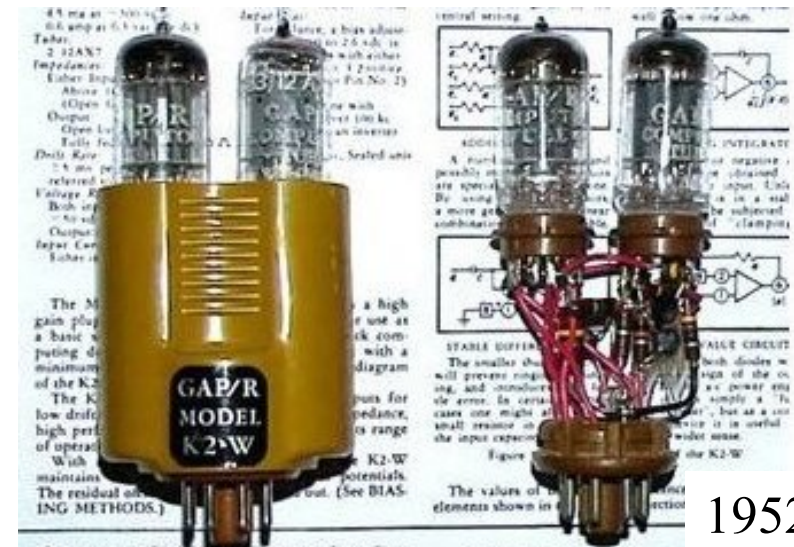


Operační zesilovače

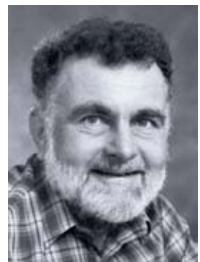
1943

koncept OZ
s elektronkami

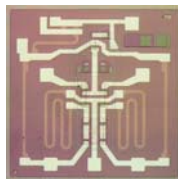


1952

Philbrick Research

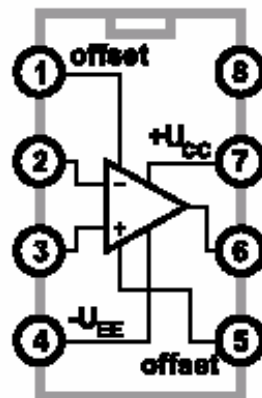


Bob Widlar



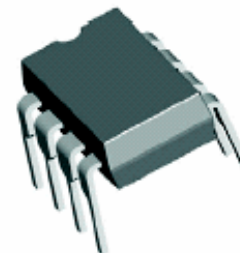
μA702

1963

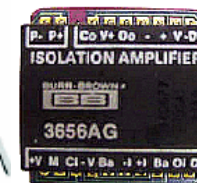


