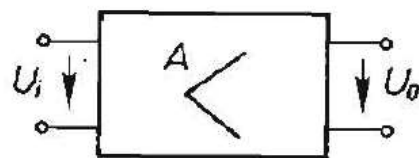


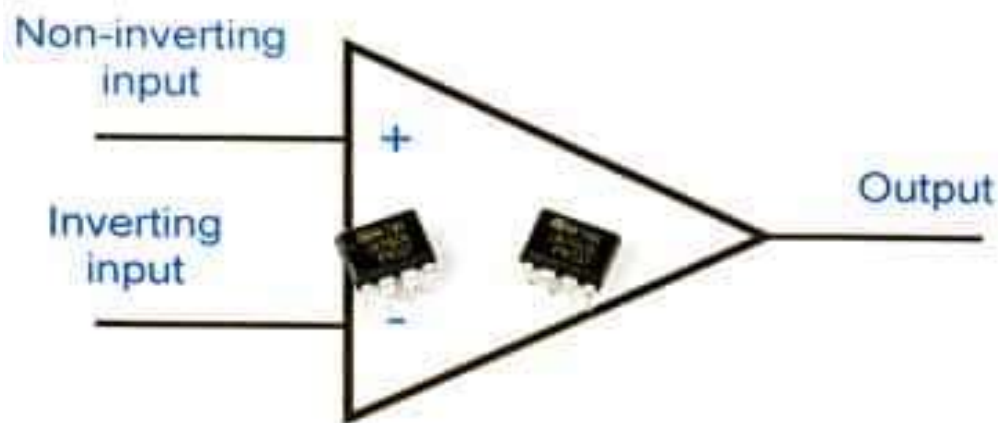
Základy operačních zesilovačů I.



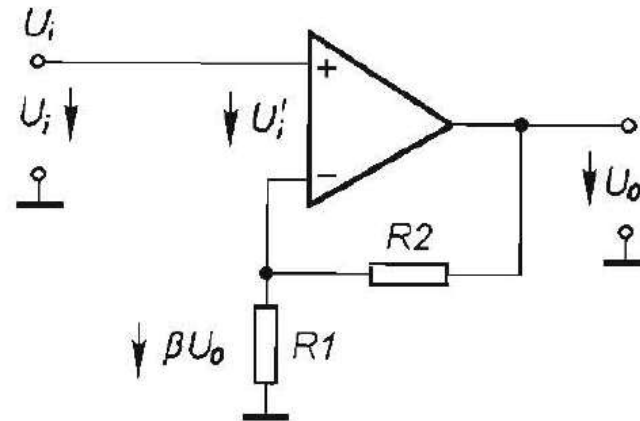
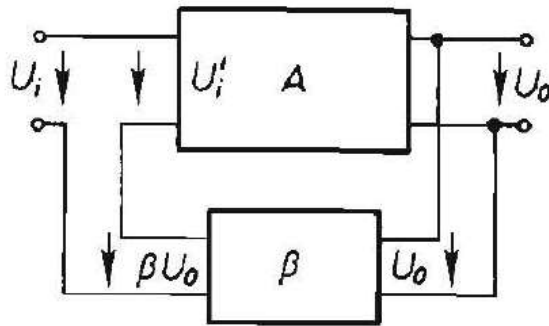
Obecný zesilovač jako čtyřpól

Výstupní napětí U_o je určeno vztahem

$$U_o = AU_i,$$



Základy operačních zesilovačů



Zesilovač se zavedenou zpětnou vazbou

sériově–paralelní zpětná vazba

Pak na vstupu zesilovače nebude napětí U_i , ale napětí

$$U'_i = U_i - \beta U_o$$

kde β je činitel zpětné vazby, tedy přenos zpětnovazebního členu

$$U_o = AU'_i = A(U_i - \beta U_o) \quad U_o = \frac{A}{1 + A\beta} U_i$$

Pokud je výraz $1+\beta A$ větší než 1 $\longrightarrow$ záporná zpětná vazba

$1+\beta A$ menší než 1 $\longrightarrow$ kladná zpětná vazba

Blíží-li se výraz $1+\beta A$ k nule $\longrightarrow$ zesilovač se rozkmitá

uvažujme zesilovač se zápornou zpětnou vazbou

$$U_o = \frac{A}{1 + A\beta} U_i = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} U_i$$

pro nekonečné zesílení A

$$U'_o = +\frac{1}{\beta} U_i \quad \begin{array}{l} \text{vlastnosti zesilovače určeny výhradně} \\ \text{zpětnou vazbou} \end{array}$$

ideální operační zesilovač $A = \infty$

Reálné operační zesilovače mají zesílení $A_d \approx 80 \text{ dB}$

reálné přesné operační zesilovače $A_d > 120 \text{ dB}$

spočítejme poměr zesílení mezi

ideálním (U'_o) a reálným (U_o) operačním zesilovačem

$$\frac{U'_o}{U_o} = \frac{1 + \frac{1}{\beta}}{\frac{A}{1 + A\beta}} = \frac{A\beta + 1}{A\beta} = 1 + \frac{1}{A\beta}, \text{ tedy } U_o = \frac{U'_o}{1 + 1/(\beta A)}$$

platí $1/(\beta A) > 0$ (záporná zpětná vazba) $\longrightarrow$

$\longrightarrow$ zesílení s reálným operačním zesilovačem a je vždy menší než s ideálním operačním zesilovačem

