuje útlum Wienova členu na požadované frekvenci f_0 .

Další využití OZ- převodníky

Napětí-kmitočet
Teplota-napětí
Teplota-kmitočet
Napětí-střída
Napětí-proud
atd.

Vlastnosti lineárních operačních sítí a sítí s nelineární zpětnou vazbou

Pod názvem lineární operační síť se neskrývá nic jiného, než výše probraná zapojení sledovače, součtového a rozdílového zesilovače, integrátoru a poté zapojení složitější, na která u té zkoušky snad stejně nebude čas. Toto vzosné označení těchto obvodů používá snad pouze prof. Uhlíř ve své knížce Elektronické obvody a funkční bloky 2.

Operační sítě s nelineární zpětnou vazbou

Jedná se o taková zapojení operačních zesilovačů, v jejichž zpětné vazbě figuruje jeden či více nelineárních členů, např. dioda, tranzistor. Použití těchto členů vede k nelineární závislosti výstupní veličiny na veličině vstupní.

Příkladem mohou být výše uvedené usměrňovače s diodami.

Literatura

[1] Belza, Jaroslav. Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky. 1. vyd. Praha: Ben, 2004.

[2] Punčochář, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha : BEN, 2002

Případné připomínky, nejasnosti, upozornění na chyby nebo kdybyste si přáli některou část otázky zpracovat podrobněji, dejte prosím vědět na jelinek.michal@gmail.com