μA709

μA741



1980

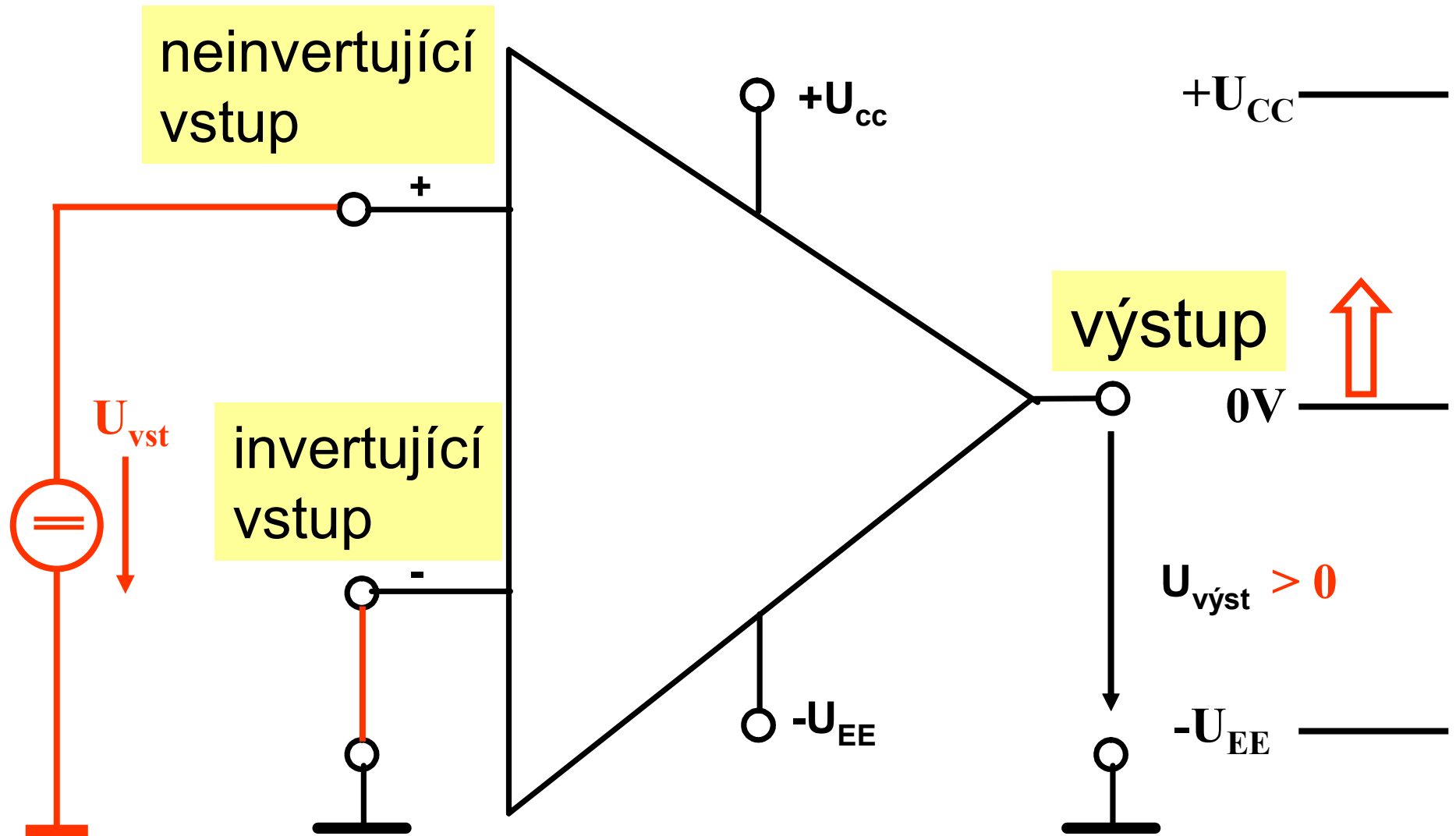


1990

100V - 100W DMOS AUDIO AMPLIFIER
Wideband Video Op Amp

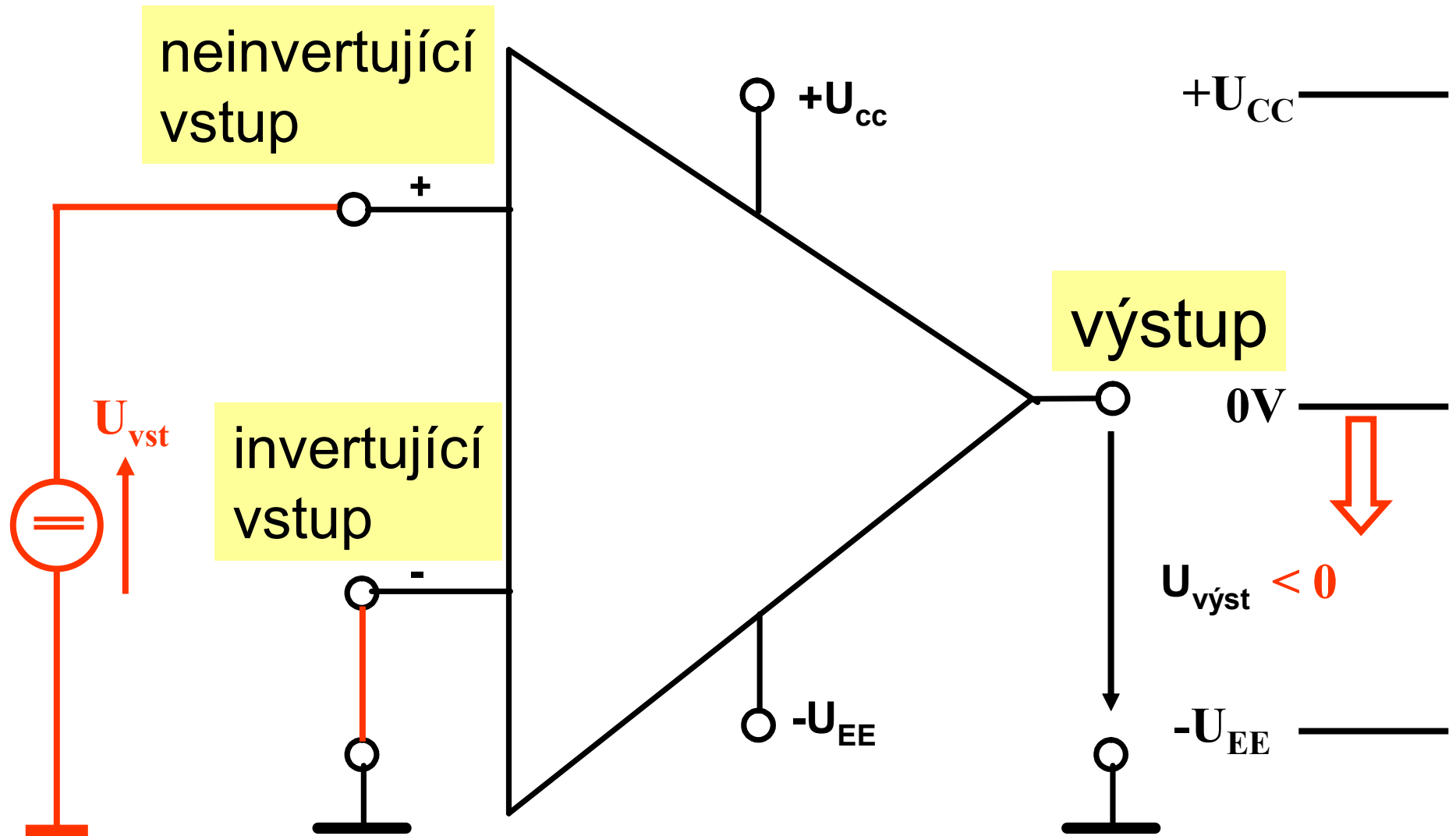
2005

Operační zesilovač



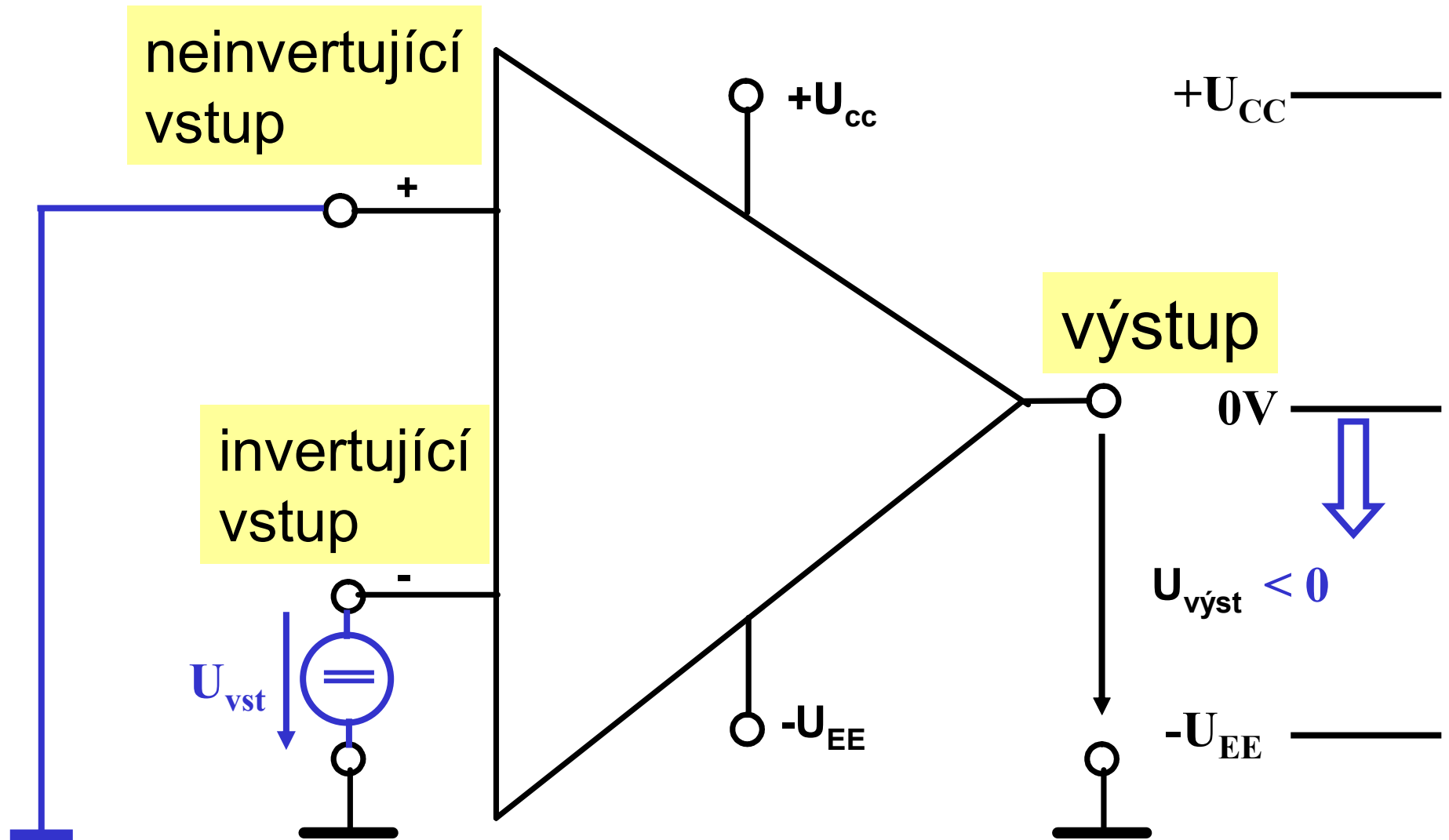
Změna napětí na neinvertujícím vstupu způsobí změnu $U_{výst}$ v totožném smyslu.