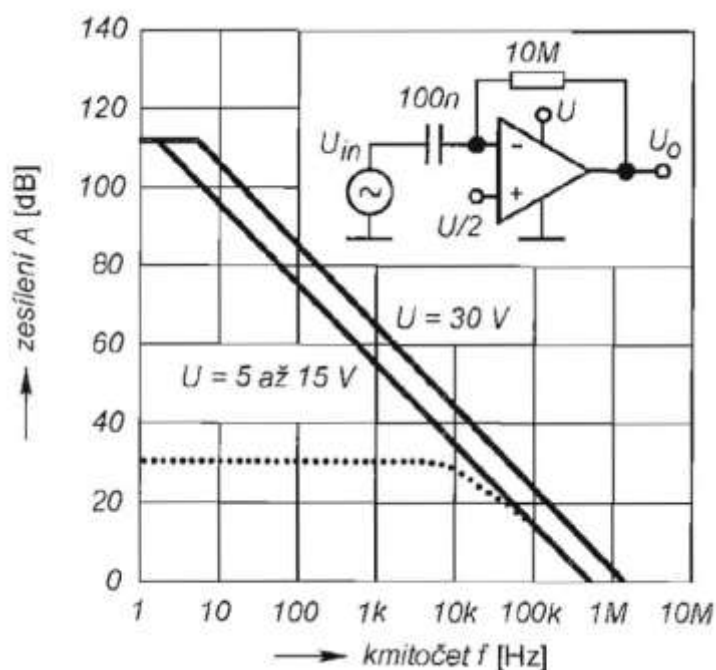
Uvažujme chybu ε

$$\varepsilon = \frac{1}{A\beta}$$

Zesílení skutečného obvodu spočítáme

$$A_{zv} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U'_o}{U_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta A}} = \frac{A'_{zv}}{1 + \varepsilon} \approx A'_{zv}(1 - \varepsilon)$$

kde $A'_{zv} = U'_o / U_i$ je zesílení s ideálním zesilovačem.



Pro vyšší frekvence volíme β velké, tedy malé celkové zesílení, protože A_d vlastního zesilovače pro vyšší frekvence klesá.

Kmitočtová závislost zesílení operačního zesilovače LM324 bez zpětné vazby (plná čára) a se zpětnou vazbou (tečkovaná čára)

Frekvenční charakteristika OZ operačního zesilovače

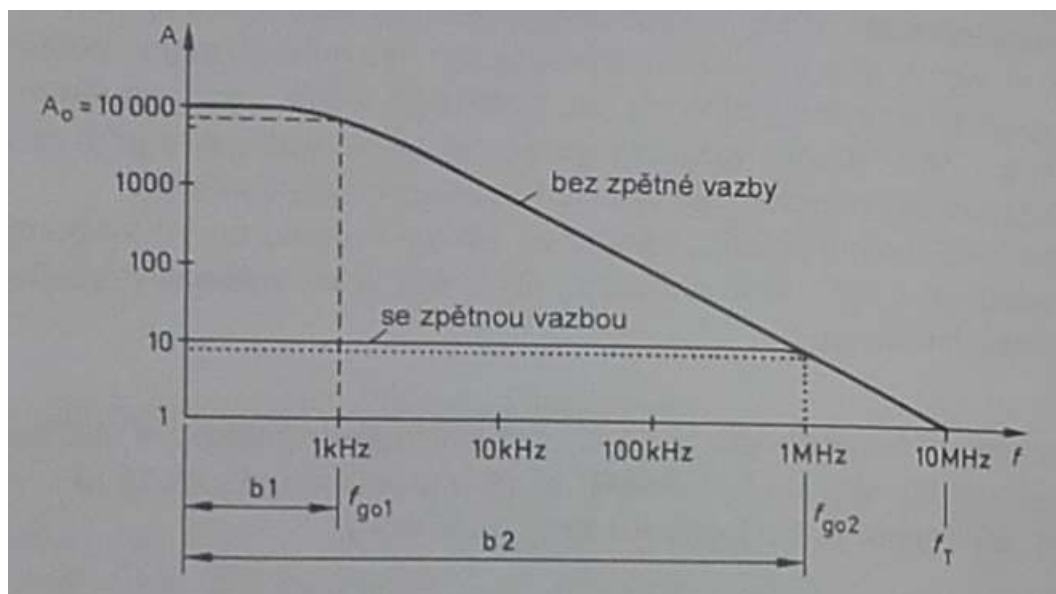
Operační zesilovače pracují od stejnosměrných napětí až do různě vysokých frekvencí na závislost frekvenčního přenosu celého zesilovače má velký vliv nastavená záporná zpětná vazba

