

Fakulta biomedicínského inženýrství

Elektronické obvody

2019

prof. Ing. Jan Uhlíř, CSc.

# Obsah předmětu Elektronické obvody

1. Zesilovače analogových signálů
2. Napájení elektronických systémů
3. Nelineární a regenerativní obvody
4. Elektronické logické členy
5. Obvody pro číslicové zpracování signálů

# 1. Zesilovače analogových signálů

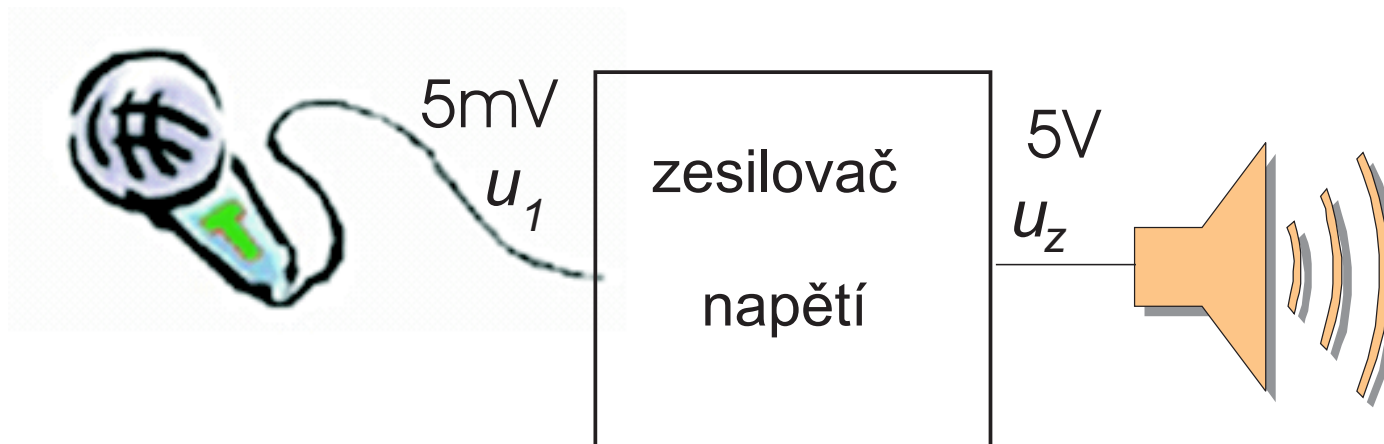
Model zesilovače

Zpětná vazba v elektronických obvodech - záporná zpětná vazba

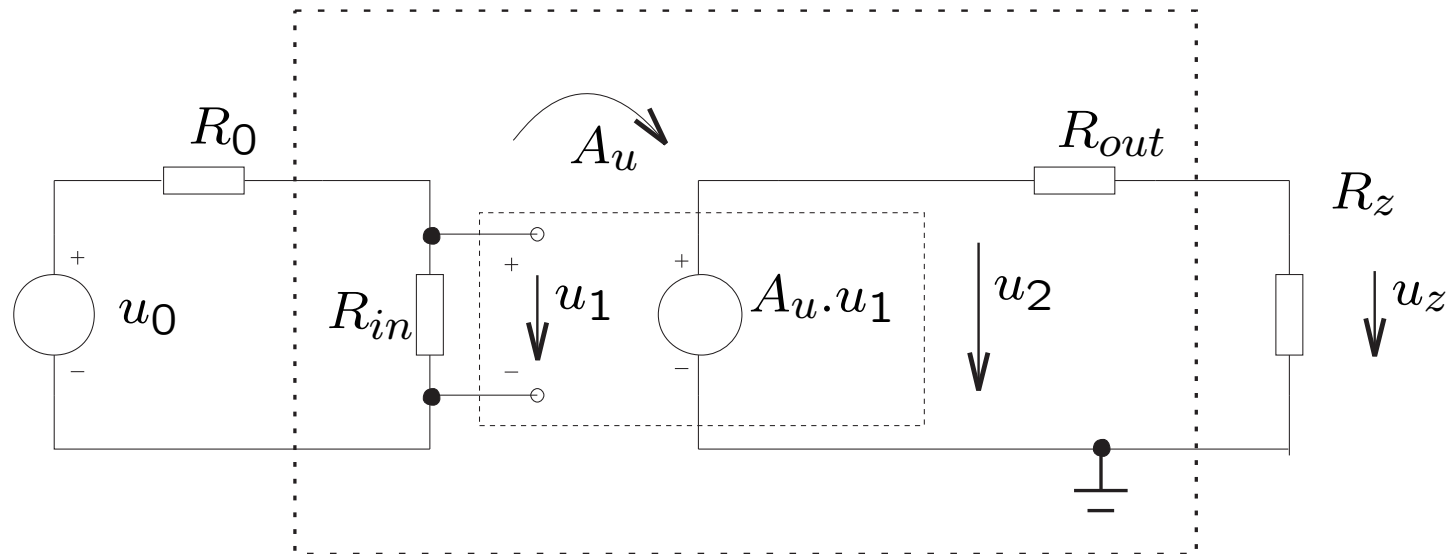
Ideální operační zesilovač - základní zapojení

Reálný operační zesilovač - parametry integrovaných OZ a jejich význam

## Zesilovač pro ozvučení sálu



## Zesilovač napětí – model a parametry



1. vstupní odpor  $R_{in}$ ,
  2. výstupní odpor  $R_{out}$ ,
  3. napěťové zesílení  $A_u$ , ideální zdroj napětí řízený napětím
- Zdroj signálu (mikrofon): vnitřní odpor  $R_0$ , napětí naprázdno  $u_0$ .  
Výstupní napětí  $u_z$  je na zatěžovacím odporu  $R_z$  (reproduktor).

$$u_z = u_0 \frac{R_{in}}{R_{in} + R_0} A_u \frac{R_z}{R_{out} + R_z}$$

## Souhrn vlastností zesilovače

1. Zesílení
  - a. napětí  $u_2/u_1$  [dB]
  - b. proudu  $i_2/i_1$  [dB]
  - c. výkonu  $P_2/P_1$  [dB]
2. Vstupní odpor [ $\Omega$ ]
3. Výstupní odpor [ $\Omega$ ]
4. Účinnost  $P_2/P_{zdroje}$  [%]
5. Frekvenční vlastnosti
  - a. dolní/horní mezní kmitočety – širokopásmový zesilovač
  - b. stejnosměrný zesilovač
  - c. selektivní zesilovač
6. Impulsní vlastnosti
7. Nelineární zkreslení
8. Stabilita

## 9. Obvodové řešení

a. vazební obvody

b. aktivní prvky

\* tranzistory

\* MOSFETy

\* spínače

c. třídy zesilovačů

\* třída A

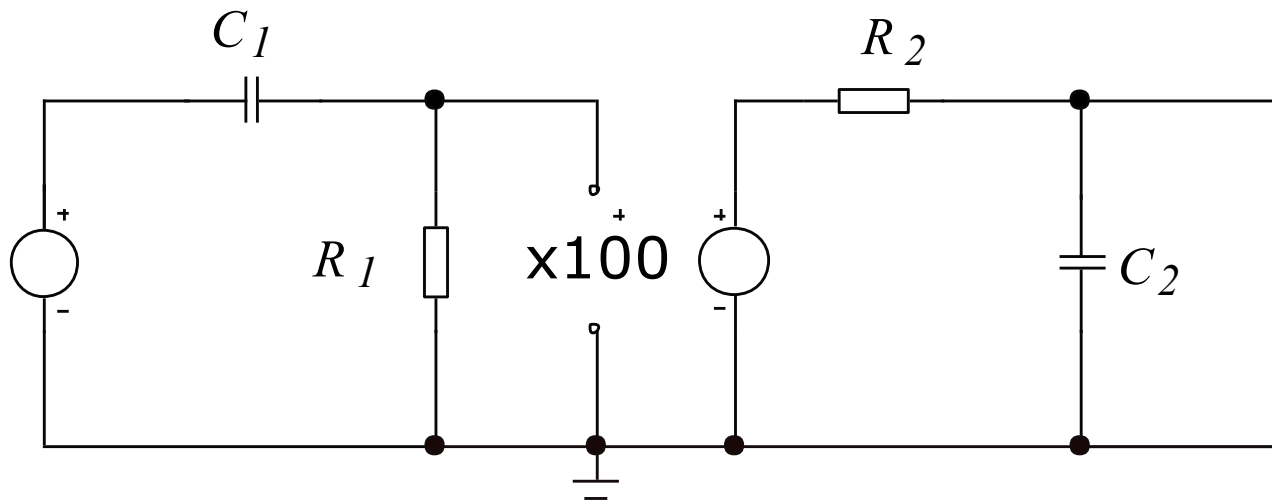
\* třída AB

\* třída B

\* třída C

\* třída D

Model pro popis omezení přenosu v oblasti vysokých a nízkých kmitočtů

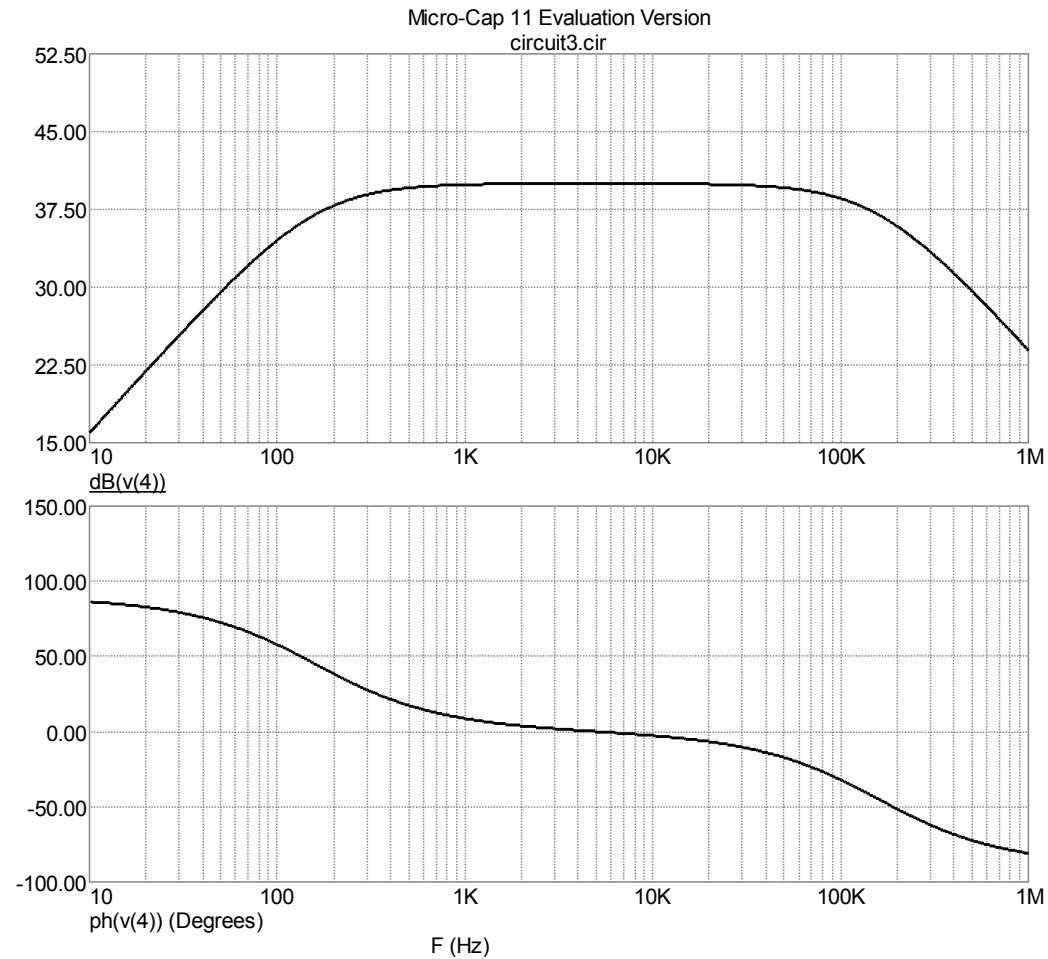


$$f_d = 1/(2\pi R_1 C_1), R_1 = 1\text{M}\Omega, C_1 = 1\text{nF}, f_d = 159\text{Hz}$$

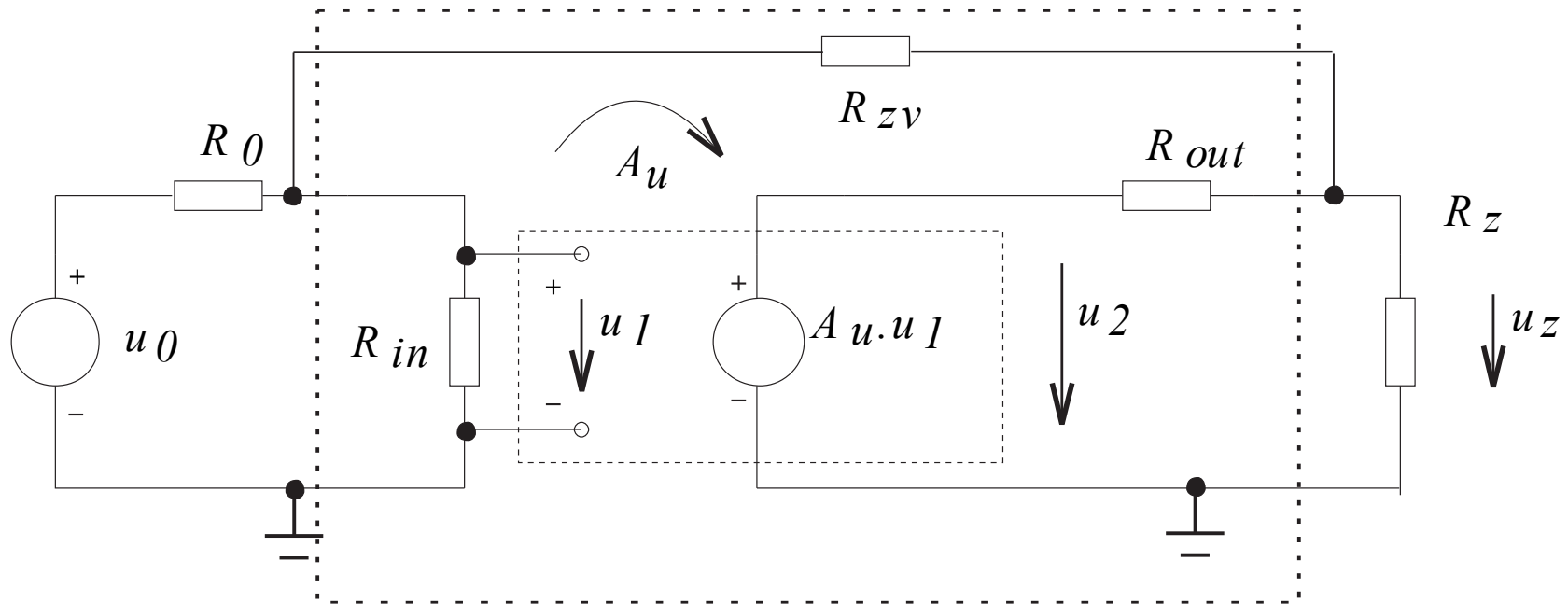
$$f_h = 1/(2\pi R_2 C_2), R_2 = 100\Omega, C_2 = 10\text{nF}, f_d = 159\text{kHz}$$