Operační zesilovač



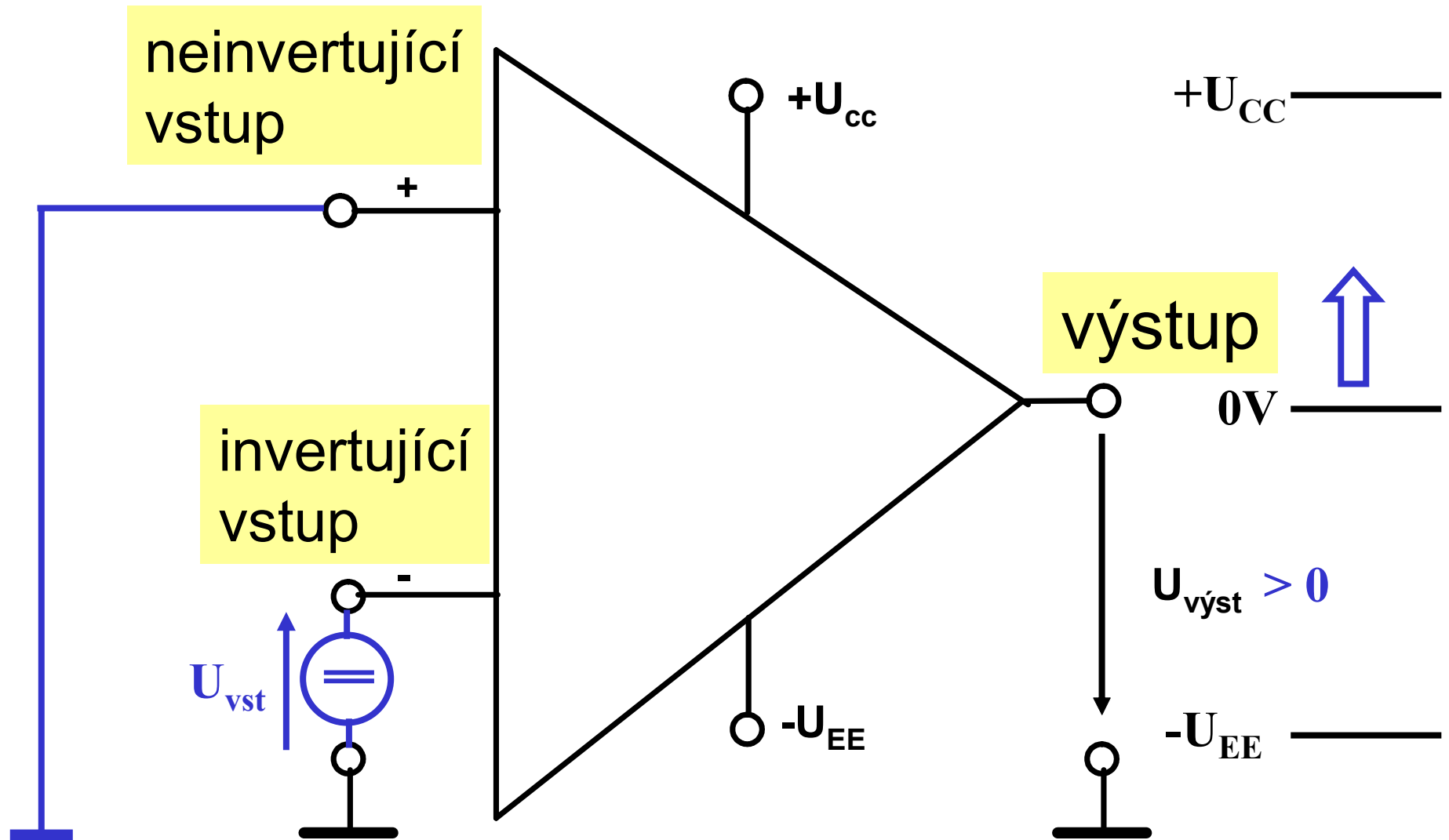
Změna napětí na neinvertujícím vstupu způsobí změnu $U_{výst}$ v totožném smyslu.

Operační zesilovač



Změna napětí na invertujícím vstupu způsobí změnu $U_{výst}$ v opačném smyslu.

Operační zesilovač

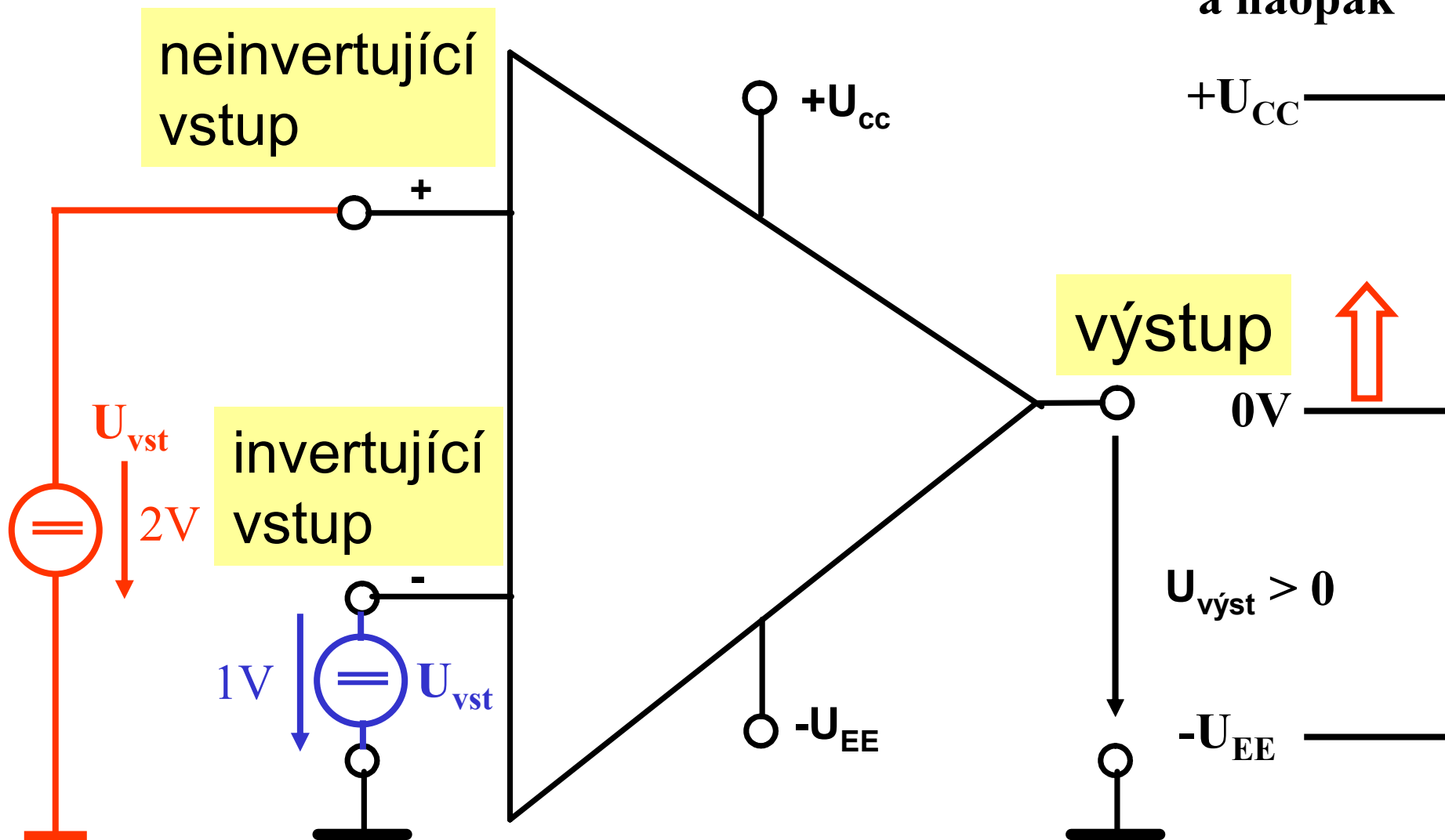


Změna napětí na invertujícím vstupu způsobí změnu $U_{výst}$ v opačném smyslu.