f_T - tranzitní frekvence, pro f_T platí $A_0 = 1$

f_h - horní mezní frekvence $\rightarrow A$ klesne max o 3 dB

A - zisk celého zesilovače ze zápornou zpětnou vazbou

$$A f_h = f_T = \text{konst}$$



A_0 – zisk OZ bez zpětné vazby

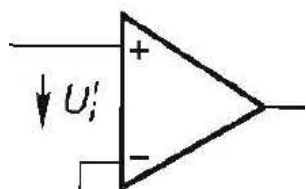
A nastaveno na $A=10$

$f_h = f_T / 10 = 10 \text{ MHz} / 10 = 1 \text{ MHz}$

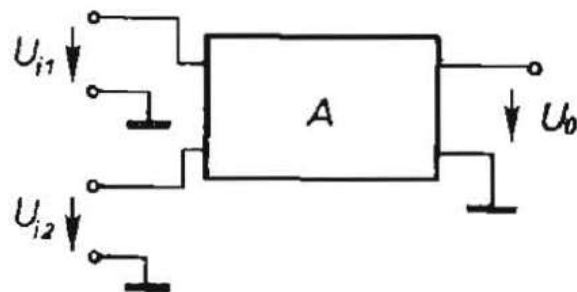
Pokud bude výstupní odpor OZ malý, lze vliv zátěže zcela zanedbat.

Proto budeme požadovat, aby **operační zesilovač měl co nejmenší výstupní odpor**.

Další podmínka tedy je, aby **vstupní impedance operačního zesilovače byla co největší, nejlépe nekonečná**.