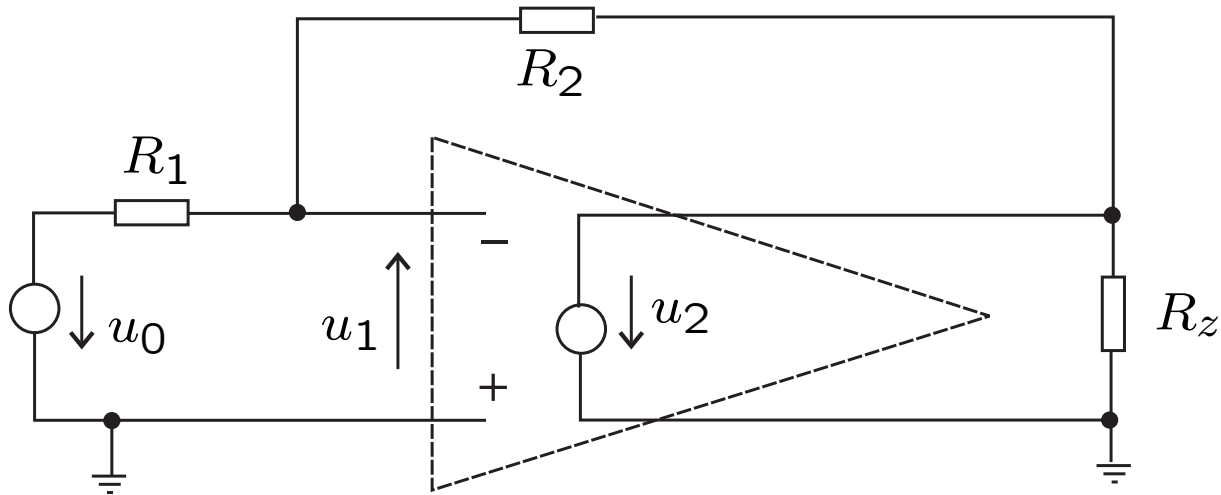
## Omezení přenosu v oblasti vysokých a nízkých kmitočtů



# Zesilovač napětí se zpětnou vazbou



Zpětná vazba – zjednodušený zesilovač ( $R_{in} \rightarrow \infty$ ,  $R_{out} \rightarrow 0$ ,  $u_z \rightarrow u_2$ )

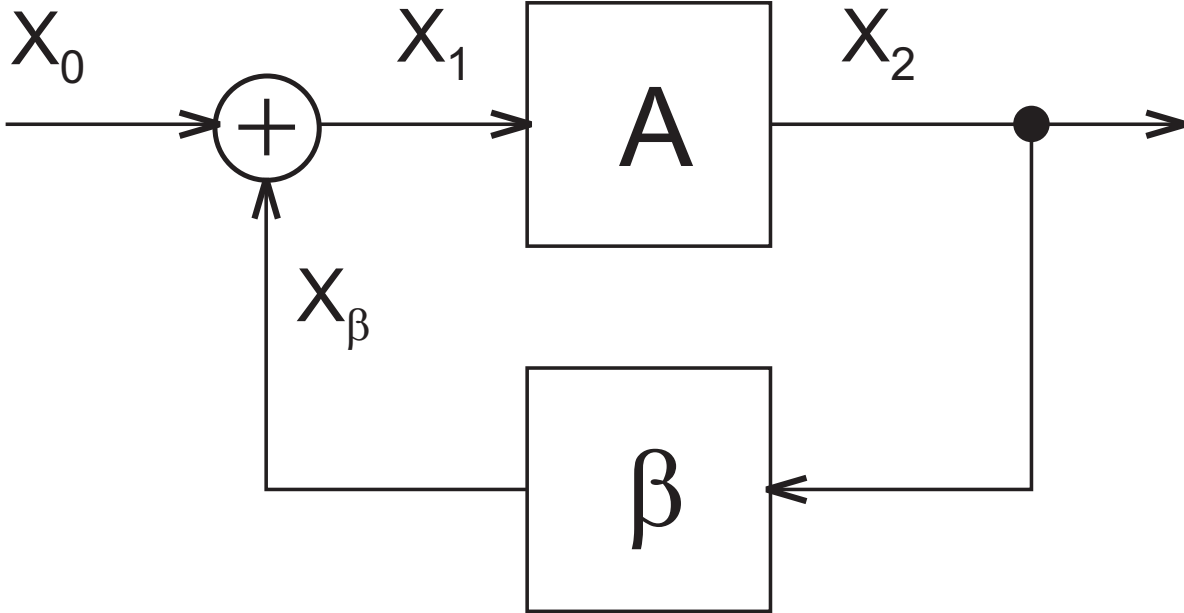


$$u_1 = \frac{u_2}{A_u} = -u_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} - u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \implies u_2 = u_0 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \frac{-A_u}{(1 + A_u \frac{R_1}{R_1 + R_2})},$$

když

$$A_u \rightarrow \infty, \quad u_1 \rightarrow 0, \quad u_2 \rightarrow \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)u_0.$$

Zpěťovazební soustava



$$\beta = \frac{X_\beta}{X_2}$$

$$A = \frac{X_2}{X_1}$$

$$X_1 = X_0 + X_\beta$$

$$A' = \frac{X_2}{X_0} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

Kde všechna  $X$ ,  $A$  a  $\beta$  jsou reálná čísla (SUS), komplexní funkce  $\omega$  (HUS), nebo Laplaceovy obrazy (LT).

Zpětná vazba kladná podkritická

$$0 < \beta A < 1$$

Mez stability, vazba kladná kritická

$$\beta A = 1$$

Kladná nadkritická – nestabilní obvod se zpětnou vazbou

$$\beta A > 1$$

Záporná zpětná vazba

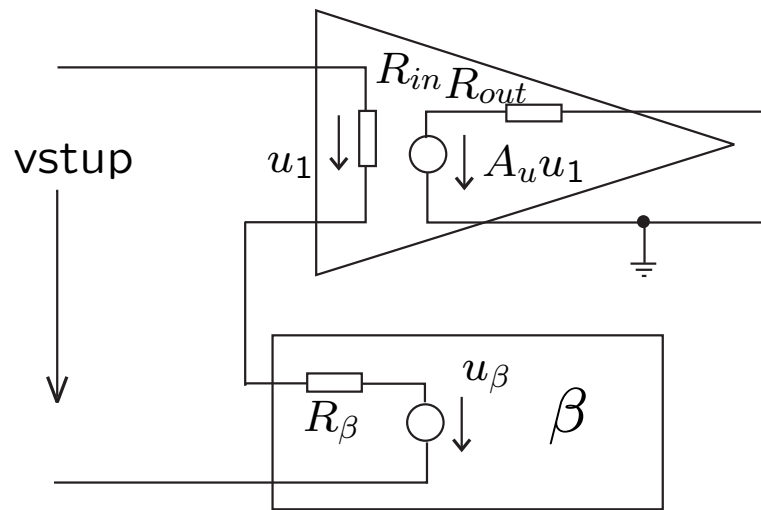
$$\beta A < 0$$

Přímá větev **A** je v elektronických obvodech tvořena zesilovačem, často zesilovačem napětí.

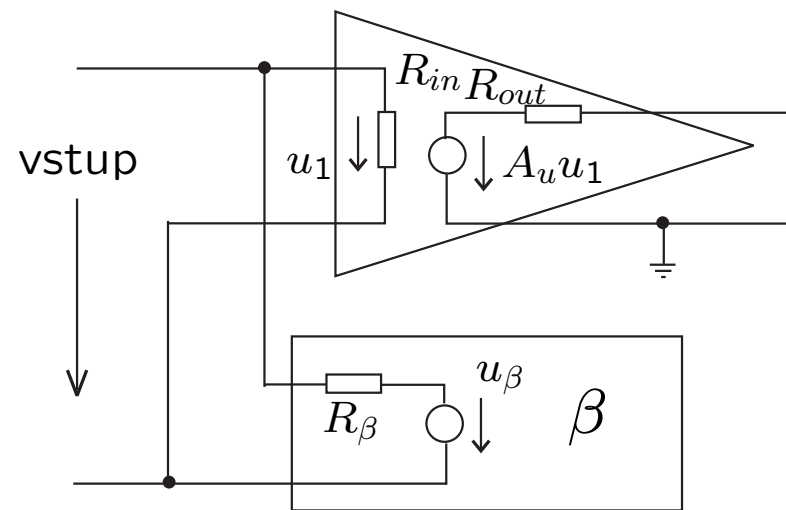
Zpětnovazební větev  $\beta$  je obvykle tvořena pasivním obvodem. Ve většině výpočtů lze zanedbat přenos vstupního signálu ze slučovacího bodu na výstup soustavy přes zpětnovazební větev (dominuje přenos přímou větví).

Signál vedený z výstupu zesilovače do slučovacího bodu lze popsat jako signál ze zdroje napětí s určitým vnitřním odporem. Výstup zpětnovazební větve může být připojen ve slučovacím bodu ke vstupu zesilovače paralelně nebo v sérii.

## Možnosti uspořádání slučovacího bodu zpětnovazebního obvodu



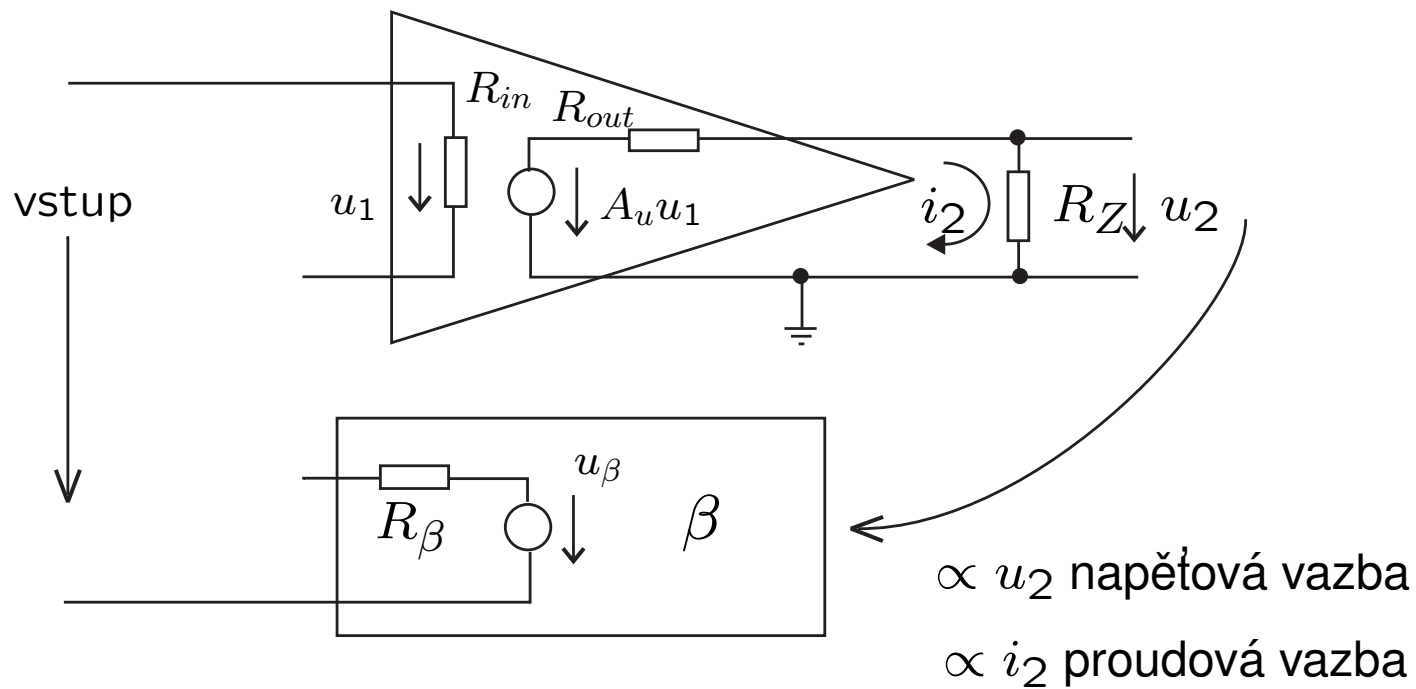
sériová vazba



paralelní vazba



Vstupní signál zpětnovazebního obvodu může být odvozen z výstupního napětí zesilovače nebo z jeho výstupního proudu – zpětná vazba napěťová, nebo proudová:



## 2. IDEÁLNÍ OPERAČNÍ ZESILOVAČ

## Idealizace zesilovače – IDEÁLNÍ OPERAČNÍ ZESILOVAČ

$$A_u \rightarrow \infty$$

$$-\beta A_u \rightarrow \infty$$

$$A' \approx -1/\beta$$

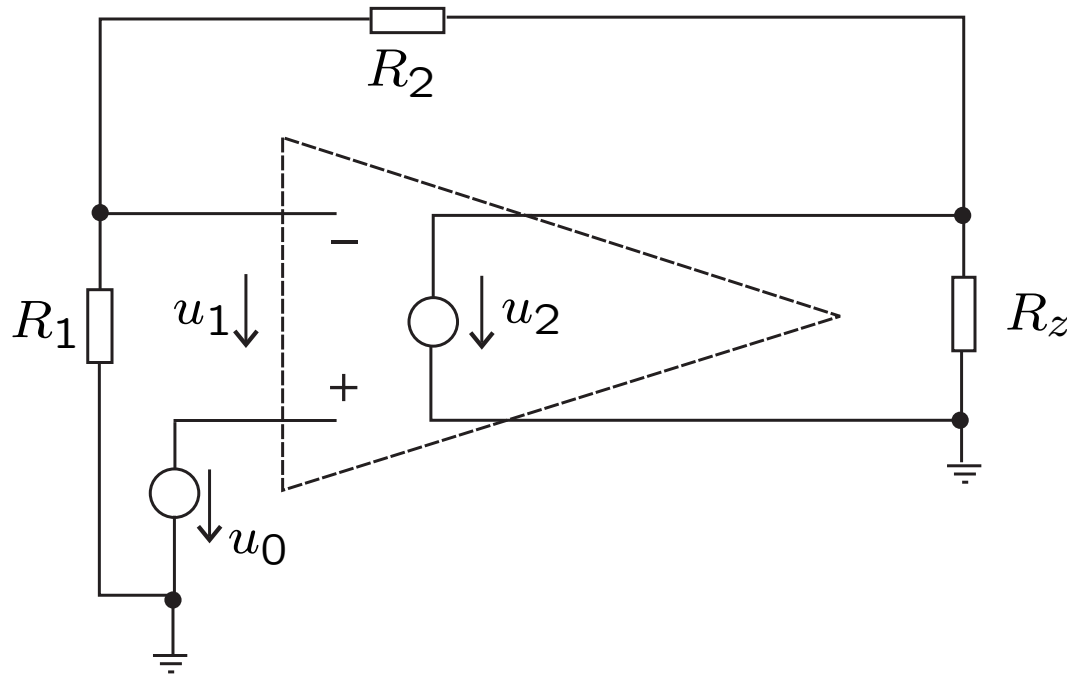
pokud je zpětná vazba za všech podmínek záporná, bude

$$u_1 = 0$$

a  $u_2$  bude mít hodnotu právě takovou, že  $u_1 = 0$ .