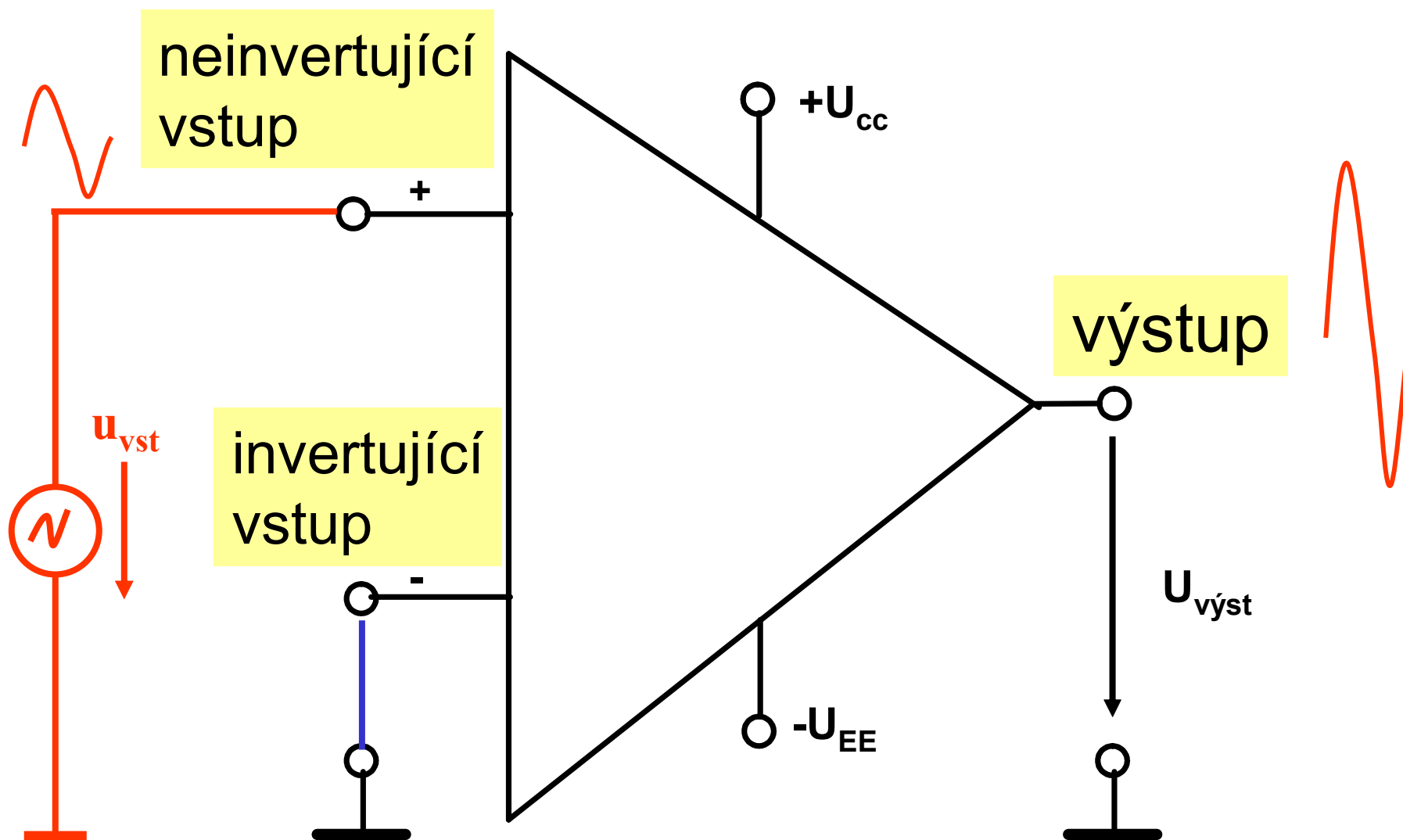
Operační zesilovač

$U_{\text{výst}} > 0$, pokud je $U_+ > U_-$.

a naopak

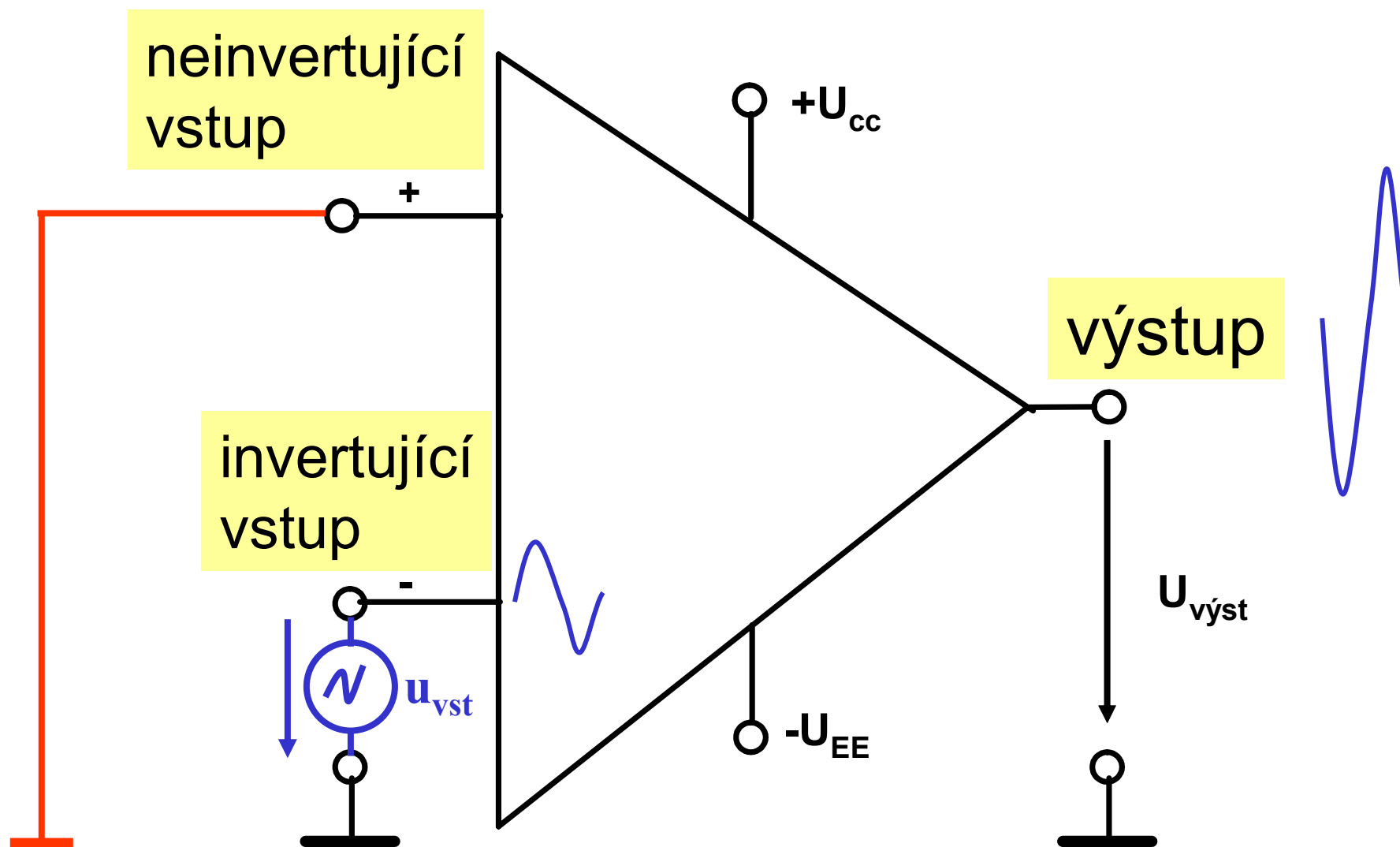


Operační zesilovač – harmonické napětí



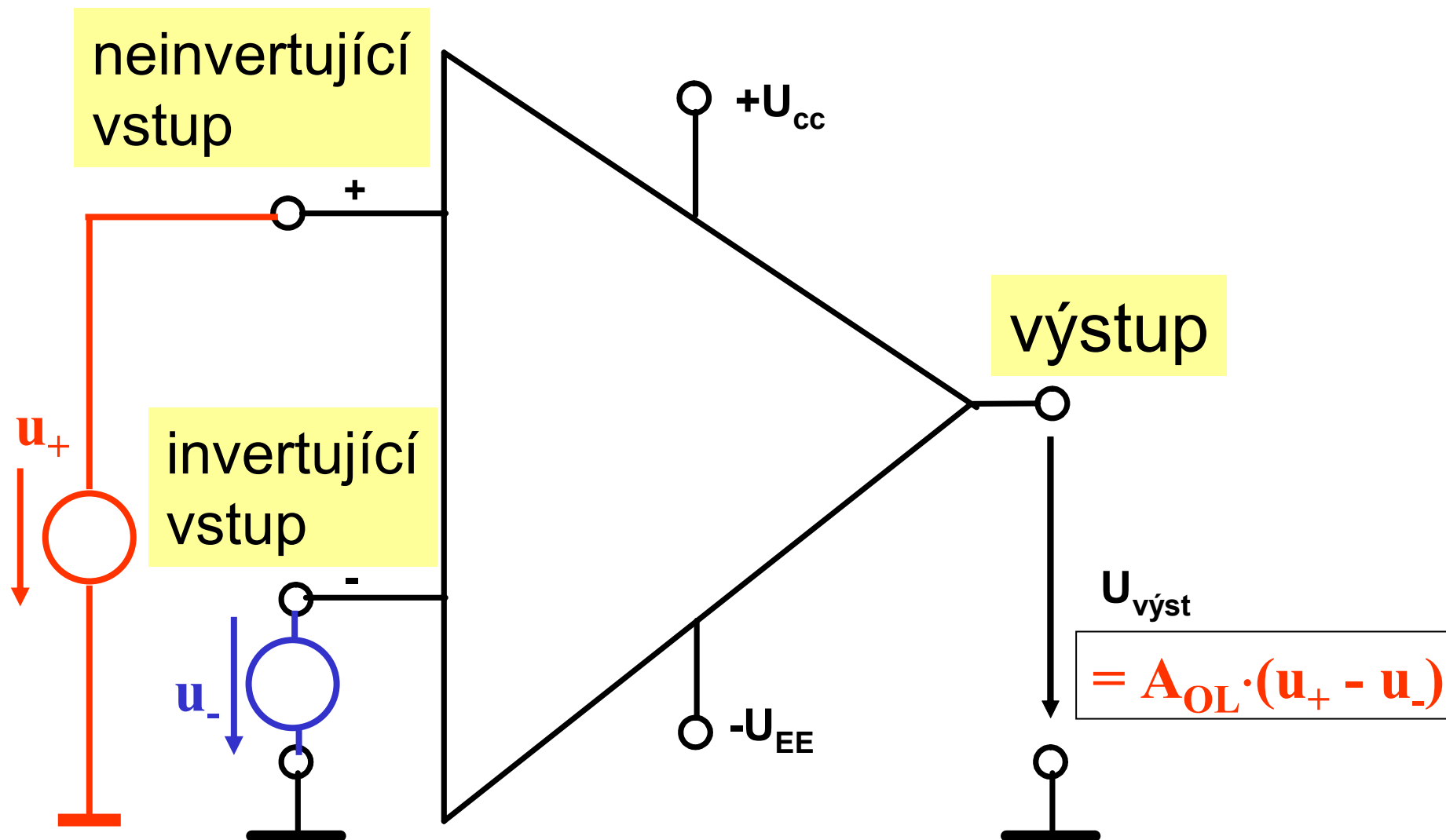
Fáze výstupního napětí nezměněna (ideální případ zesilovače).