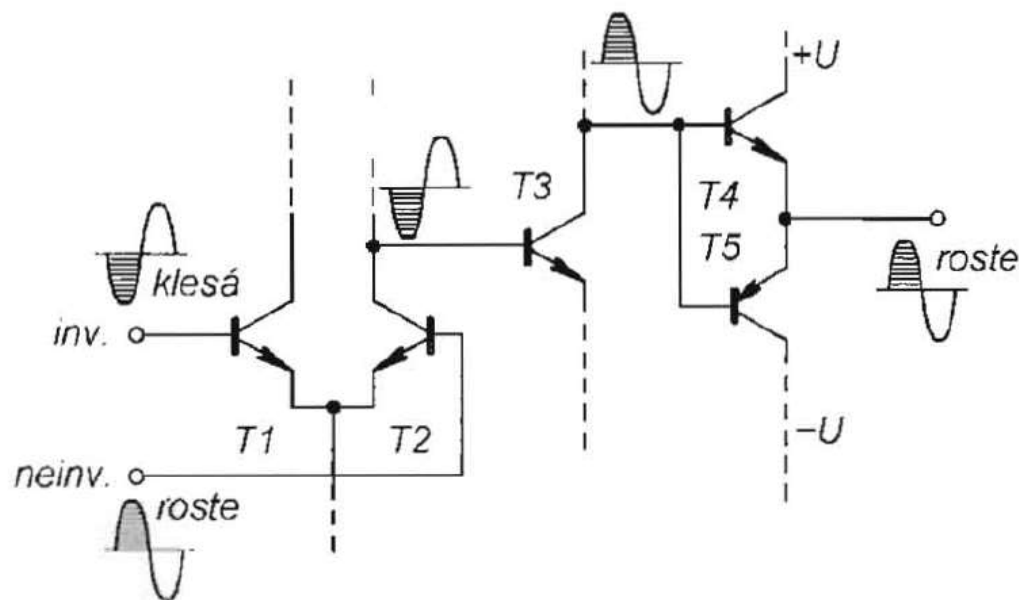
operační zesilovač



Diferenční zesilovač

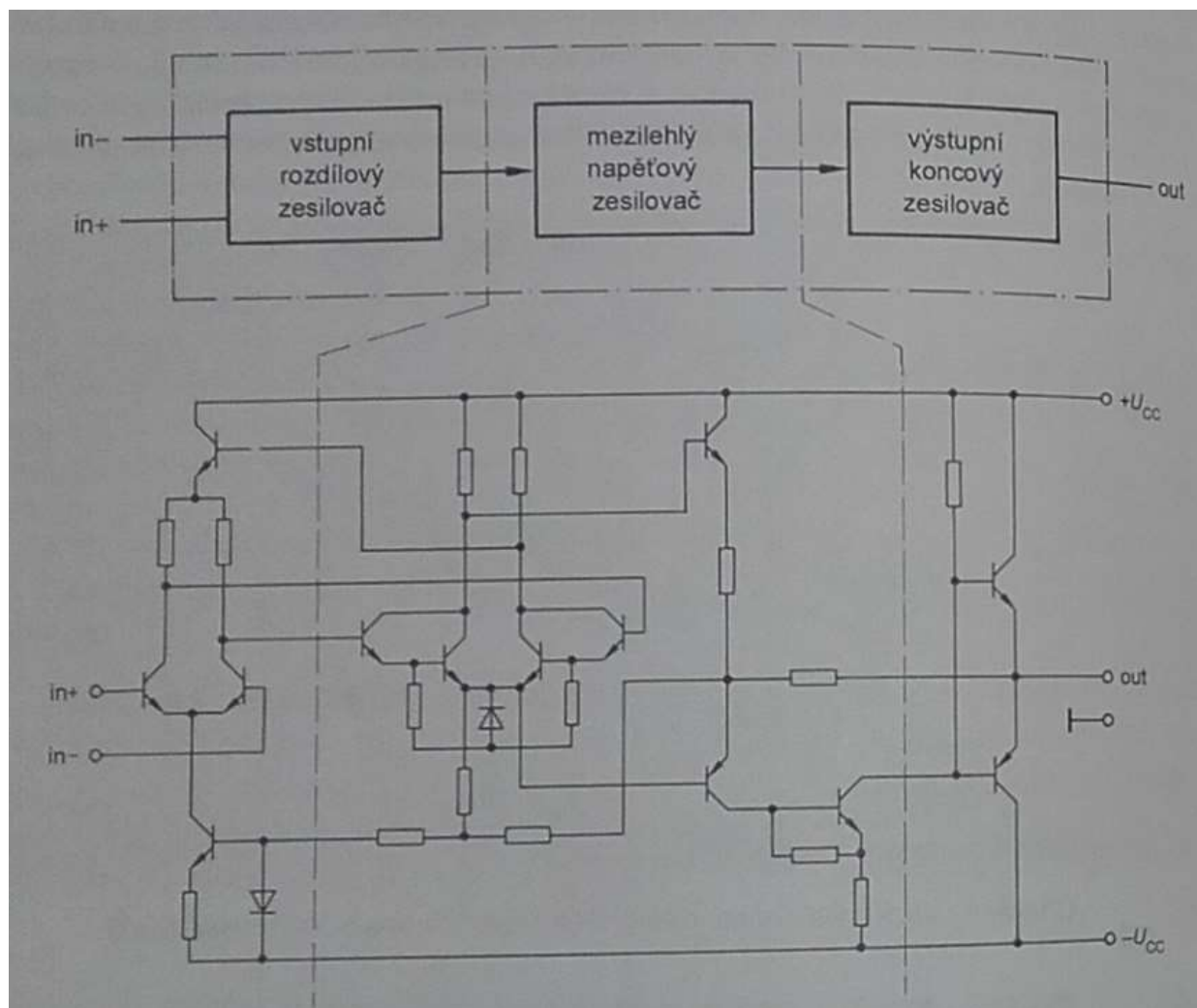
Výstupní napětí ideálního diferenčního zesilovače je závislé pouze na rozdílu napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. U reálných OZ však nikdy nelze zcela vyloučit i vliv potenciálu vstupů proti zemi. **Potlačení součtového signálu se zpravidla označuje CMR (Common Mode Rejection)** a vyjadřuje v [dB]. Běžné OZ mají CMR 90 dB, kvalitnější až 120 dB.

Zjednodušené zapojení operačního zesilovače



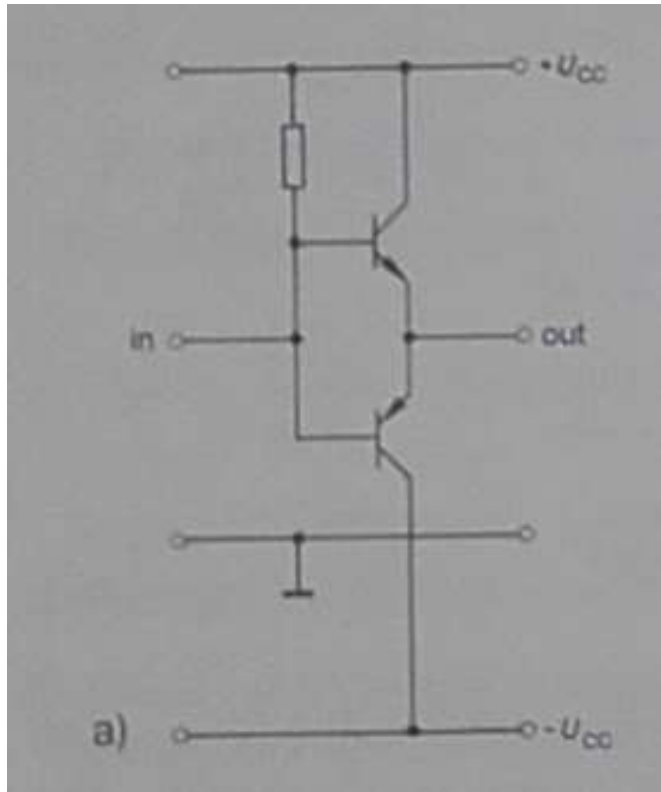
V každém OZ lze rozlišit tři hlavní části: diferenční zesilovač (zde naznačený tranzistory T1 a T2), napěťový zesilovač ve kterém je soustředěna většina zesílení (T3) a výstupní zesilovač zajišťující malý výstupní odpor OZ (T4 a T5).