Ideální operační zesilovač má nulový výstupní odpor a vstupními svorkami při nulovém napětí neprotéká proud.

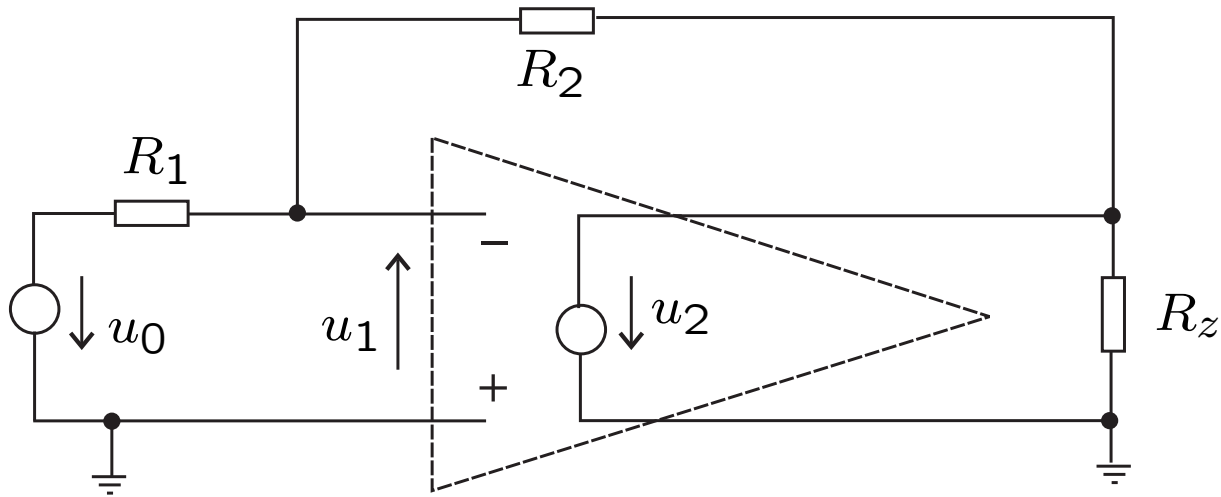
# Zpětná vazba odporová, napěťová, sériová – neinvertující zesilovač napětí



$$u_0 - u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0 \rightarrow u_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_0$$

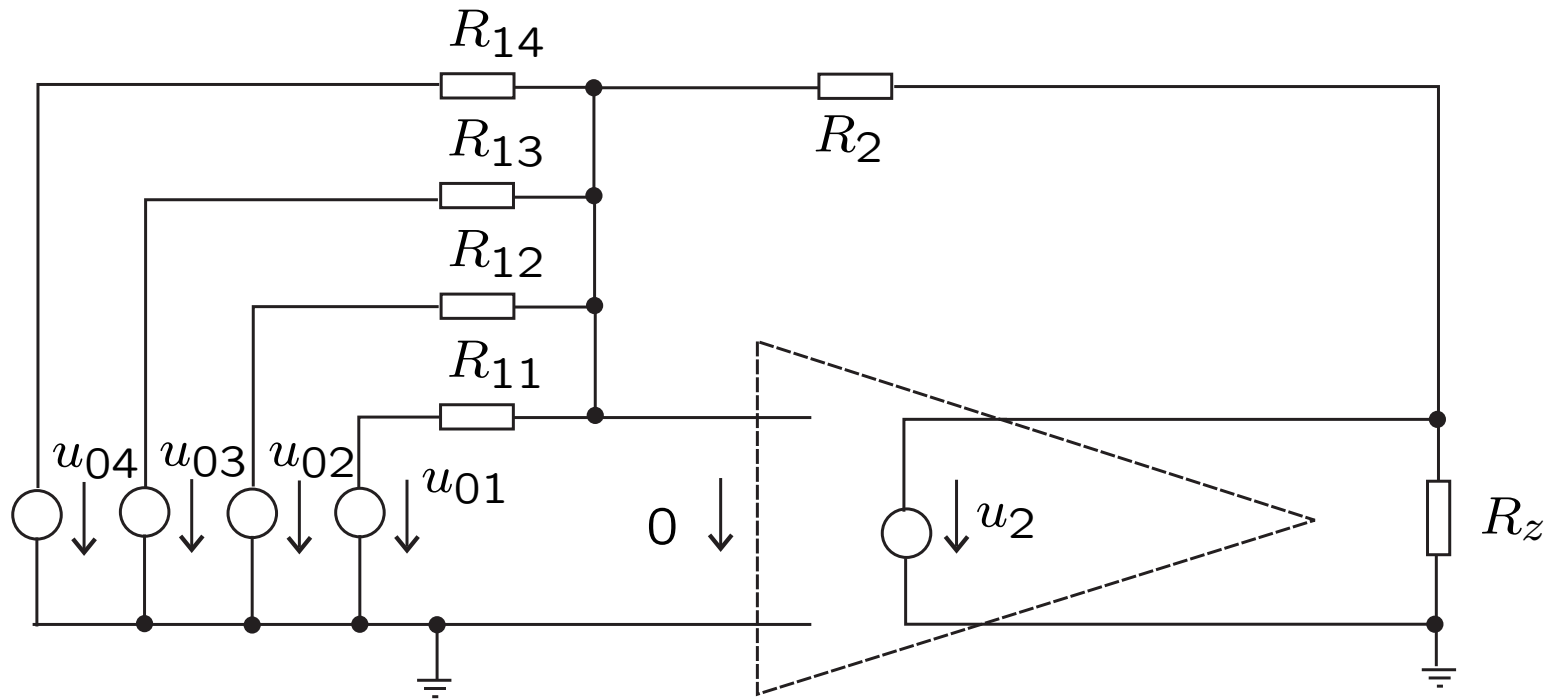
Neinvertující zesilovač s  $R_2 = 0$  nebo  $R_1 = \infty$  se označuje jako napěťový sledovač  $u_2 = u_0$ .

Zpětná vazba odporová, napěťová, paralelní – invertující zesilovač



$$-u_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} - u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0 \rightarrow u_2 = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)u_0$$

## Součet vážených napětí – invertující sumátor (sčítací zesilovač)

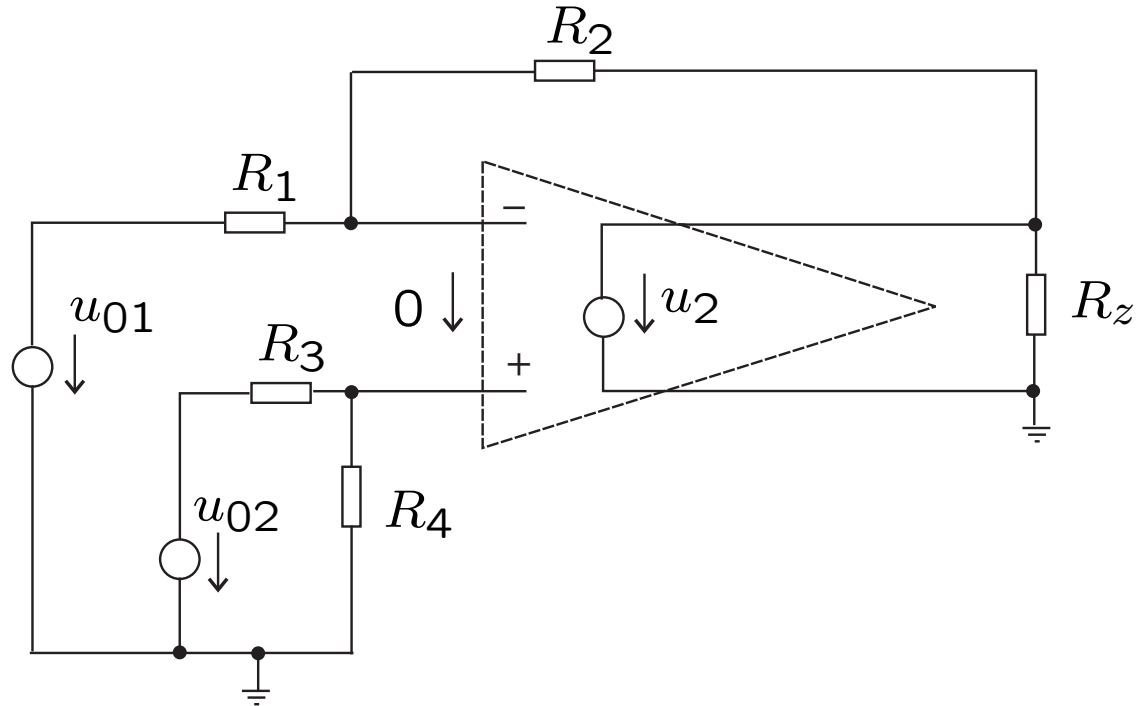


$$\frac{u_{01}}{R_{11}} + \frac{u_{02}}{R_{12}} + \frac{u_{03}}{R_{13}} + \frac{u_{04}}{R_{14}} = -u_2/R_2 \Rightarrow u_2 = - \left( u_{01} \frac{R_2}{R_{11}} + u_{02} \frac{R_2}{R_{12}} + u_{03} \frac{R_2}{R_{13}} + u_{04} \frac{R_2}{R_{14}} \right)$$

pokud

$$R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_1 \Rightarrow u_2 = -\frac{R_2}{R_1}(u_{01} + u_{02} + u_{03} + u_{04})$$

## Vážený rozdíl dvou napětí

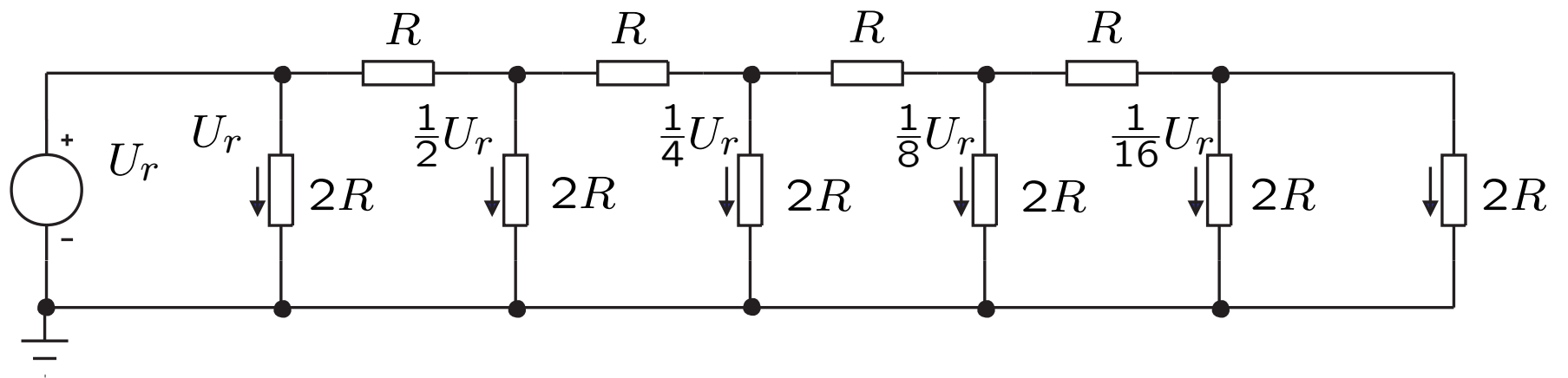


$$u_{02} \frac{R_4}{R_3 + R_4} = u_{01} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow u_2 = u_{02} \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} - u_{01} \frac{R_2}{R_1}$$