Operační zesilovač – harmonické napětí



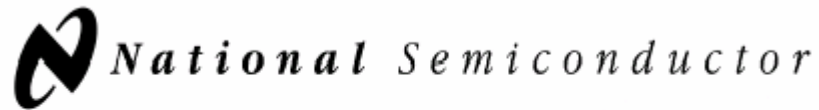
Fáze výstupního napětí posunuta o 180° (ideální případ zesilovače).

Operační zesilovač zesiluje rozdílové vstupní napětí



$A_{OL} = \textit{Open Loop gain}$ = zesílení s otevřenou smyčkou zpětné vazby

Operační zesilovač Open Loop Gain A_{OL}



LM741

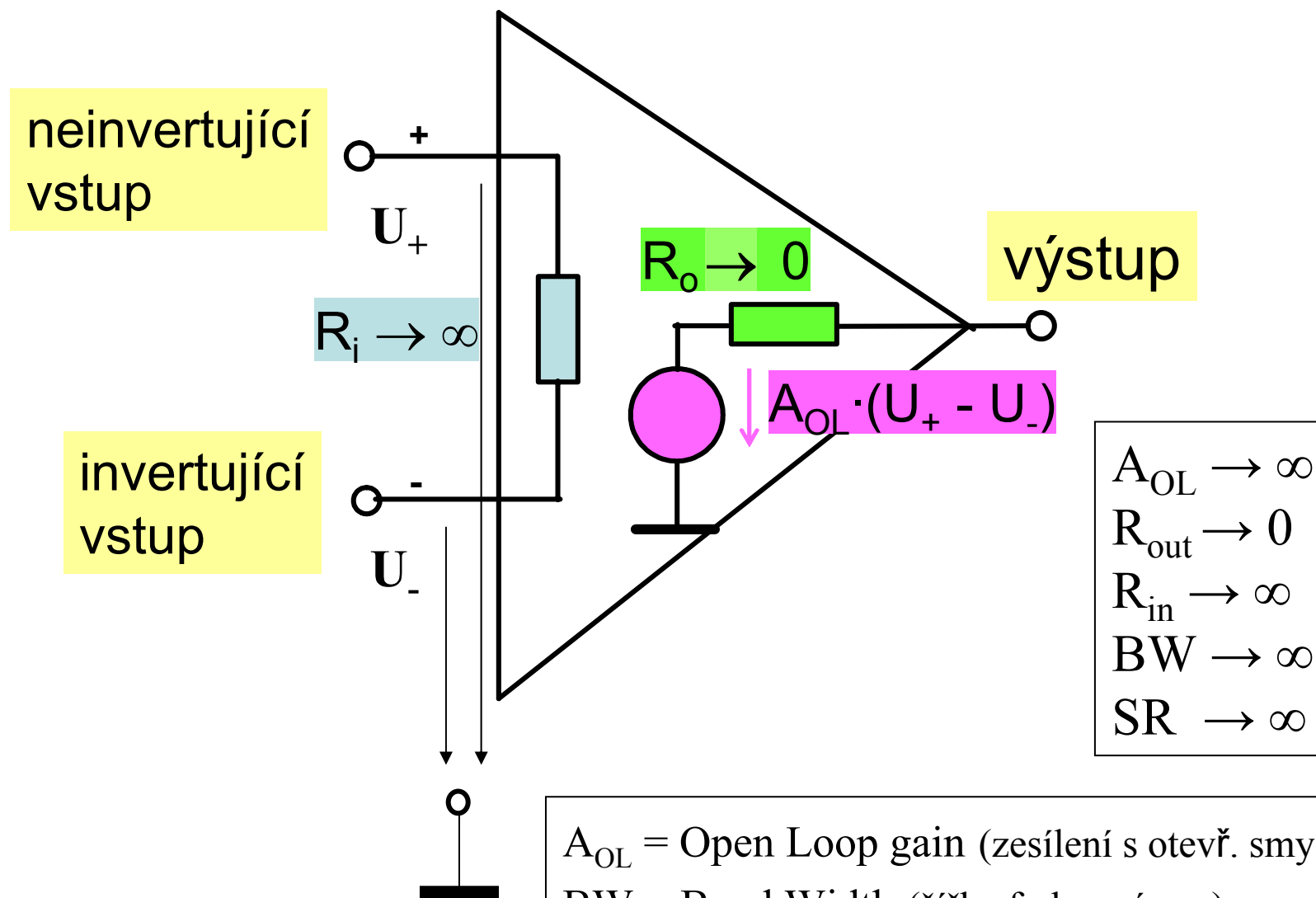
Electrical Characteristics (Note 5) (Continued)											
Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200		V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$	32									V/mV
	$V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$				25			15			V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$, $V_O = \pm 2\text{V}$	10									V/mV

LM741

$A_{OL} = \text{Open Loop gain} = \text{zesílení s otevřenou smyčkou zpětné vazby}$

$$A_{OL} = u_{\text{výst}} / u_{\text{vst}} = 2 \cdot 10^5$$

Ideální Operační zesilovač



A_{OL} = Open Loop gain (zesílení s otevř. smyčkou)

BW = Band Width (šířka frekv. pásma)

SR = Slew Rate (rychlost přeběhu)