Vnitřní struktura obyčejného OZ typu 709

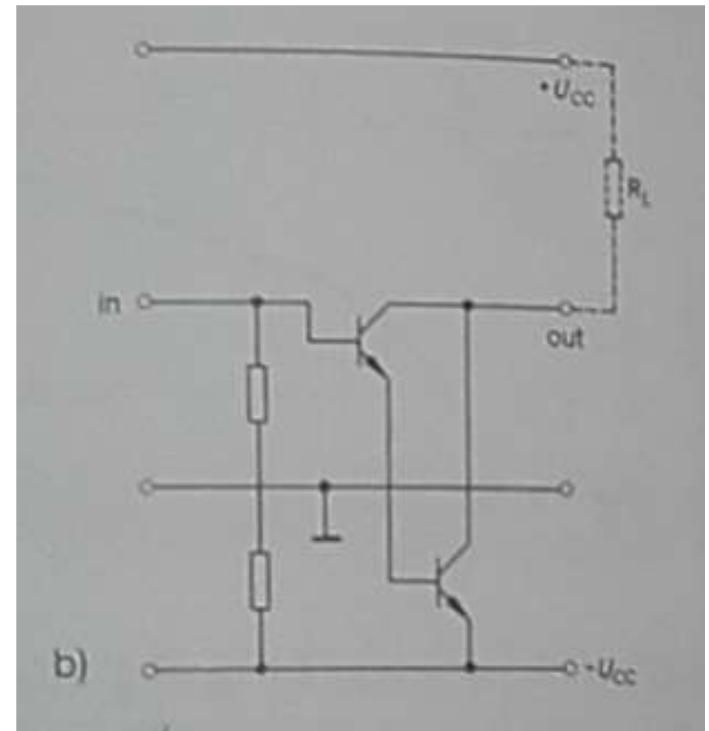


Koncové stupně běžných operačních zesilovačů

a) Symetrické zapojení výstupního stupně
OZ, výstupní odpor $R_{out} \approx 30-100 \Omega$,
výstupní max proud $I_{max} \approx 10-25 \text{ mA}$

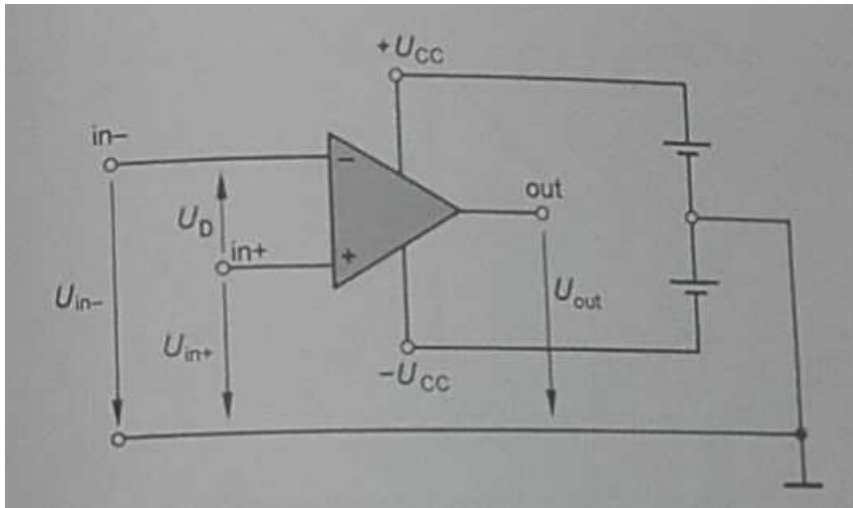


b) jednočinný stupeň s otevřeným
Kolektorem, vnější odpor
 R_L může být zátěž, výstupní
max proud $I_{max} \approx 70 \text{ mA}$

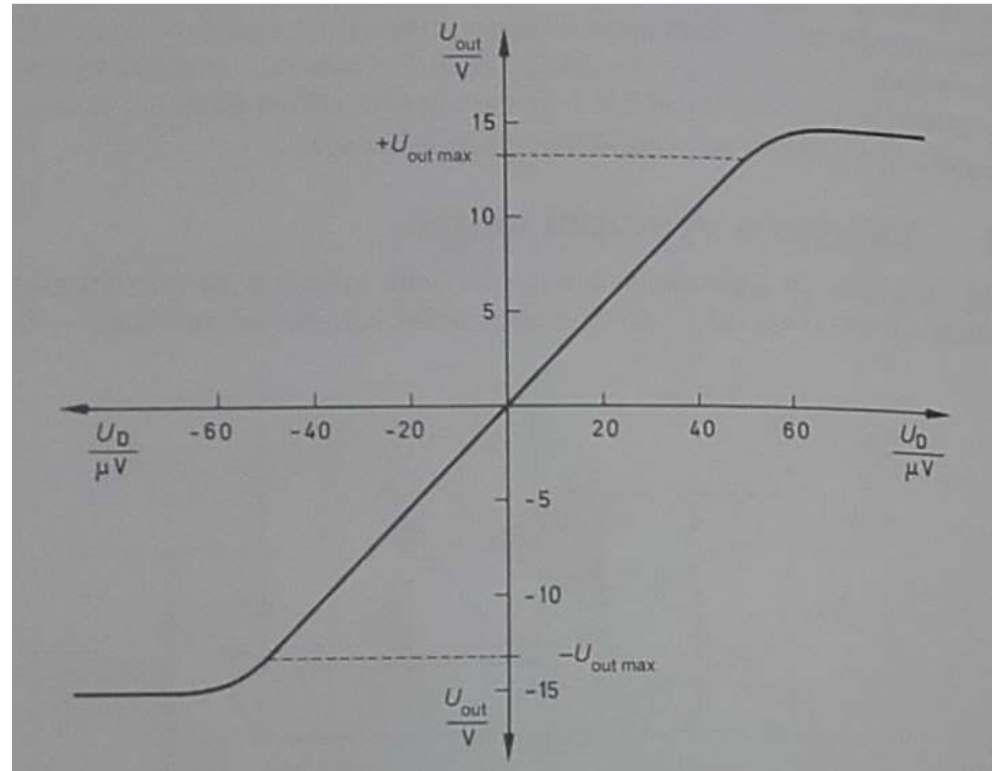


Převodní charakteristika ideálního operačního zesilovače

napětí na operačním zesilovači (diferenční zesílení
OZ A_0)