nechť  $R_2/R_1 = R_4/R_3$  příp.  $R_4 = R_2$  a  $R_3 = R_1$ , potom

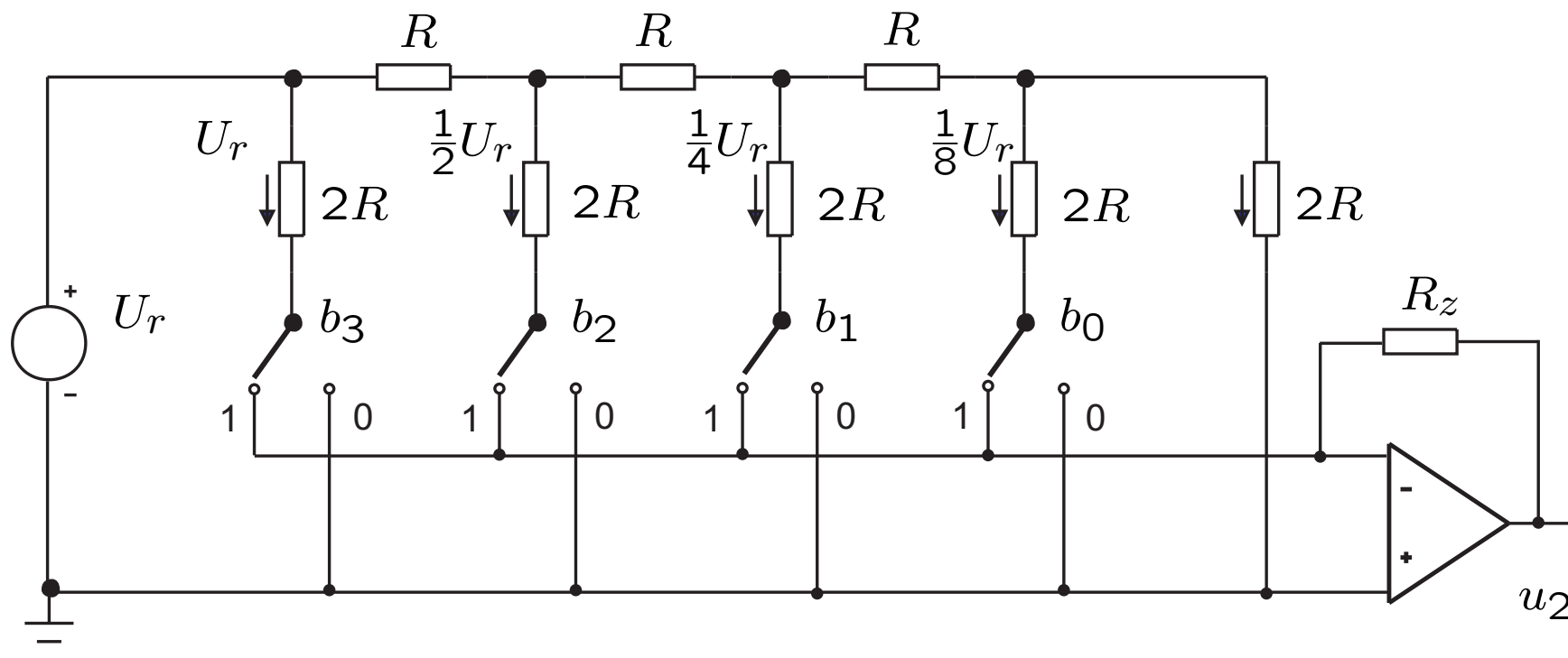
$$u_2 = (u_{02} - u_{01}) \frac{R_2}{R_1}$$

Odporový žebřík R – 2R





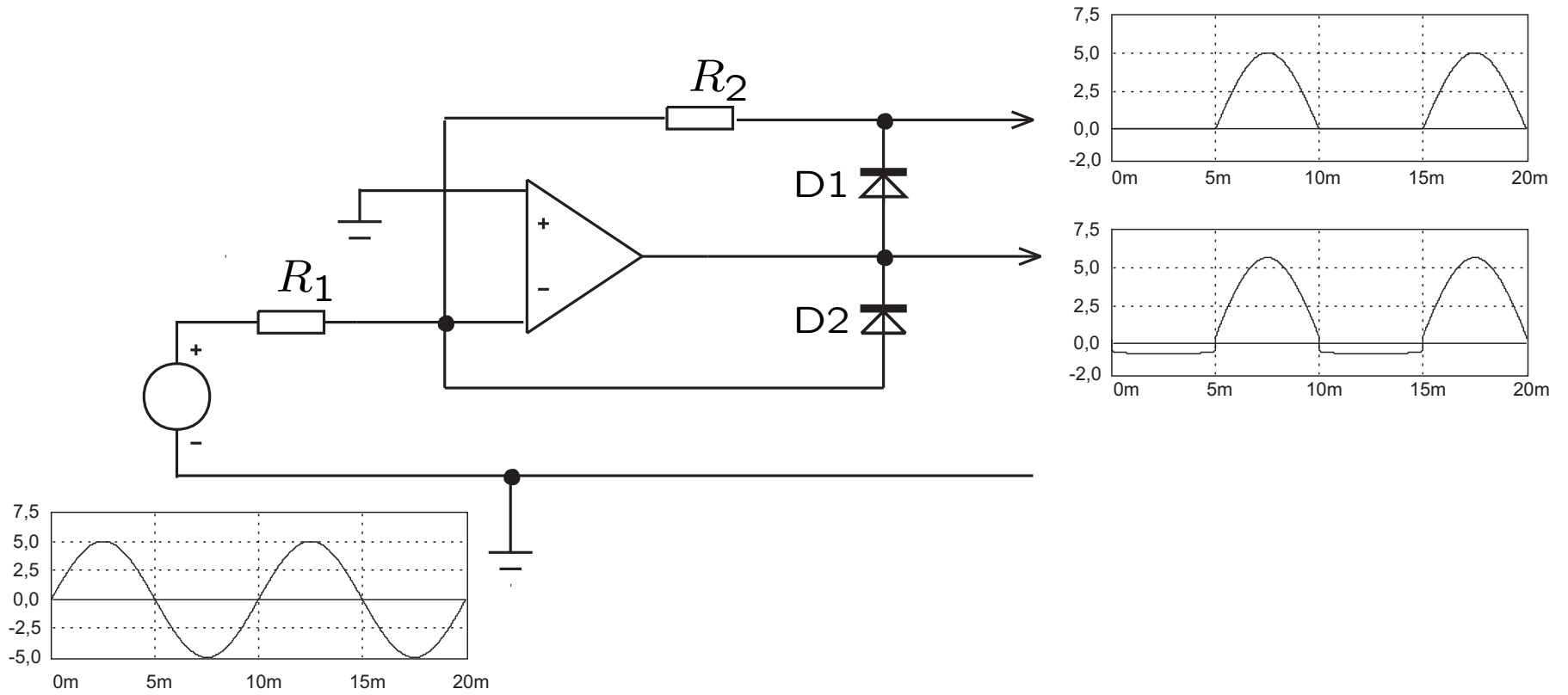
## D/A převodník R – 2R



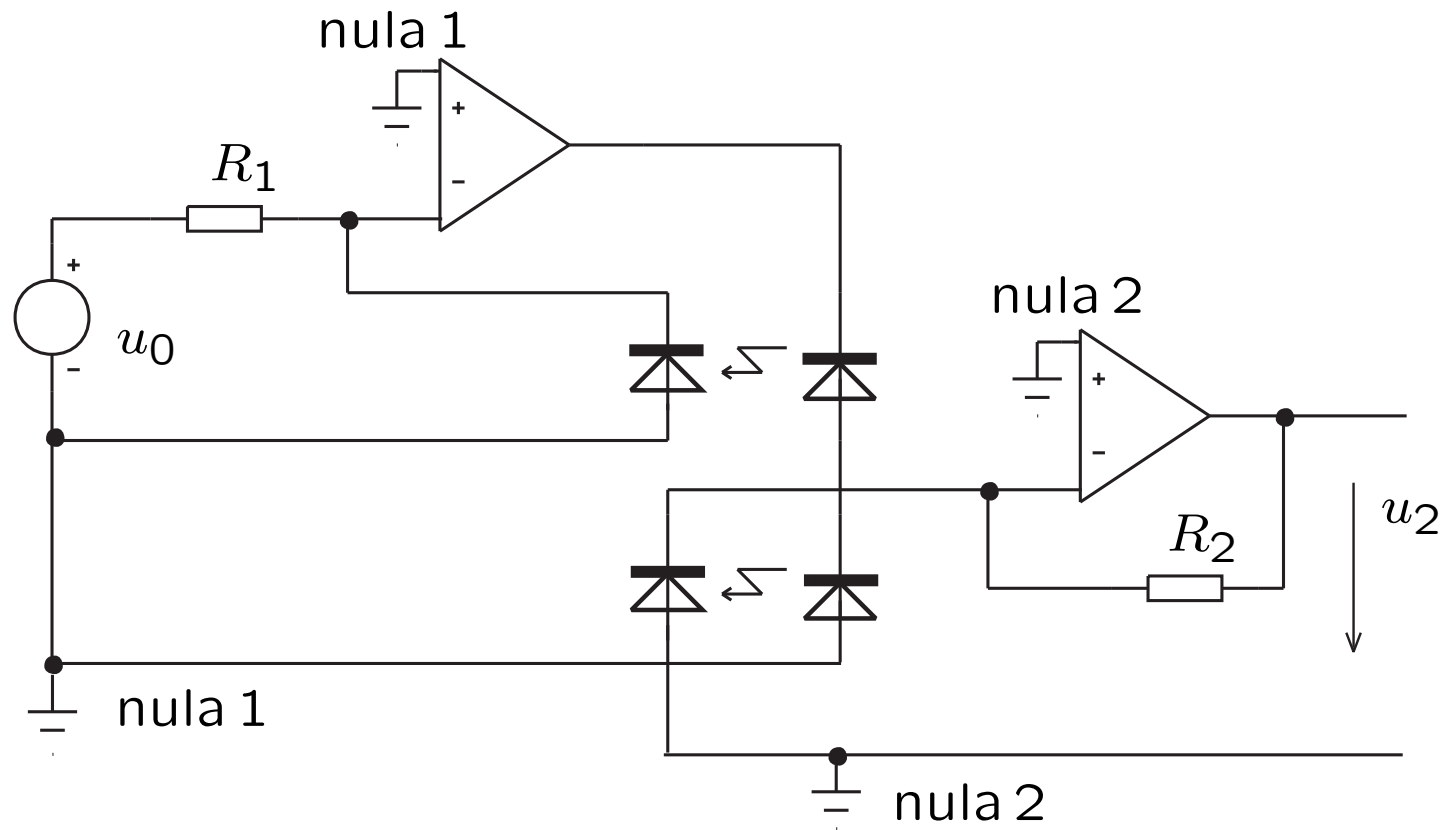
$$u_2 = -U_r \frac{R_z}{2R} \left( b_0 \frac{1}{8} + b_1 \frac{1}{4} + b_2 \frac{1}{2} + b_3 \right)$$

Když bude  $U_r = -16\text{V}$ , pak binární číslo  $b_3 \cdot \cdot b_0$  určuje napětí ve voltech – hodnoty  $0 \div 15\text{V}$ . Např.  $1011\text{B} = 11\text{D} \rightarrow u_2 = 11\text{V}$ .

# Operační jednocestný usměrňovač

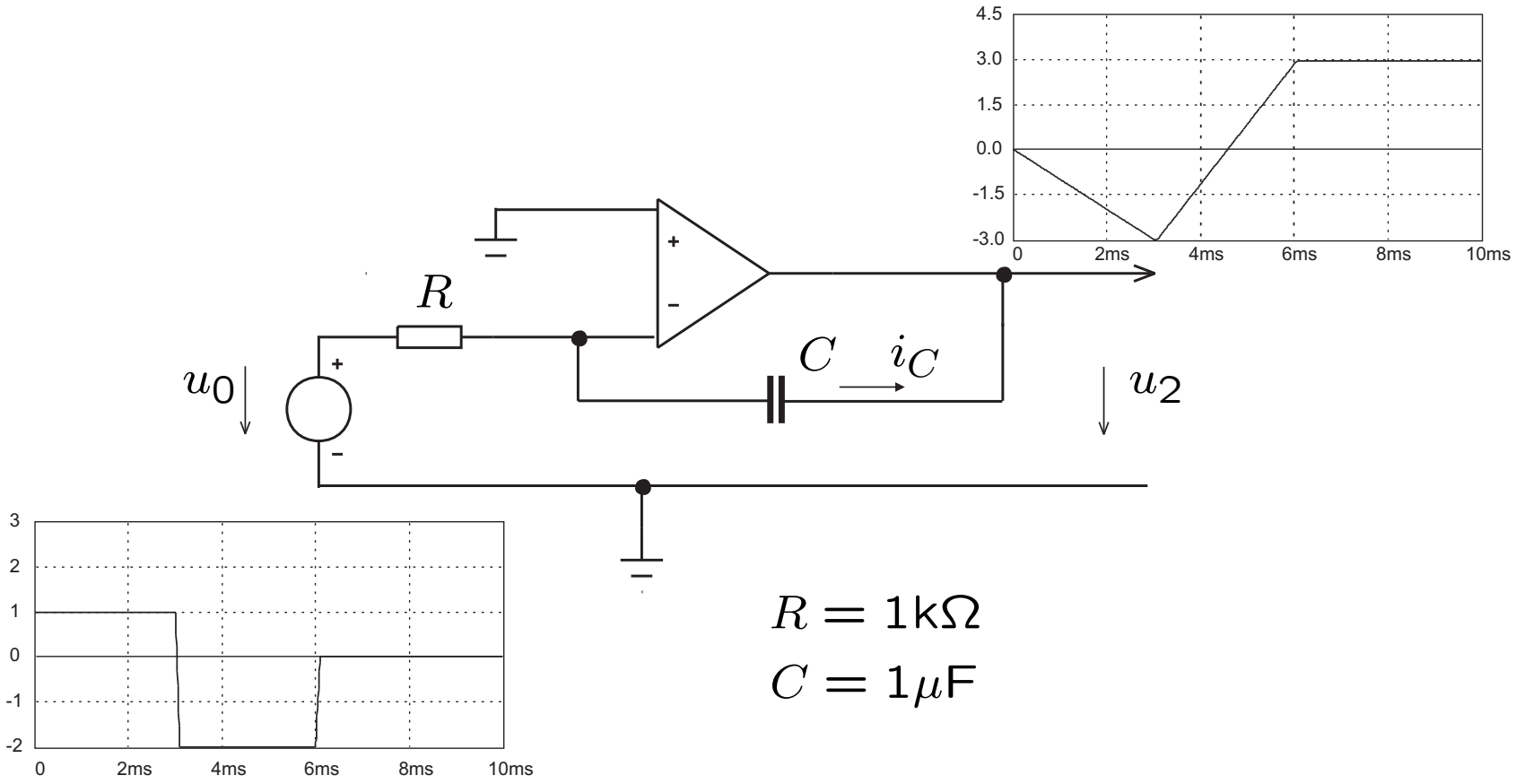


## Izolační operační zesilovač s optickou vazbou



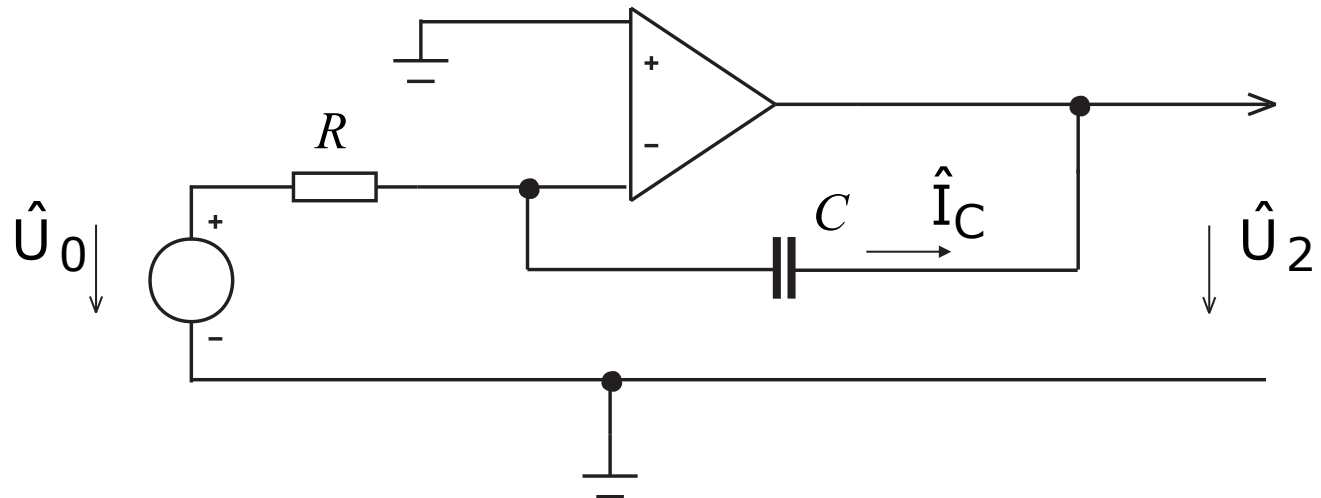
$$u_2 = u_0 \frac{R_2}{R_1} \quad u_0 \geq 0.$$