Operační zesilovač

Ideální

$$A_{OL} \rightarrow \infty$$

$$R_{out} \rightarrow 0$$

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

$$BW \rightarrow \infty$$

$$SR \rightarrow \infty$$

a

reálný

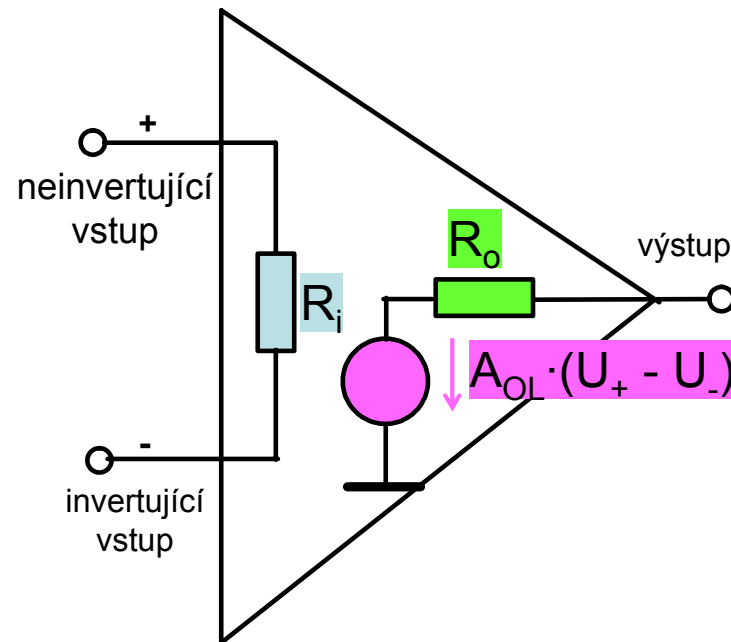
$$A_{OL} = 5 \cdot 10^4 - 10^6$$

$$R_{out} = 1 - 100 \, \Omega$$

$$R_{in} = 10^5 - 10^8 \, \Omega$$

$$BW = 5 \cdot 10^4 - 10^9 \, \text{Hz}$$

$$SR = 0,1 - 200 \, \text{V}/\mu\text{s}$$

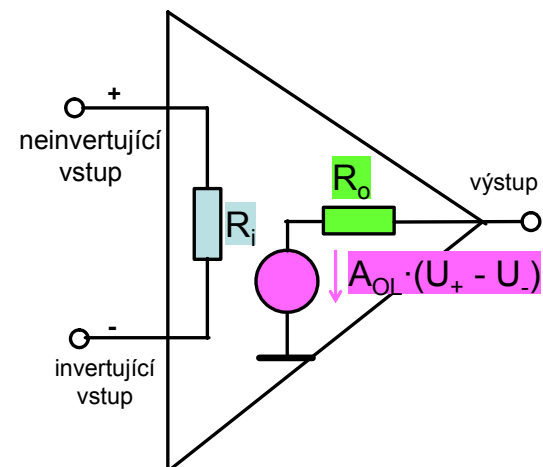


Reálný operační zesilovač

National Semiconductor

LM741

Operational Amplifier



Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	50									V/mV
	$V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$				50	200		20	200		V/mV
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M Ω
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}, V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M Ω
Bandwidth (Note 6)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}, \text{Unity Gain}$	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ μs

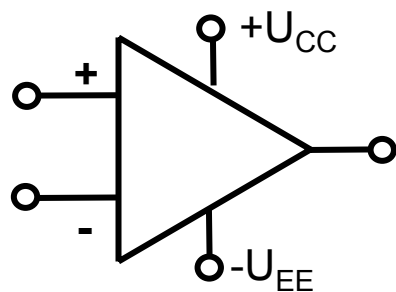
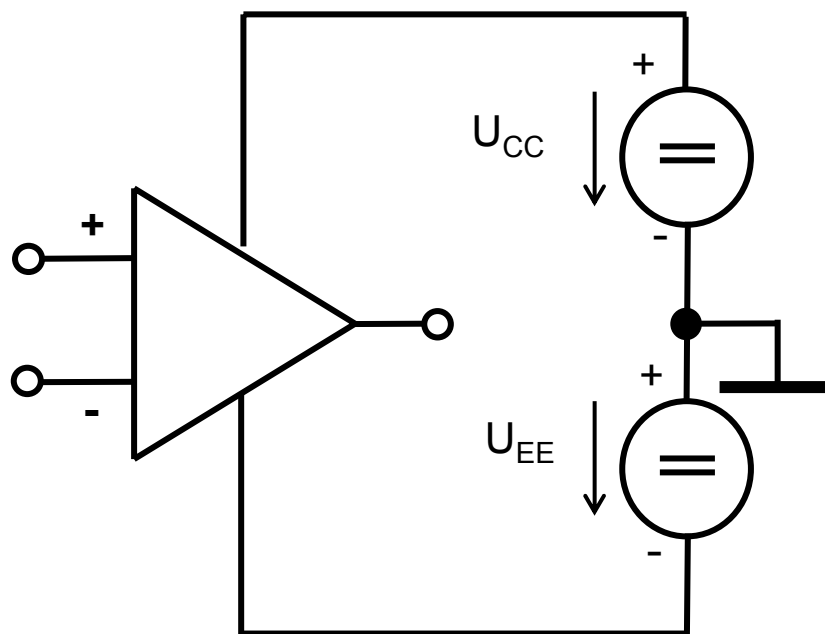
A_{OL} = Open Loop gain (zesílení s otevř. smyčkou)

BW = Bandwidth (šířka frekvenčního pásma)

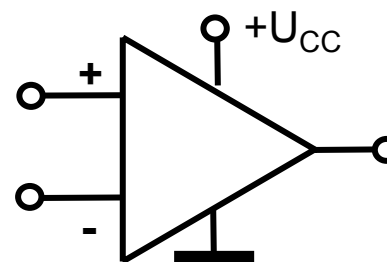
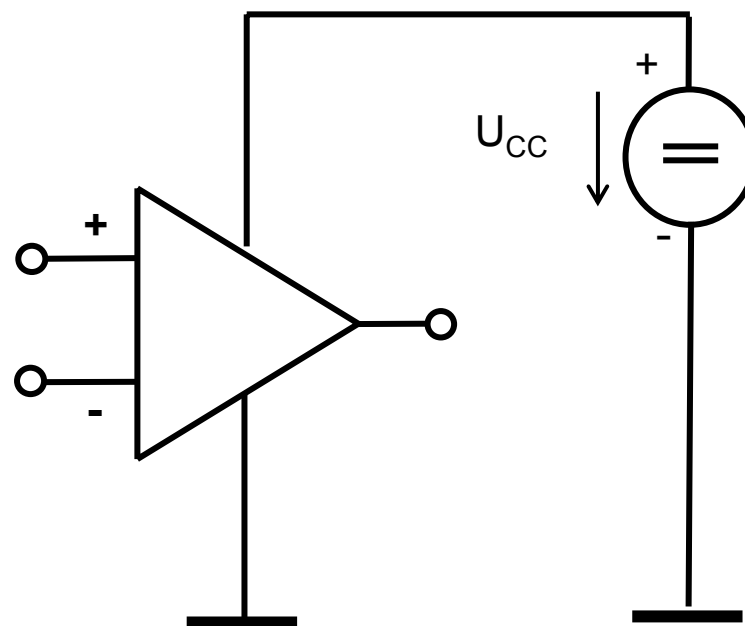
SR = Slew Rate (rychlost přeběhu)