$$U_d = U_{in+} - U_{in-}$$
$$U_{out} = A_0 U_d$$



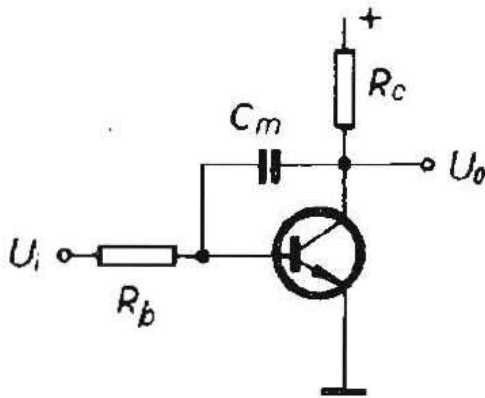
Kmitočtová kompenzace operačního zesilovače

Pokud např. používáme silnou zápornou zpětnou vazbu tj velké $|\beta|$ může platit:

$|A\beta| > 1$, pak se může stát, že od určité frekvence se fázový posuv přenosu operačního zesilovače A změní o 180° oproti nízkým frekvencím.

Pokud toto nastane, zpětná vazba se změní na kladnou a zesilovač se rozkmitá. Musíme zajistit, že $|A\beta| < 1$ pro tyto frekvence.

To zajišťujeme pomocí frekvenční kompenzace, což představuje vhodné snížení A pro tyto frekvence. Většinou připojujeme k operačnímu zesilovači vhodnou kapacitu, když se používá vnější frekvenční kompenzace.



Kapacita C_m snižuje zesílení pro vyšší frekvence. Pro frekvenční kompenzaci se C_m uměle zvyšuje. Platí, že pro silnější zápornou zpětnou vazbu a tedy větší $|\beta|$, musí být C_m větší.

Zjednodušené zapojení jednoho stupně operačního zesilovače

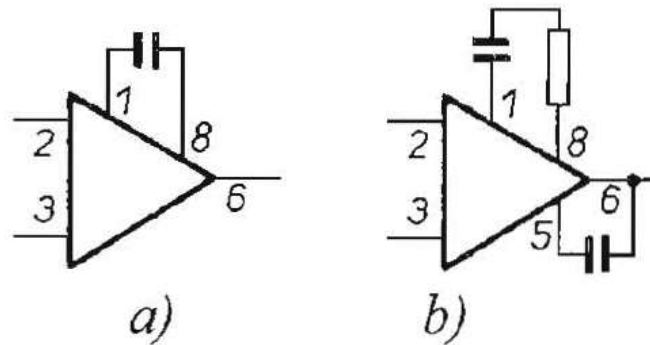
Kmitočtová kompenzace operačního zesilovače

a) příklady kmitočtové kompenzace operačního zesilovače:

OZ typu **748**, **CA3130**, **LM308**

b) příklady kmitočtové kompenzace operačního zesilovače:

MAA501 až **MAA504** (**μA709**)



- připojená externí kapacita je kompenzační kapacita C

- pro některé typy OZ je provedena vnitřní úplná kmitočtová kompenzace
např. typ 741

Kmitočtová kompenzace operačního zesilovače

Operační zesilovač s úplnou vnitřní kompenzací

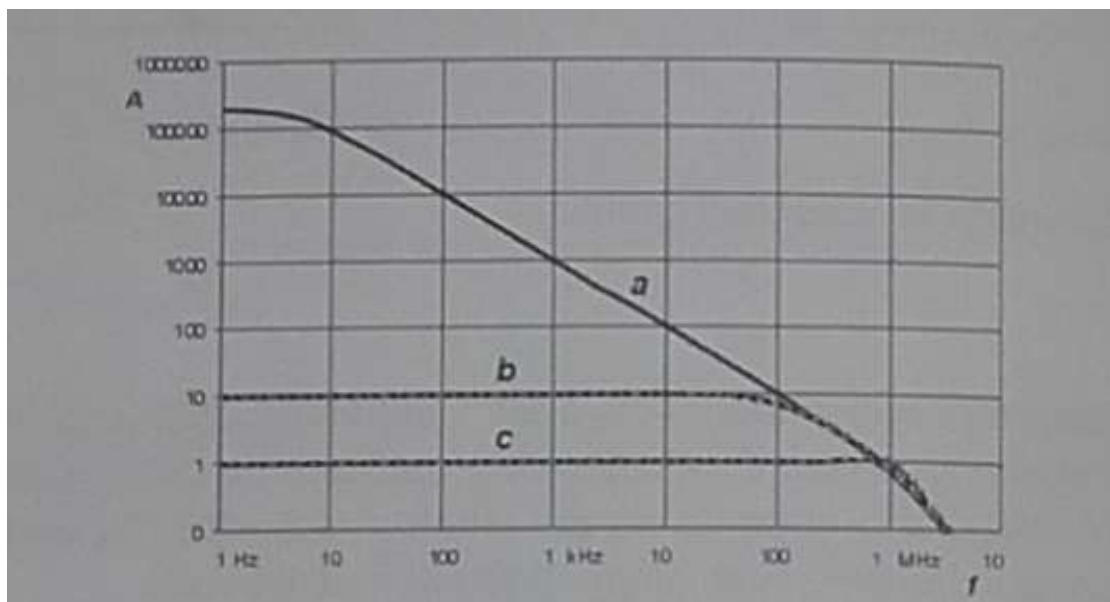
např. typ 741 (stabilní pro libovolně silnou zpětnou vazbu tj. $|A\beta| < 1$ pro všechny frekvence