# Integrátor s operačním zesilovačem



$$i_1 = \frac{u_0}{R}, \quad i_C = i_1, \quad u_2(t) = u_2(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u_0(t) dt.$$

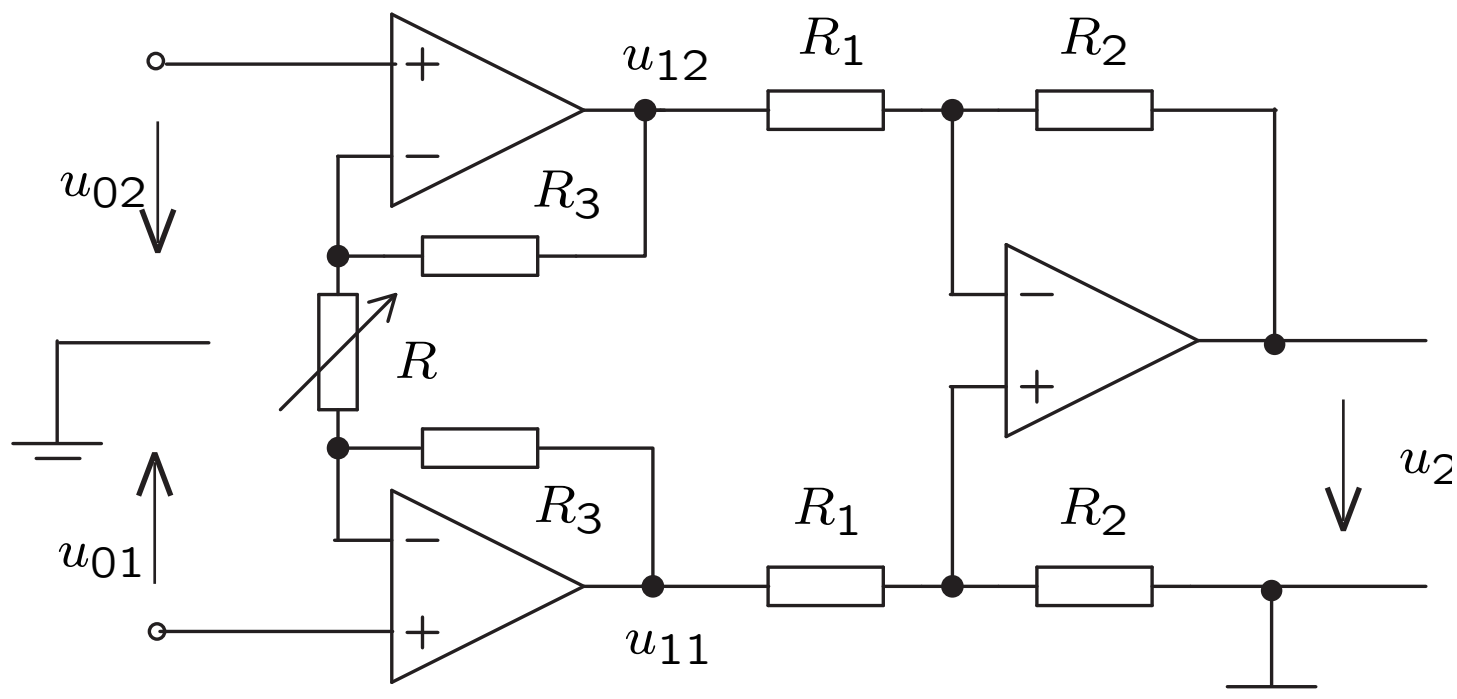
## Integrátor s operačním zesilovačem v harmonickém ustáleném stavu



$$\hat{U}_2 = -\hat{U}_0 \frac{1}{j\omega RC}$$

– viz invertující zesilovač

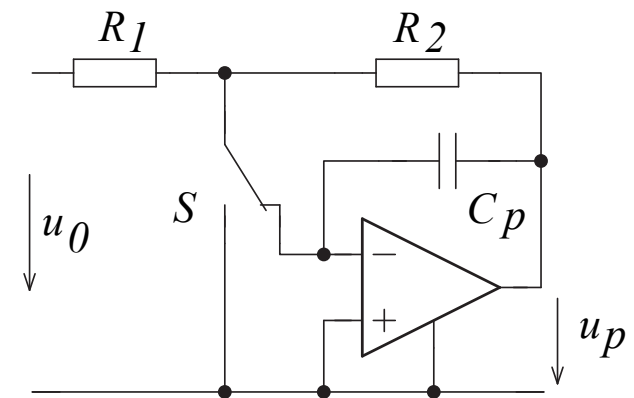
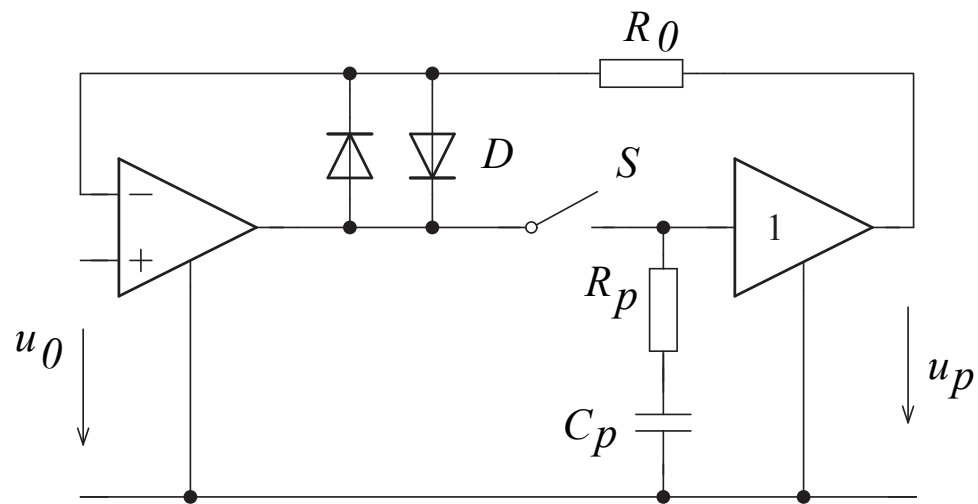
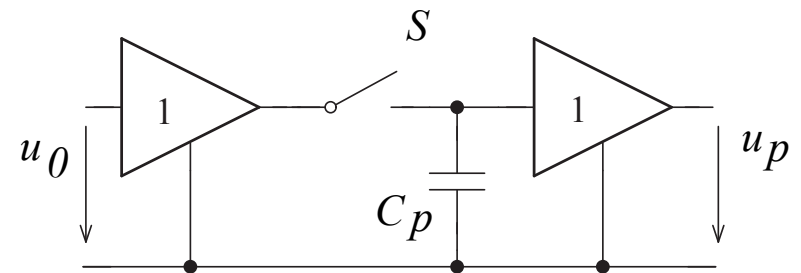
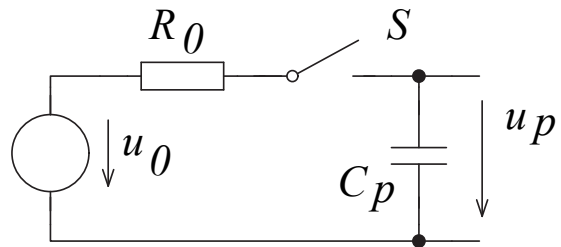
## Diferenční zesilovač s identickými vstupními obvody



$$u_{11} = u_{01} \left( 1 + \frac{R_3}{R} \right) - u_{02} \frac{R_3}{R}, \quad u_{12} = u_{02} \left( 1 + \frac{R_3}{R} \right) - u_{01} \frac{R_3}{R}$$

$$u_2 = (u_{11} - u_{12}) \frac{R_2}{R_1} = (u_{01} - u_{02}) \left( 1 + \frac{2R_3}{R} \right) \frac{R_2}{R_1}$$

## Vzorkovací obvody (S&H)



### 3. REÁLNÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ



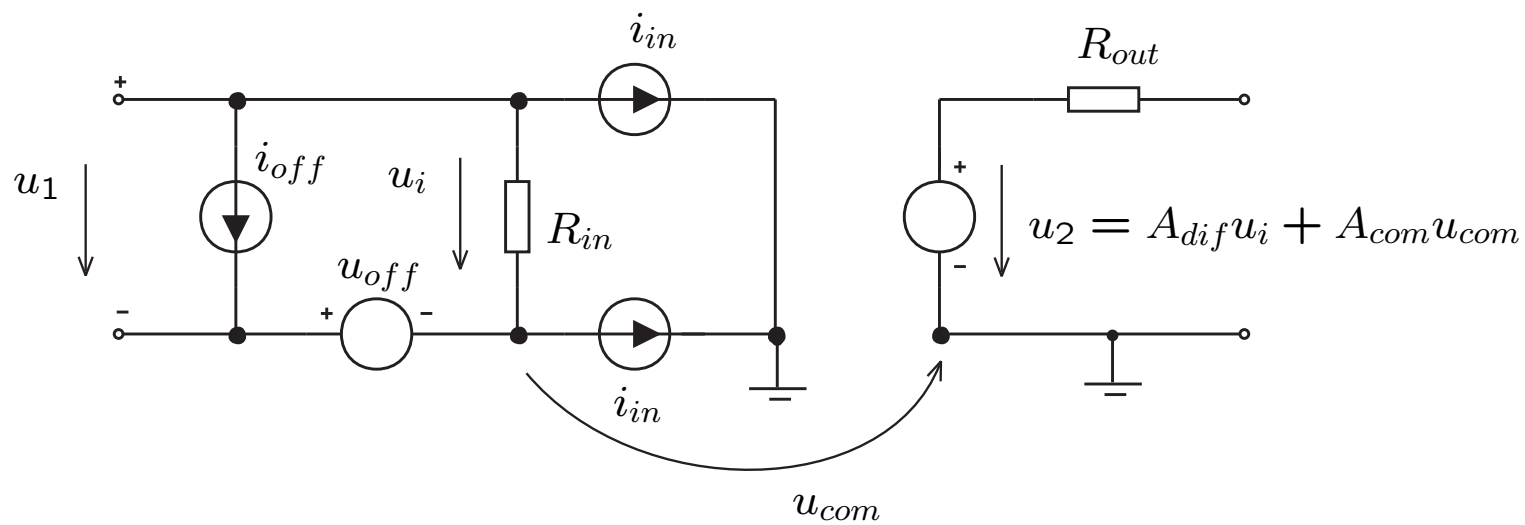
## REÁLNÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ

- stejnosměrné parametry reálného zesilovače a jejich vliv na zpětnovazební obvody
- frekvenční vlastnosti reálného zesilovače a jejich vliv na stabilitu zpětnovazebních obvodů
- přechodné děje – vliv konečné doby přeběhu výstupního napětí