Napájení operačního zesilovače

symetrické

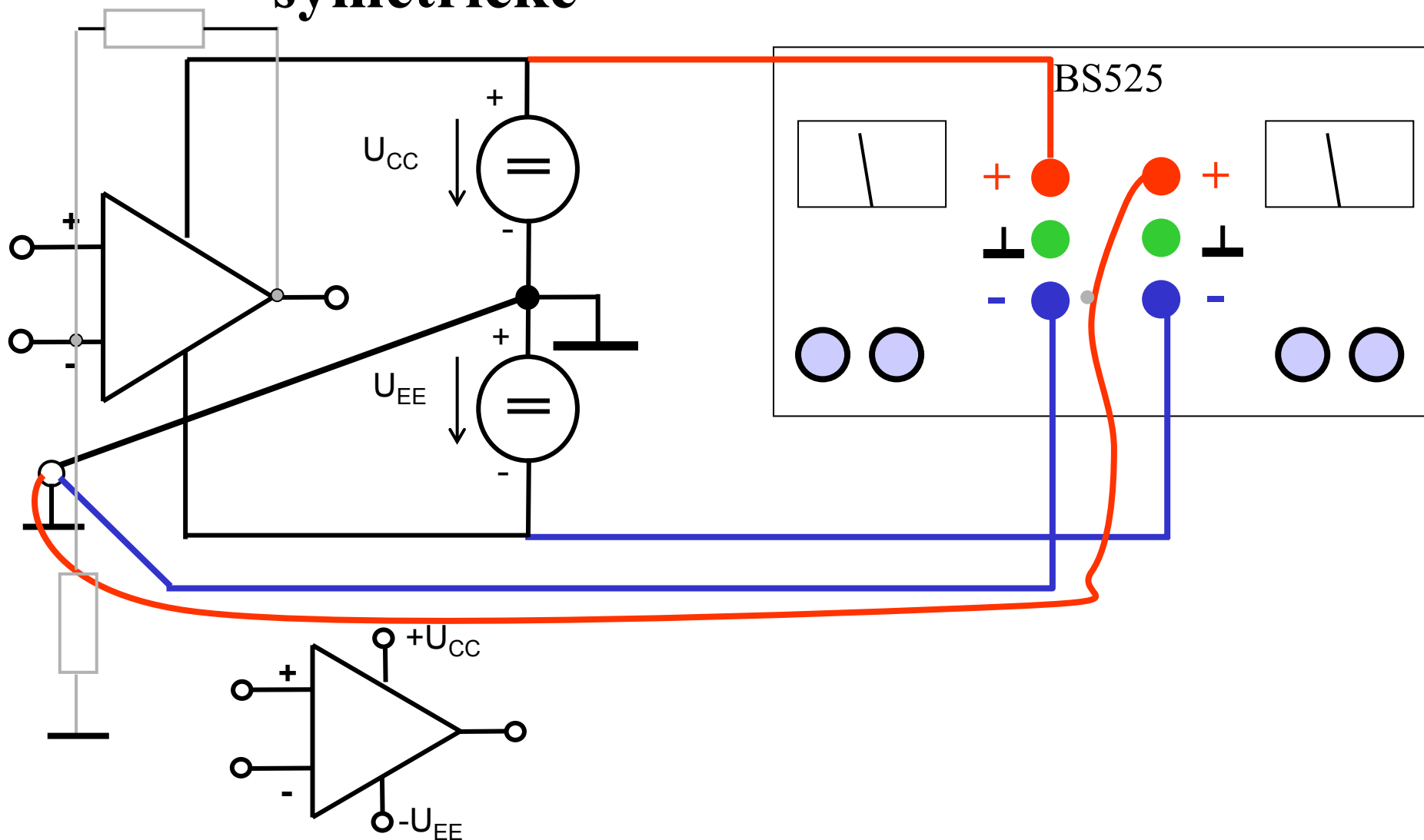


nesymetrické

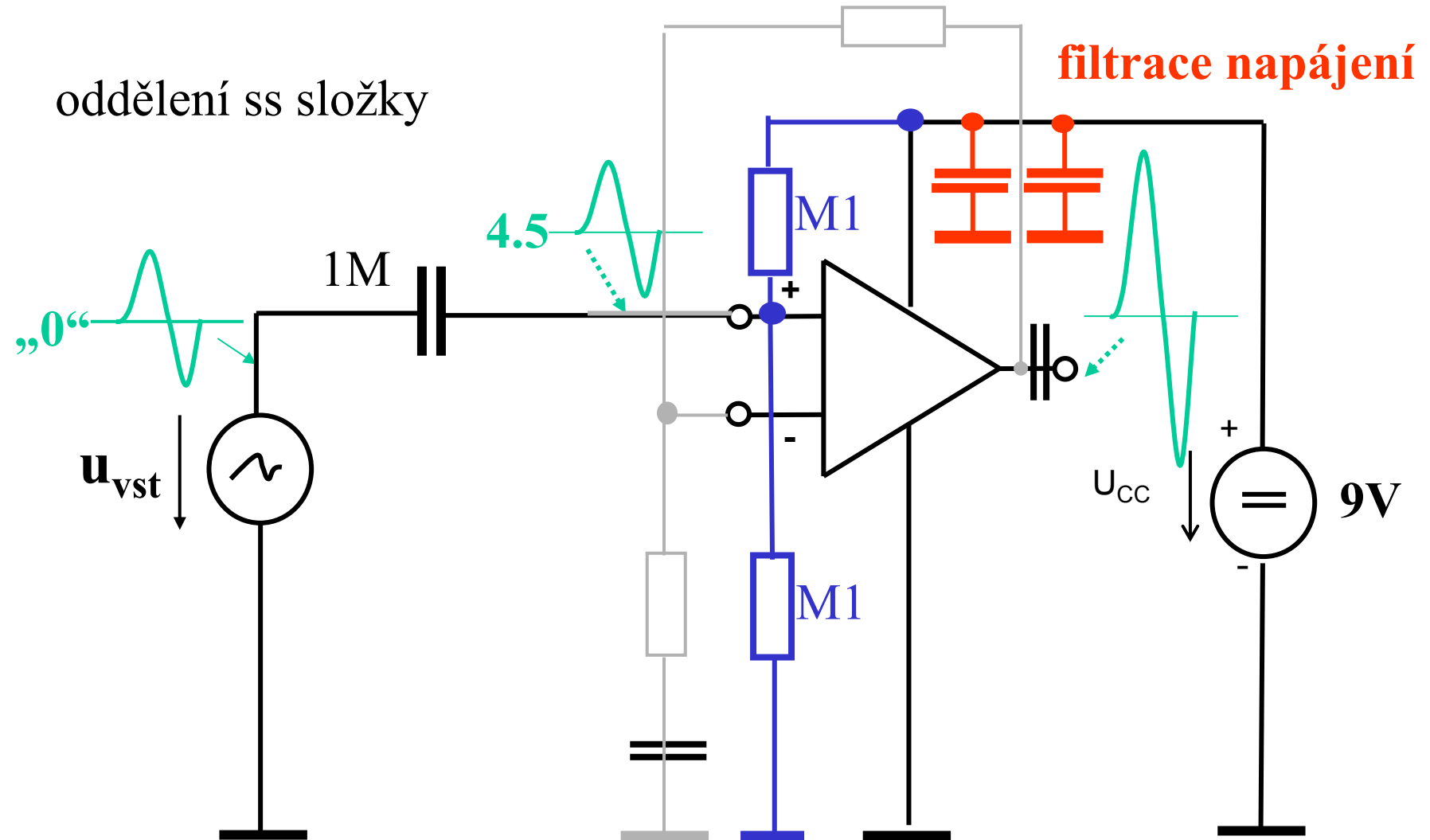


Napájení operačního zesilovače

symetrické



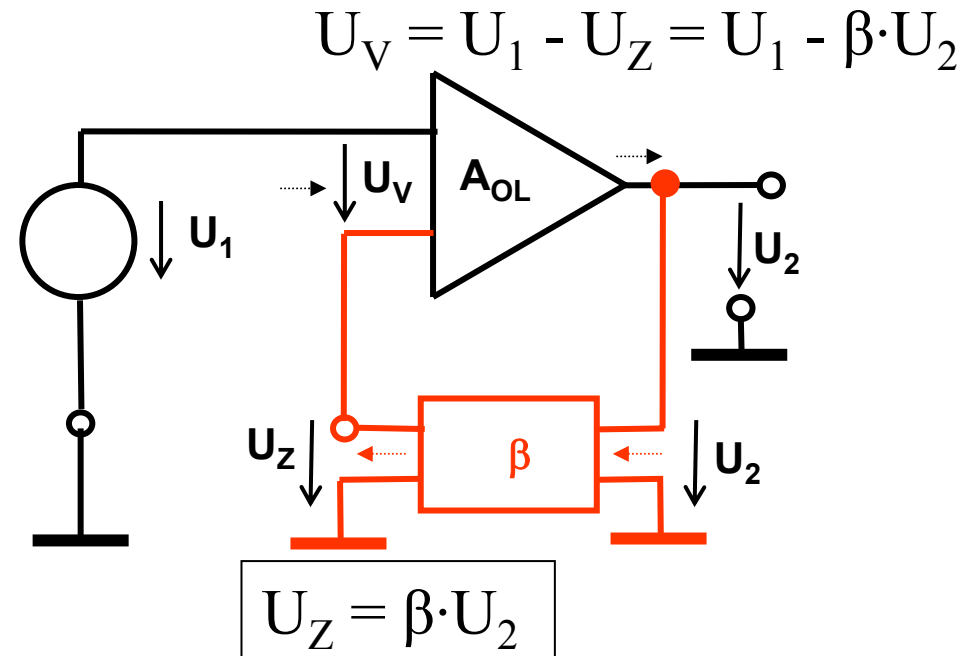
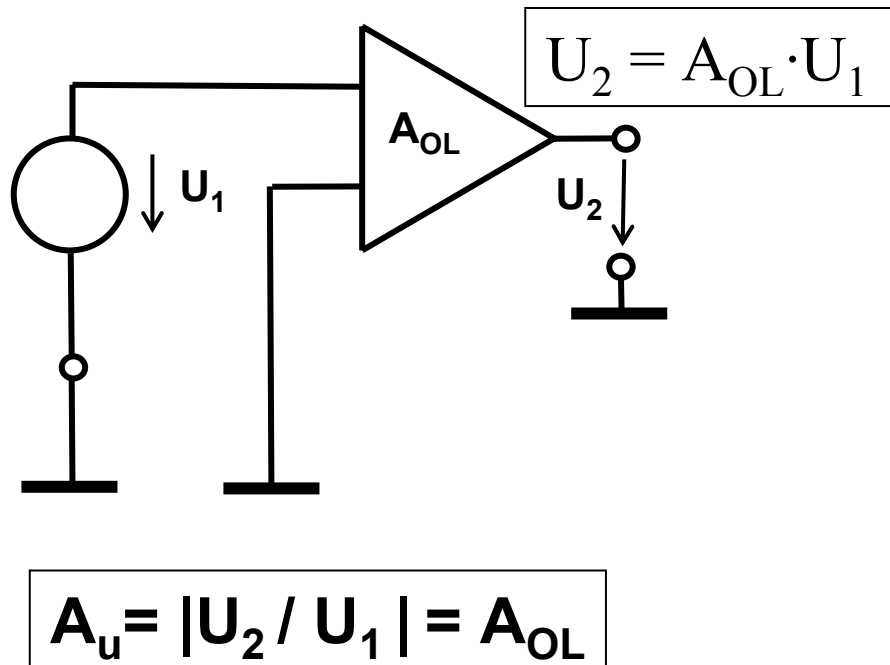
Nesymetrické napájení operačního zesilovače