bez zpětné vazby platí průběh a)

průběh b) zesílení se zpětnou vazbou je $A_b=10$ a mezní frekvence $f_{hb} = 100$ kHz

průběh c) zesílení se zpětnou vazbou je $A_c=1$ a mezní frekvence $f_{hc} = 1$ MHz

pro zesilovač s úplnou vnitřní kompenzací platí: $A_b f_{hb} = A_c f_{hc} = \text{konst.}$

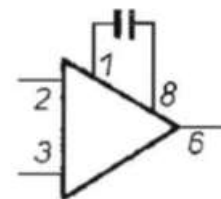
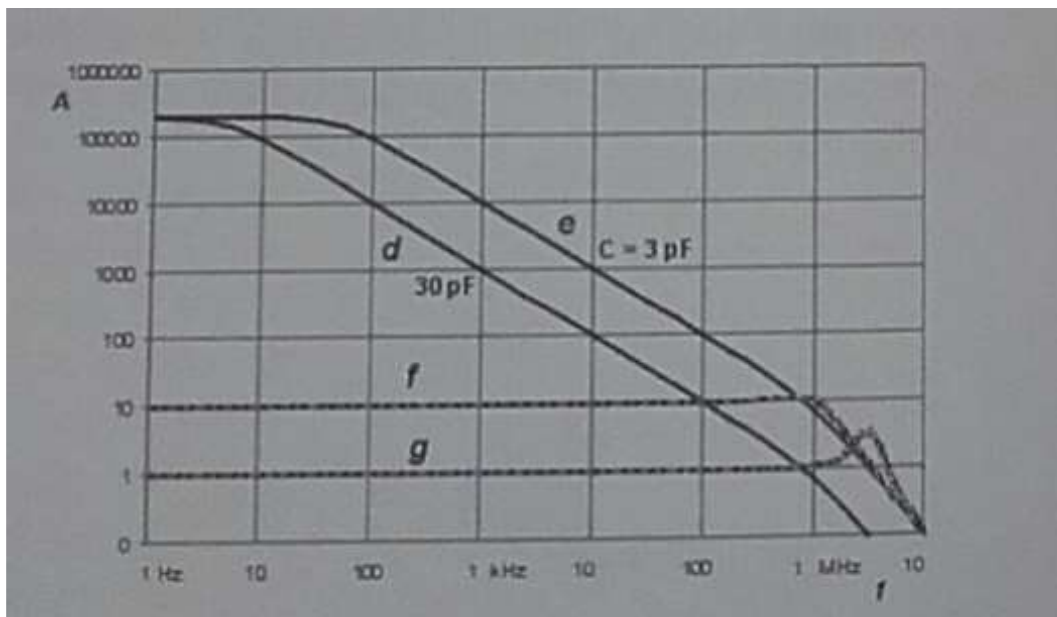


Operační zesilovač s vnější frekvenční kompenzací

např. typ 748

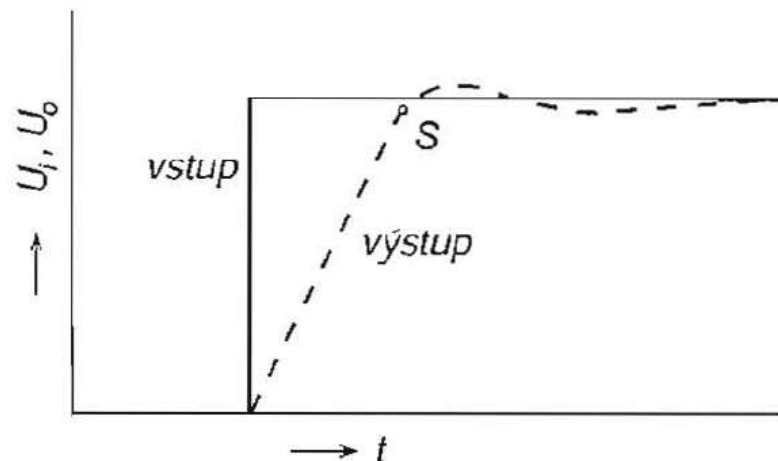
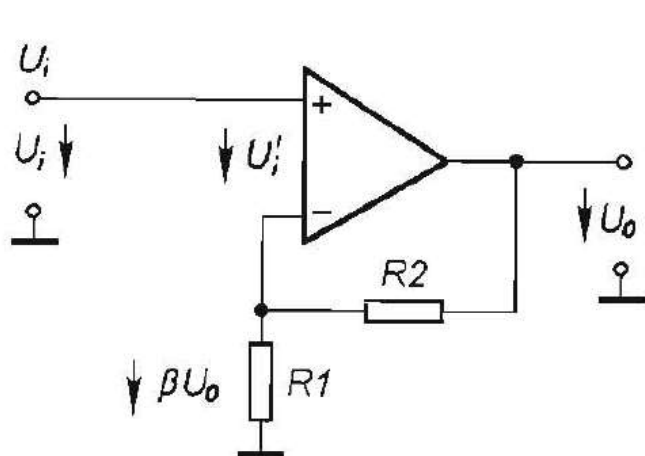
Když použijeme pro kompenzaci kompenzační kapacitu $C = 30 \text{ pF}$ viz d) dostaneme úplnou frekvenční kompenzaci pro libovolnou velikost zpětné vazby $|\beta|$, pak je pro nastavené zesílení $A=10$ šířka pásma do 100 kHz.