## Reálný operační zesilovač – statické vlastnosti

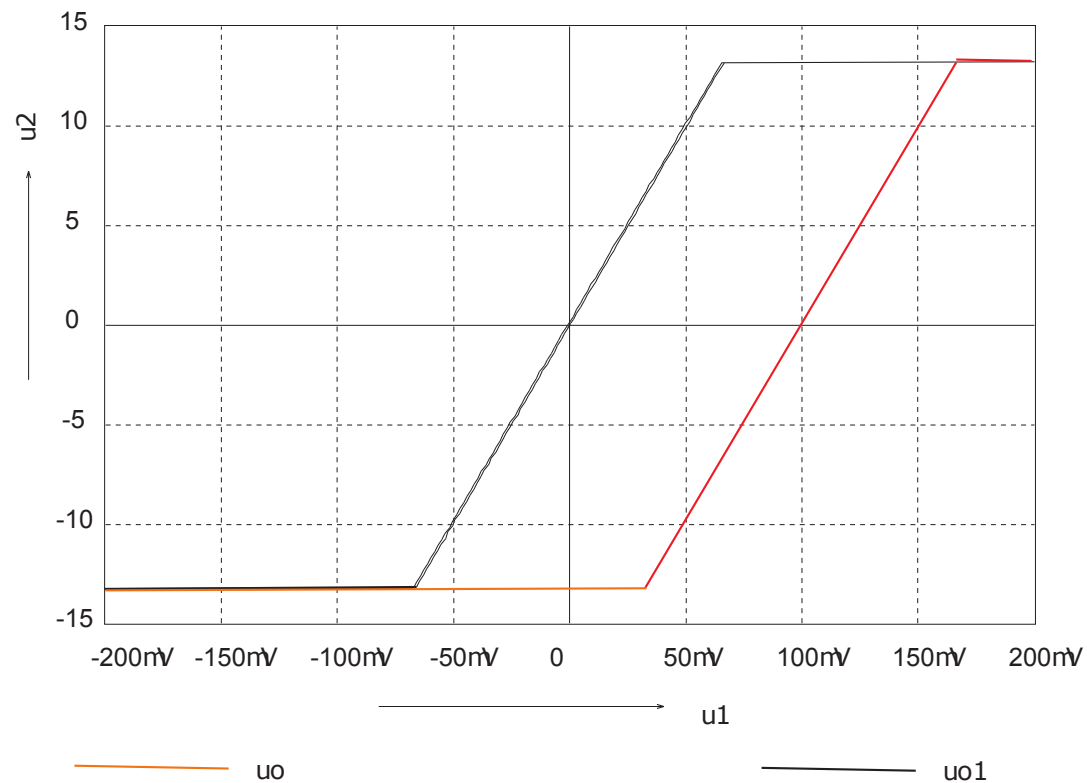
- Konečné zesílení  $A_u$ , které označíme jako  $A_{dif}$
- Nenulové vstupní napětí  $u_1 = u_2/A_{dif}$
- Nenulový výstupní odpor  $R_{out}$
- Omezený rozkmit výstupního napětí (output voltage swing)
- Vstupní odpor  $R_{in}$
- Vstupní proud  $i_{in}$ ,
- Nesymetrie vstupů – offset napěťový  $u_{off}$  a proudový  $i_{off}$
- Přenos souhlasného napětí  $A_{com}$

## Reálný operační zesilovač – statický model

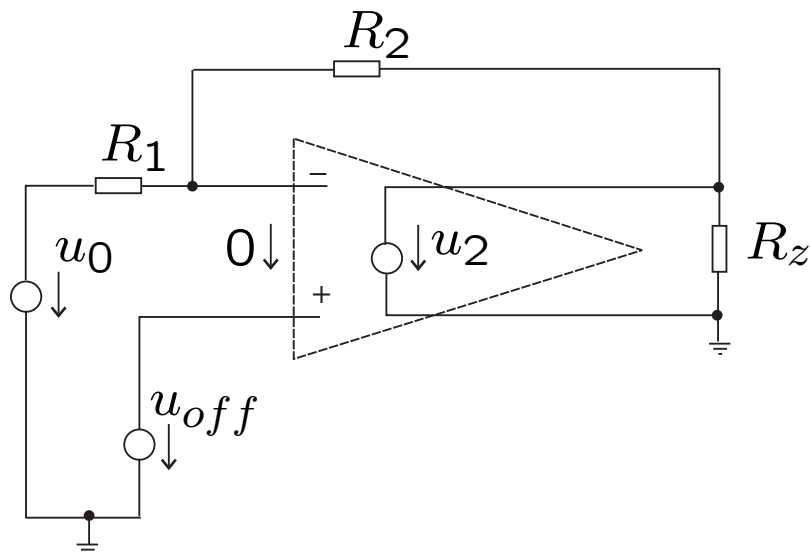


Vliv konečného zesílení  $A_{dif}$ , ofsetového napětí  $u_{off}$  a omezeného rozkmitu výstupního napětí na charakteristiku vstup/výstup

$$A_{dif} = 200\,000, \quad u_{out} = \pm 13\text{ V}$$



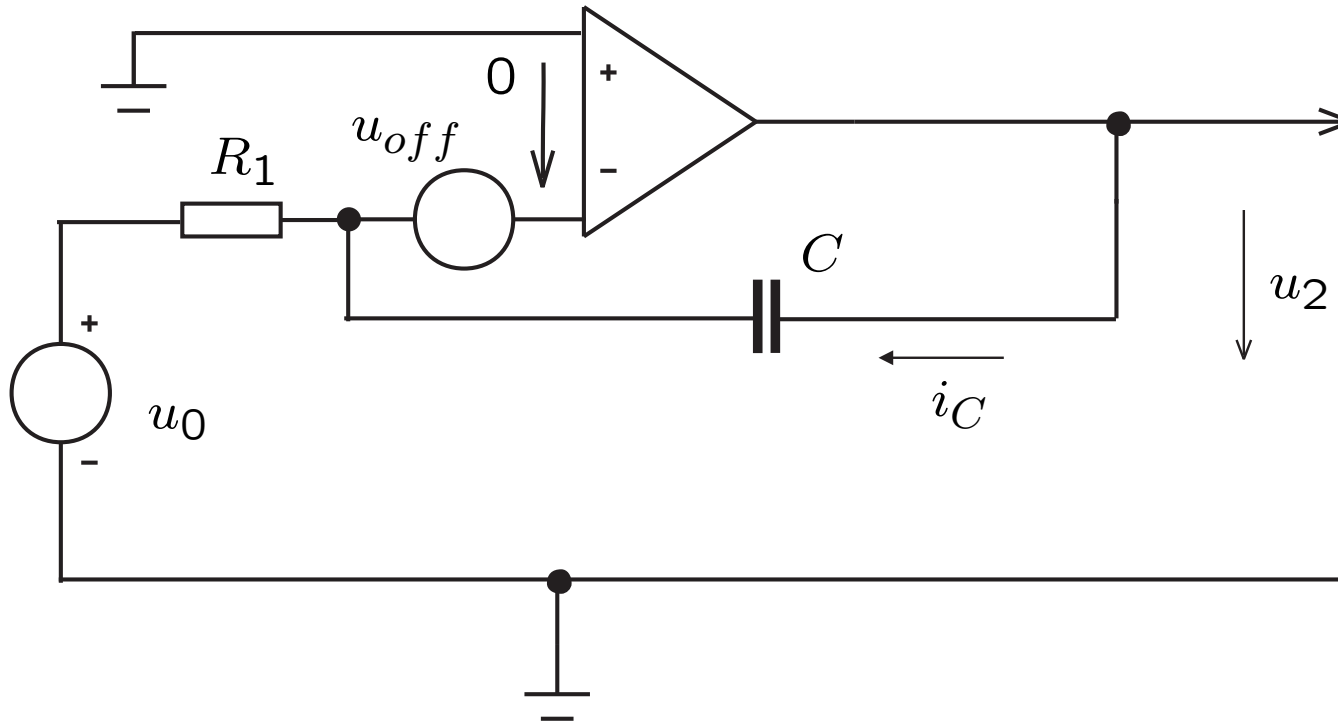
Vliv napěťové nesymetrie (ofsetu) na invertující zesilovač (ostatní parametry ideální)



$$u_2 = -u_0 \frac{R_2}{R_1} + u_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

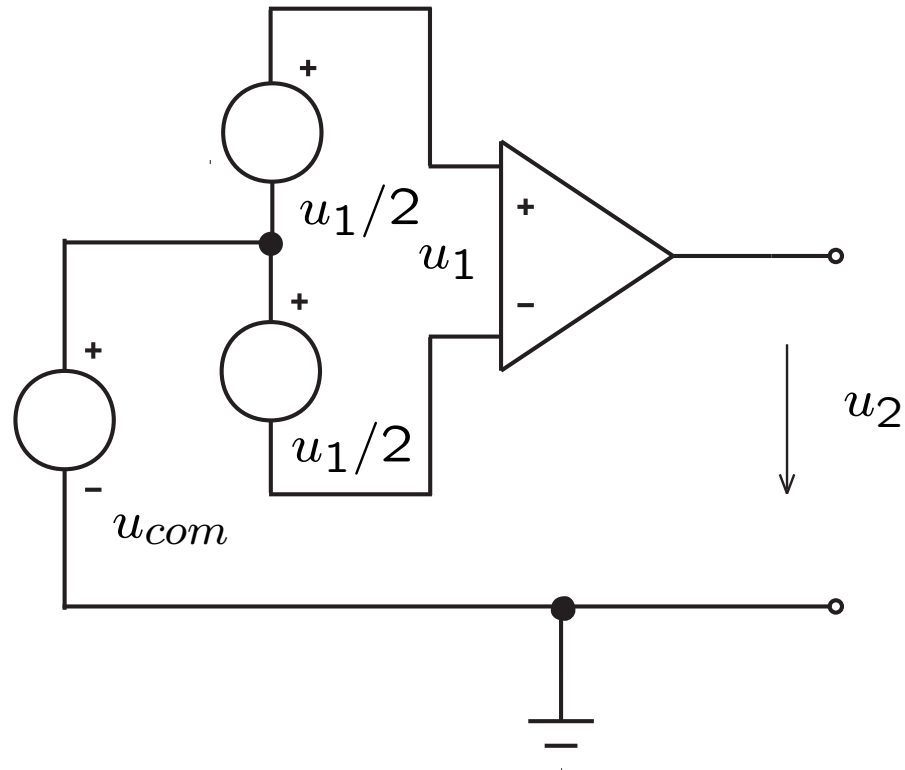
Příklad:  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ,  $u_0 = 0,5\text{V}$ ,  $u_{off} = \pm 2\text{mV}$ ,  $u_2 = -5\text{V} \pm 22\text{mV}$

## Vliv ofsetového napětí na integrátor s operačním zesilovačem



$$u_2(t) = u_2(0) + \frac{1}{C} \int_0^t \left( -\frac{u_0 \pm u_{off}}{R_1} \right) dt$$

## Přenos souhlasné složky vstupního napětí



Činitel potlačení souhlasné složky (Common Mode Rejection Ratio)

$$\text{CMRR} = 20 \log \left| \frac{A_{\text{dif}}}{A_{\text{com}}} \right| \text{ [dB]}$$

## Setrvačné vlastnosti reálného zesilovače

- Frekvenční závislost  $A_{dif}(j\omega)$  a z ní plynoucí frekvenčně závislý posun fáze výstupního napětí.
- Omezená doba přeběhu výstupu  $u_2$  mezi dvěma napěťovými úrovněmi při skokové změně vstupního napětí  $u_1$ .

Parametr SR [V/s] rychlost přeběhu (Slew Rate) ve voltech za sekundu, nebo voltech za mikrosekundu.



## Vnitřní struktura reálného operačního zesilovače

Většina integrovaných operačních zesilovačů je zkonstruována jako obvod složený ze tří zesilovacích stupňů.

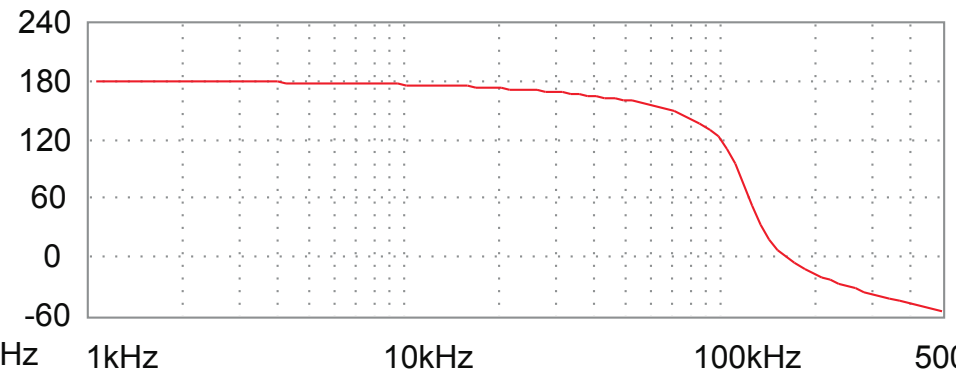
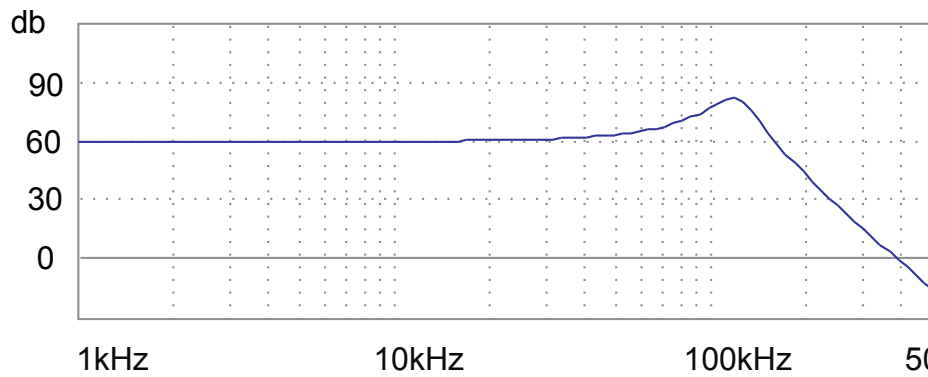
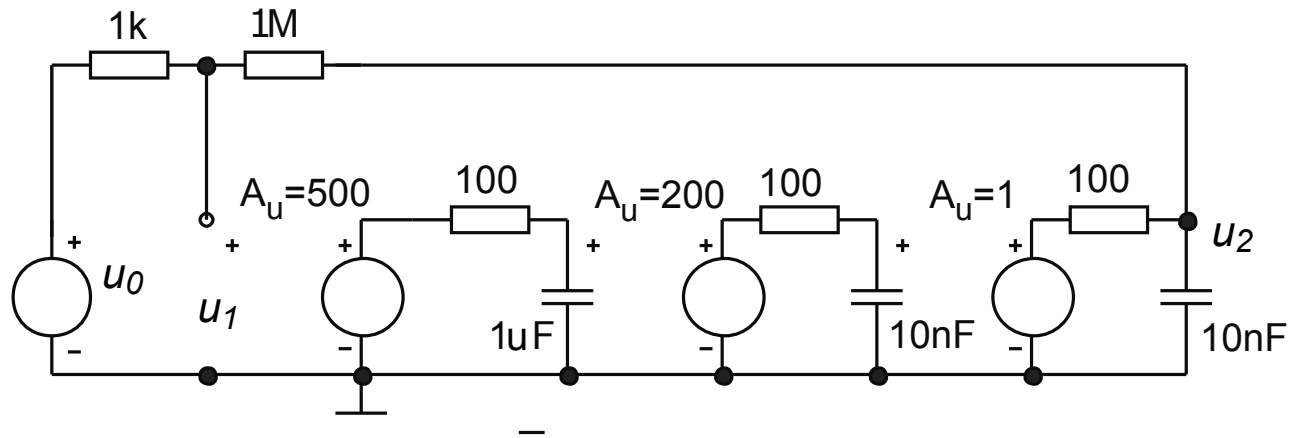
Prvý stupeň má dva vstupy, invertující a neinvertující, zesiluje rozdílové napětí a potlačuje souhlasné napětí

Druhý stupeň zpracovává signál z prvního stupně a výrazně jej zesiluje

Třetí stupeň má malý výstupní odpor a je odolný vůči nestandardním připojením zátěže.