Když použijeme pro kompenzaci $C=3 \text{ pF}$ viz e) OZ pracuje do vyšších frekvencí a má pro nastavené zesílení $A=10$ šířku pásma 1 MHz. Ale při nastavení zesílení $A=1$ může být zesilovač nestabilní. Tato frekvenční kompenzace funguje jen pro vyšší zesílení.



OZ typ 748

Rychlost přeběhu operačního zesilovače



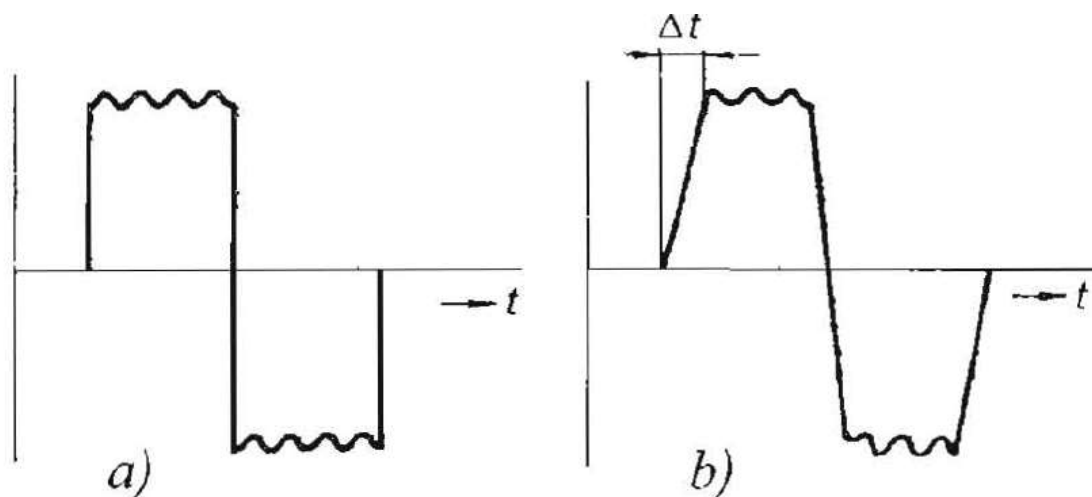
*Odezva operačního zesilovače
na skokovou změnu vstupního napětí*

Průběh výstupního napětí není exponenciální jako pro nabíjení kondenzátoru přes rezistor, ale je možné jej až do bodu S nahradit přímkou vstupní obvody operačního zesilovače jsou přebuzeny stupeň s kompenzační kapacitou je buzen z předchozího (do limitace vybuzeného) stupně.

Kompenzační kondenzátor se nabíjí lineárně a relativně pomalu konečným proudem a stejně pomalu se mění i napětí na výstupu tohoto stupně.

Rychlost přeběhu operačního zesilovače

Rychlost, s jakou se mění výstupní napětí od skokové změny vstupního napětí až do oblasti bodu S , se nazývá rychlost přeběhu (**SR**) a je to největší rychlost změny výstupního napětí, kterou je daný operační zesilovač schopen vyvinout. Rychlost přeběhu se udává ve $[V/\mu s]$. Běžné univerzální operační zesilovače mají rychlost přeběhu 0,5 až 5 $V/\mu s$, „rychlé“ 10 až 20 $V/\mu s$, speciální typy i více než 100 $V/\mu s$. Naopak typy označované „Low Power“ (s malou spotřebou) mají rychlost přeběhu často jen několik desetin či setin $V/\mu s$, protože proudy pro nabíjení kapacit jsou velmi malé.



Rychlost přeběhu také omezuje použití operačních zesilovačů na vyšších kmitočtech. Například běžný OZ typu **741** může, nevadí-li nám malé zesílení, pracovat s malými signály až do kmitočtu několika desítek kHz. Pokud se však amplituda výstupního signálu blíží maximálnímu rozkmitu, omezenému napájecím napětím (u typu **741** asi ± 13 V při napájení ± 15 V), je nejvyšší zpracovávaný kmitočet asi 8 kHz.

Literatura:

P. Neumann, J. Uhlíř, Elektronické obvody a funkční bloky 1, skriptum ČVUT (2005)

J. Belza, Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky, BEN, 2004.

P. Neumann, J. Uhlíř, Elektronické obvody a funkční bloky 2 skriptum ČVUT (2005)

J. Punčochář, Operační zesilovače v elektronice, BEN Technická literatura Praha (2002).

P. Horowitz, W. Hill, The art of Electronics, Third edition, Cambridge University Press, 1980, 1989, 2015.

Donald A. Neamen, Microelectronics Circuit Analysis and Design, Published by McGraw-Hill (2010).