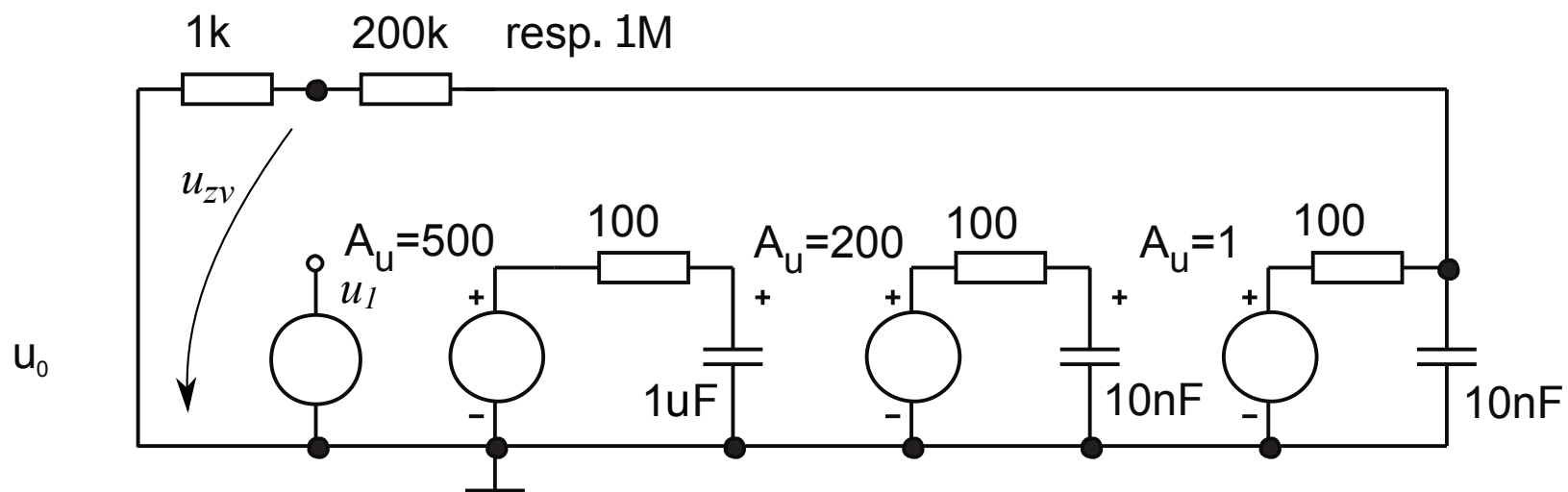
Celý řetězec přenáší (zesiluje) stejnosměrné rozdílové vstupní napětí, avšak každý stupeň má svůj horní mezní kmitočet (nemůže zesilovat signály s libovolně vysokým kmitočtem). Tuto vlastnost lze pro každý stupeň modelovat nezatíženým RC obvodem s určitou hodnotou časové konstanty, resp. s určitou frekvencí zlomu na amplitudové frekvenční charakteristice. Takový model frekvenčního omezení zesilovacích možností jednotlivých stupňů umožňuje sledovat i charakteristiku fázovou. To bude předmětem následujícího zkoumání jevů typických pro zpětnovazební struktury.

Zpětná vazba v třístupňovém zesilovači, uzavřená smyčka, stabilní zesilovač –  
 frekvenční závislost s převýšením na vysokých kmitočtech



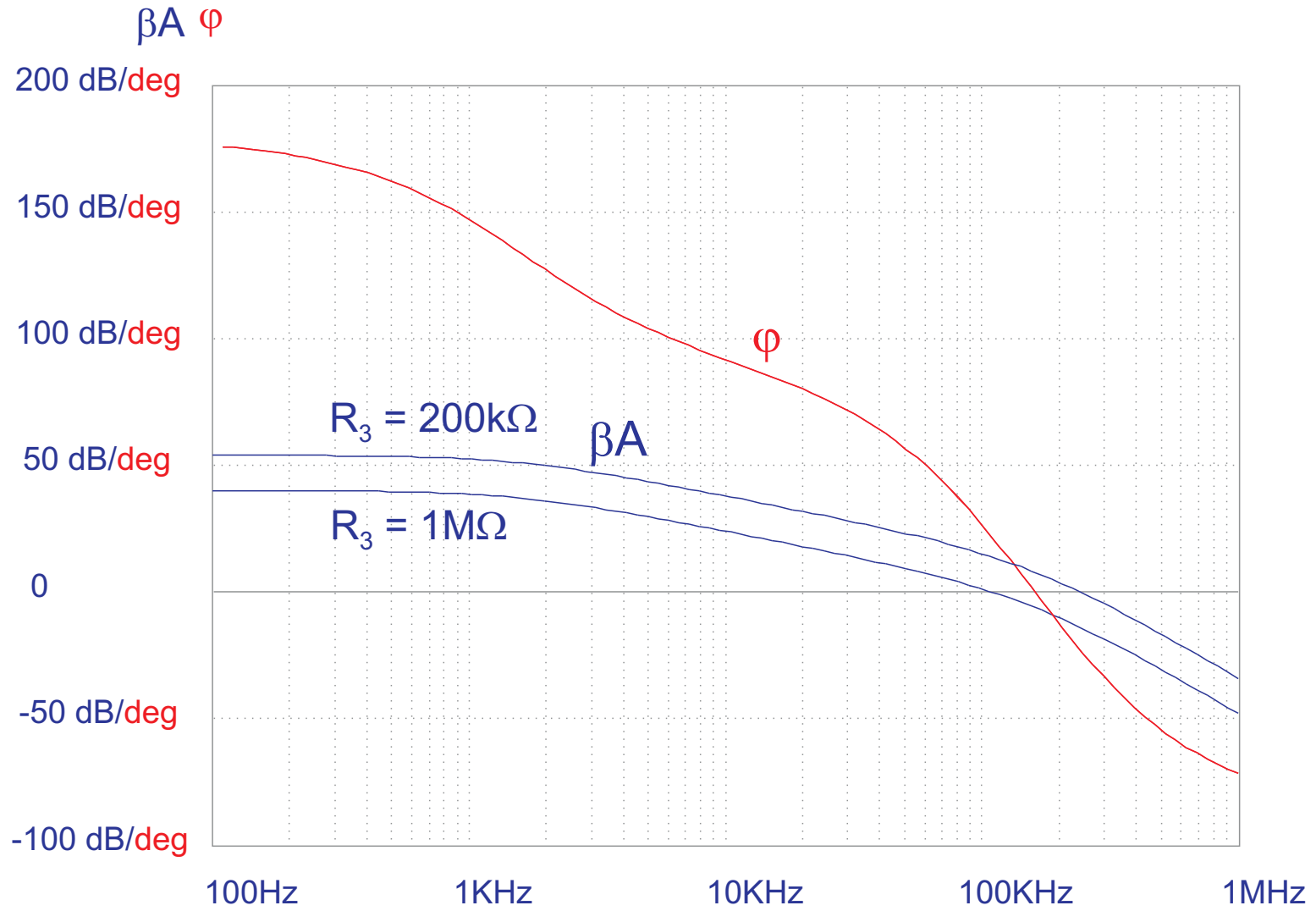
$$A_{ex} = U_6 / U_5$$

Otevřená smyčka – frekvenční analýza amplitudy a fáze napětí vedeného do sčítacího uzlu na vstupu zpětnovazebního obvodu



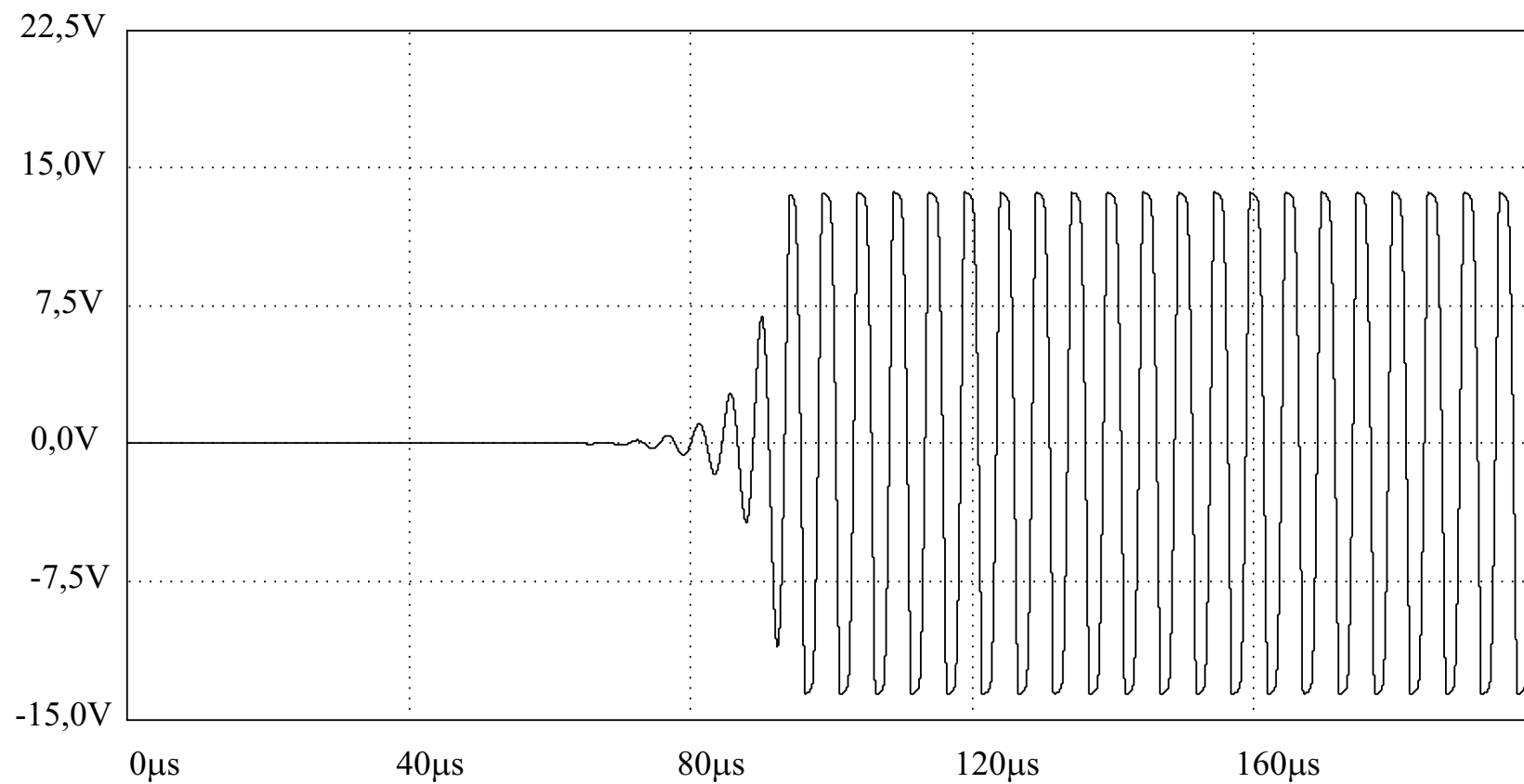
$$\beta A = U_7 / U_5$$

# Otevřená smyčka – amplituda a fáze

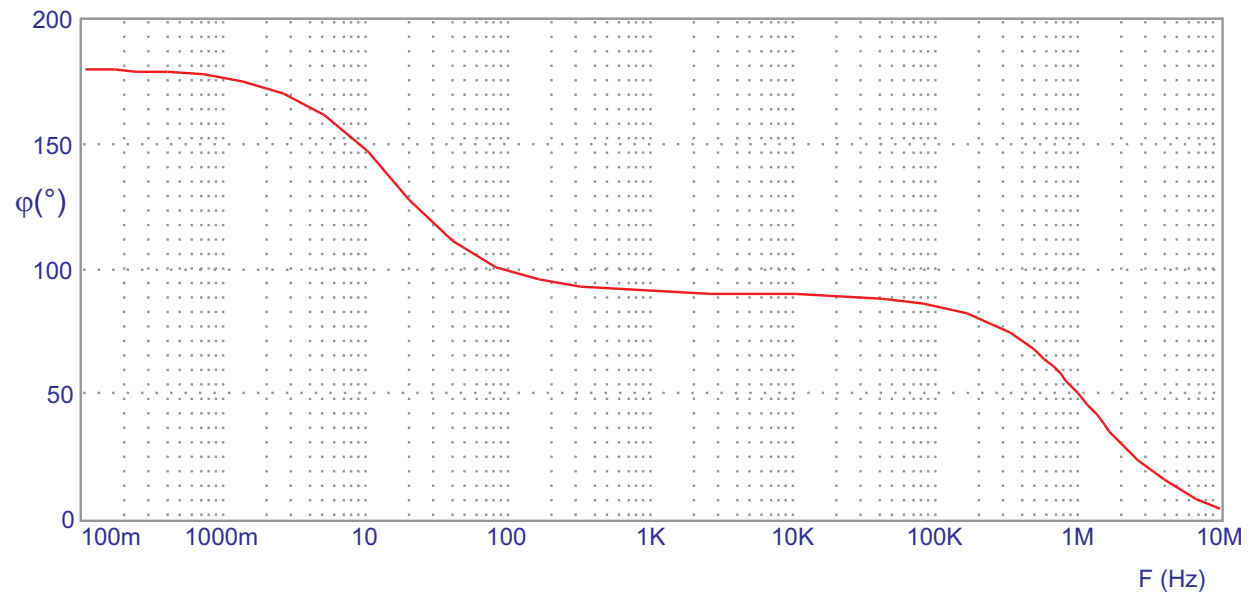
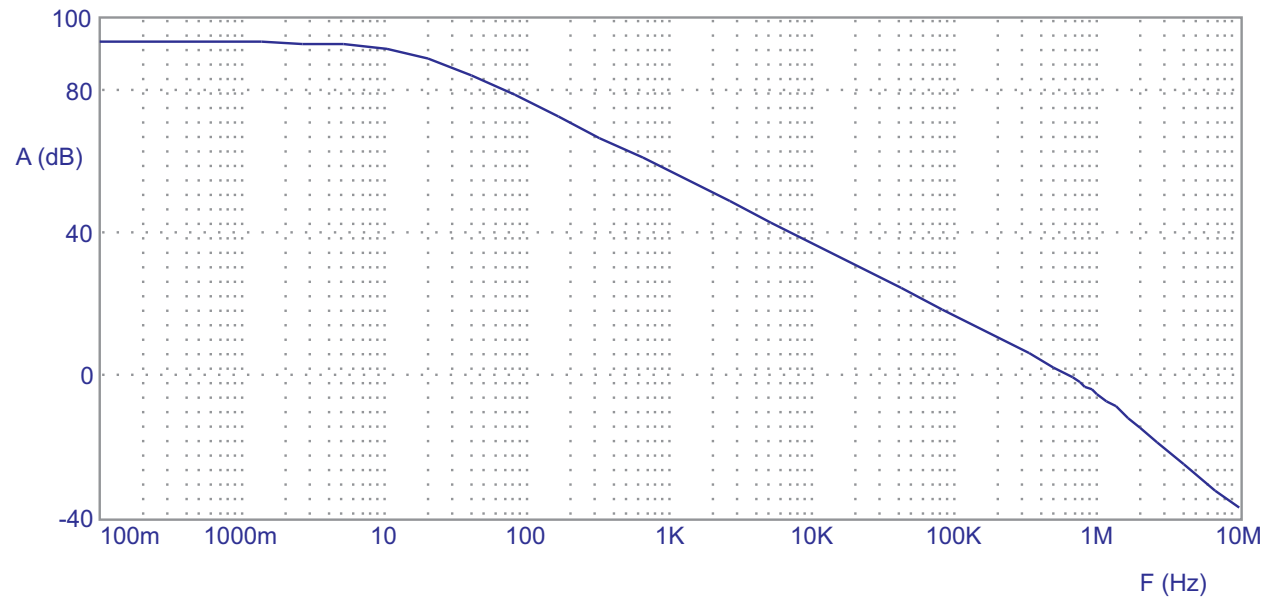


# Nestabilní zesilovač

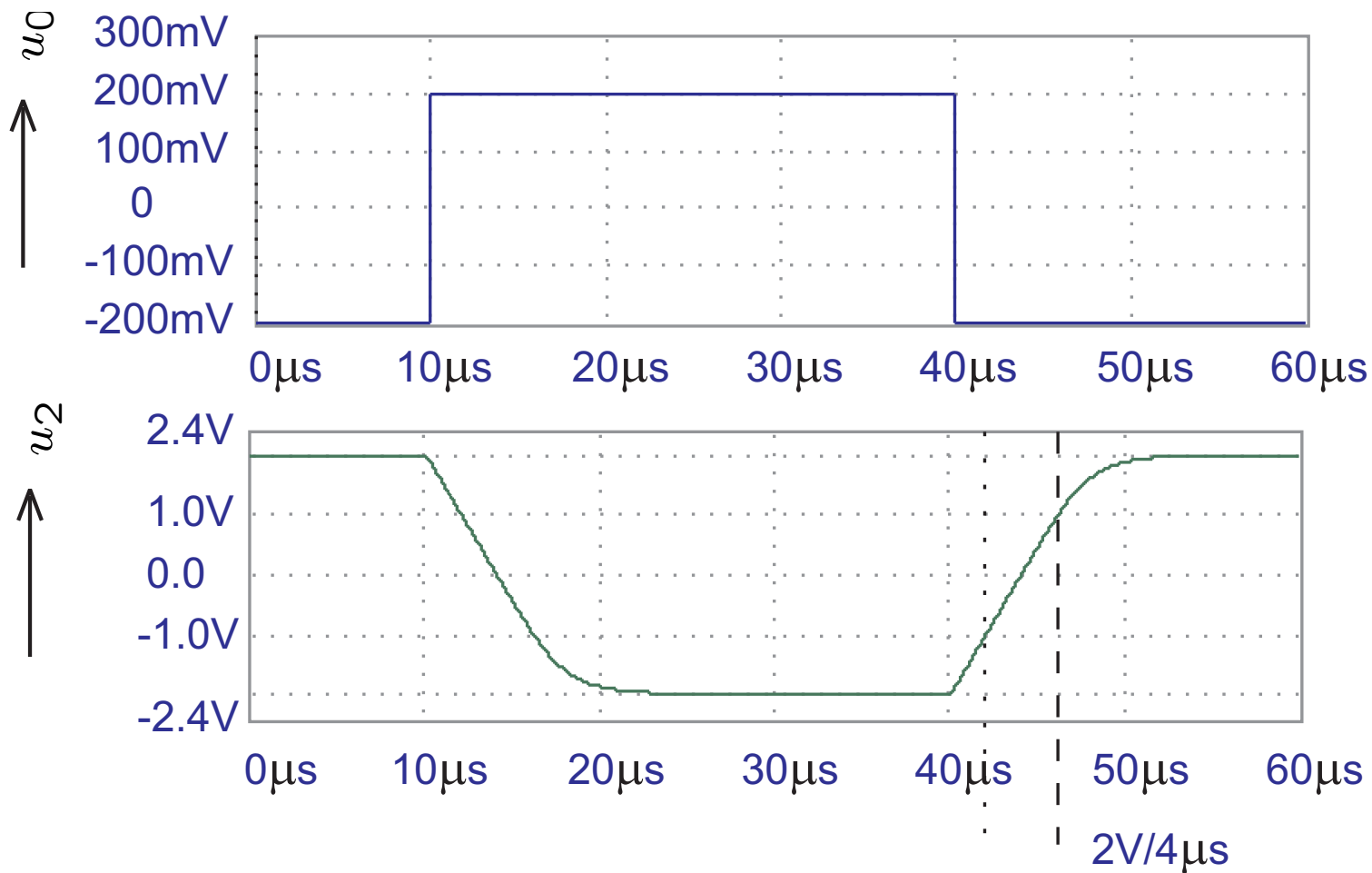
$$R_3 = 200 \text{ k}\Omega, \quad u_0 = 0$$



# Operační zesilovač s frekvenční kompenzací

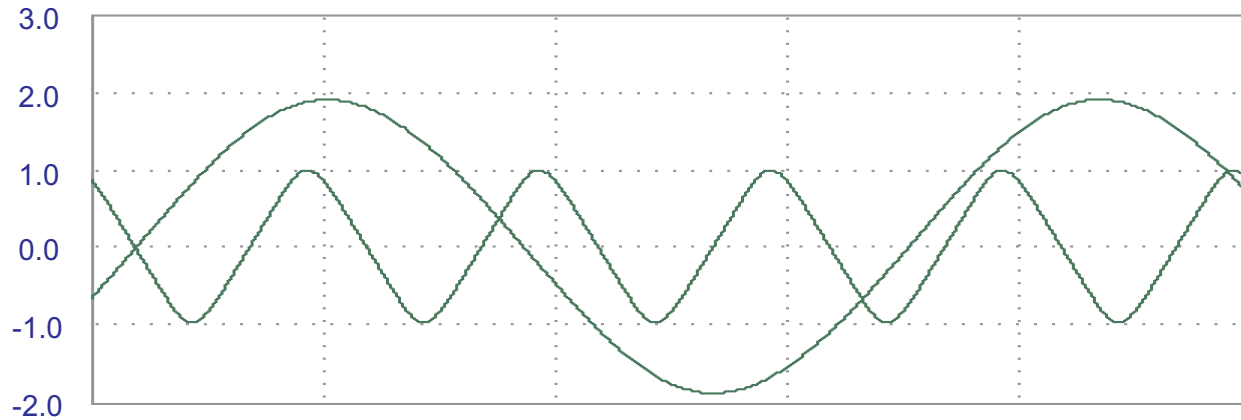


Průběhy napětí v obvodu při velkém rozkmitu budicího impulsu – invertující zesilovač ( $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , OZ – LM741)

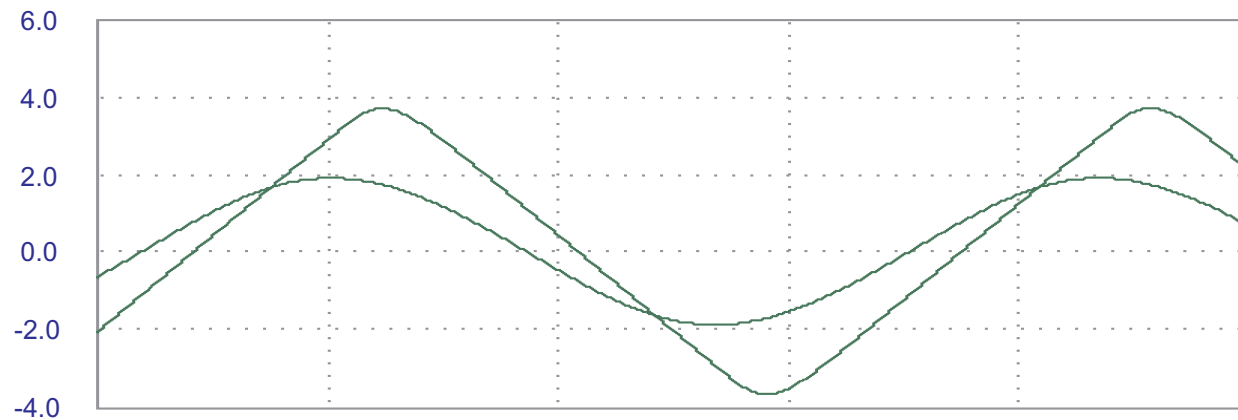


$$SR = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Výstupní napětí při harmonickém buzení, různé amplitudě a různém kmitočtu –  
invertující zesilovač ( $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , OZ – LM741)



$f = 30 \text{ kHz}$  a  $100 \text{ kHz}$ ,  $U_m = 0,2 \text{ V}$



$f = 30 \text{ kHz}$ ,  $U_m = 0,2 \text{ V}$  a  $0,5 \text{ V}$

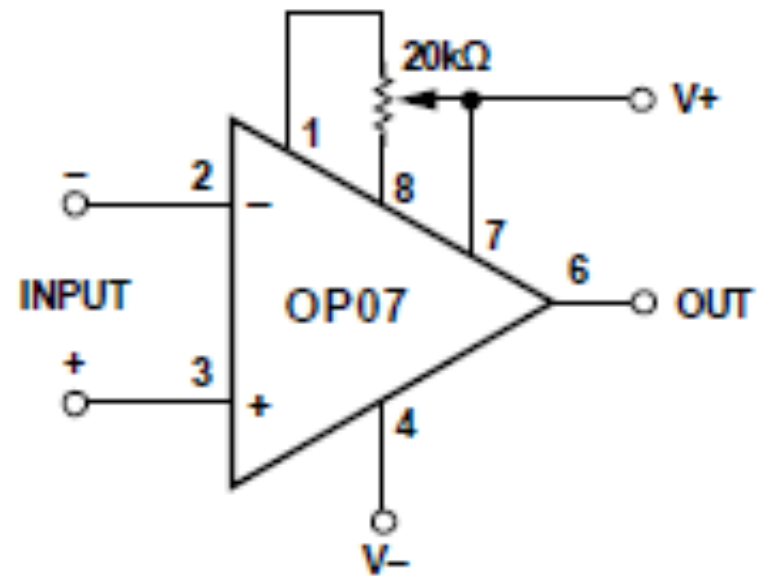
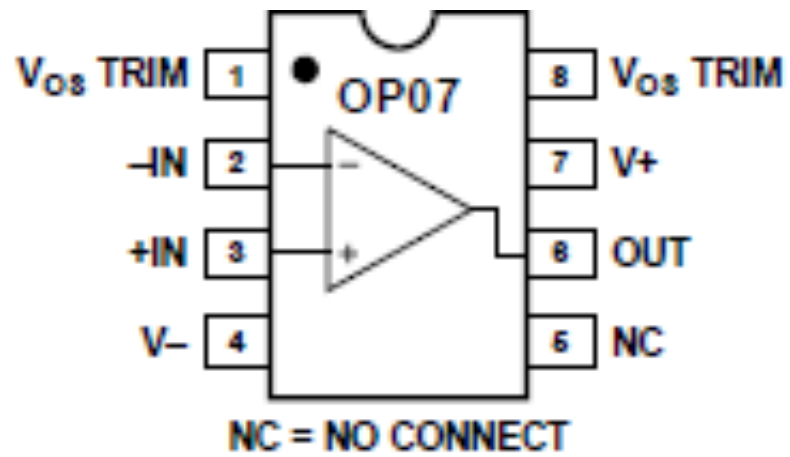


Výstupní napětí při harmonickém buzení – maximální kmitočet přenesený bez zkreslení

$$\frac{du_2(t)}{dt} = \omega U_{2m} \cos \omega t$$

$$f_{MAX} = \frac{SR}{2\pi U_{2m}} \quad [\text{MHz, V, } \mu\text{s}]$$

## Integrovaný operační zesilovač OP 07



## Integrovaný operační zesilovač OP 07

Input Offset Voltage	$V_{OS}$	30	75	$\mu\text{V}$
Input Offset Current	$I_{OS}$	0.5	3.8	nA
Input Bias Current	$I_B$	$\pm 1.2$	$\pm 4.0$	nA
Input Resistance, Differential Mode	$R_{IN}$	15	50	$\text{M}\Omega$
Input Resistance, Common Mode	$R_{INCM}$	160		$\text{G}\Omega$
Input Voltage Range	IVR	$\pm 13$	$\pm 14$	V
Common-Mode Rejection Ratio $V_{CM} = \pm 13\text{ V}$	CMRR	106	123	dB
Large Signal Voltage Gain $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$	$A_{VO}$	200	500	V/mV
Slew Rate $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	SR	0.1	0.3	V/ $\mu\text{s}$
Closed-Loop Bandwidth $A_{VOL} = 1$	BW	0.4	0.6	MHz
Open-Loop Output Resistance $V_O = 0$ , $I_O = 0$	$R_O$	60		$\Omega$
Output Voltage Swing $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$V_O$	$\pm 11.5$	$\pm 12.8$	V
Power Consumption $V_S = \pm 15\text{ V}$ , No load	$P_d$	75	120	mW