umělý střed napětí a ss předpětí vstupu

Zpětná vazba (*feedback*)

= cesta, kterou se přenáší část výstupního napětí zpět na vstup



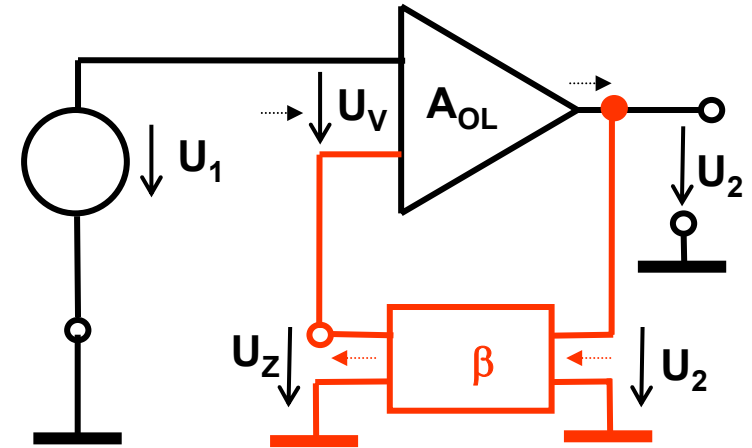
$$U_2 = A_{OL} \cdot U_V = A_{OL} \cdot (U_1 - \beta \cdot U_2) = A_{OL} \cdot U_1 - \beta \cdot A_{OL} \cdot U_2$$

$$\text{Closed Loop gain: } A_{CL} = |U_2 / U_1| = A_{OL} / (1 + \beta A_{OL})$$

Záporná zpětná vazba

$$A_{CL} = |U_2 / U_1| = A_{OL} / (1 + \beta A_{OL})$$

> 1

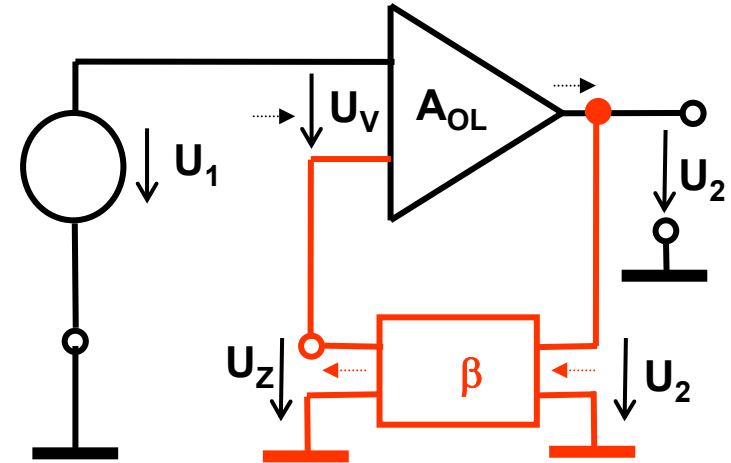


Je-li přenos napětí zpětnovazební smyčky kladný
 $\beta \cdot A_{OL} > 0$,
zpětnovazební napětí U_z působí proti vstupnímu napětí U_1
výsledný přenos celého obvodu se snižuje
 $\Rightarrow A_{CL} < A_{OL}$.

Zpětná vazba je záporná.

Záporná zpětná vazba

$$A_{CL} = |U_2 / U_1| = A_{OL} / (1 + \beta A_{OL})$$



Pro ideální OZ s $A_{OL} \rightarrow \infty$ a tedy $1/A_{OL} \rightarrow 0$:

$$A_{CL, A_{OL} \rightarrow \infty} = \frac{A_{OL}}{(1 + \beta \cdot A_{OL})} = \frac{1}{\left(\underbrace{\frac{1}{A_{OL}}}_{=0} + \beta \right)} = \frac{1}{\beta}$$

A_{CL} nezávisí na A_{OL}

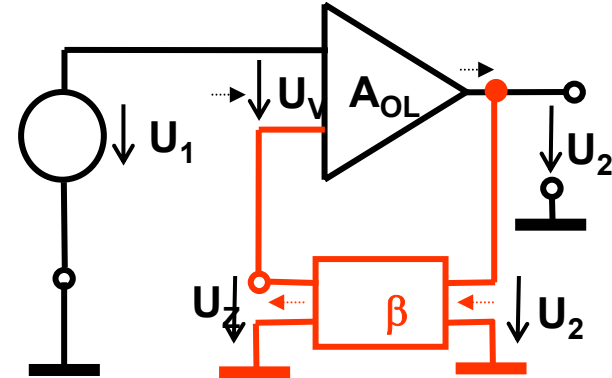
A_{CL} závisí pouze na přenosu zpětné vazby β .

Vlastnosti a parametry zapojení s ideálním OZ se zápornou zpětnou vazbou závisí jen na prvcích zpětné vazby.

Kladná zpětná vazba

$$A_{CL} = |U_2 / U_1| = A_{OL} / (1 + \beta A_{OL})$$

< 1



Je-li přenos napětí zpětnovazební smyčky záporný

$$\beta \cdot A_{OL} < 0,$$

zpětnovazební napětí působí souhlasně se vstupním napětí U_1

výsledný přenos celého obvodu se zvyšuje

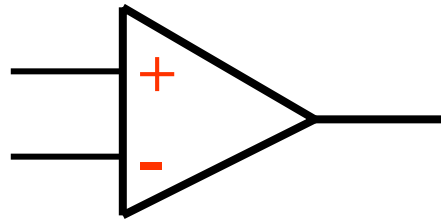
$$\Rightarrow A_{CL} > A_{OL}.$$

Zpětná vazba je kladná.

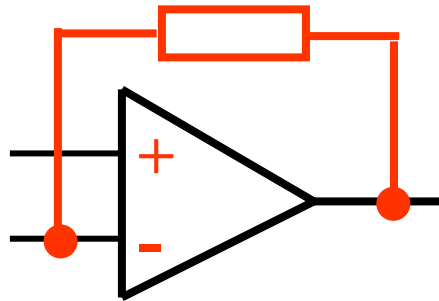
Pro případ $\beta \cdot A_{OL} = -1$ je $A_{CL} \rightarrow \infty$:

Zesilovač samovolně **kmitá** (aplikace: oscilátor).

Zpětná vazba



OZ bez zpětné vazby

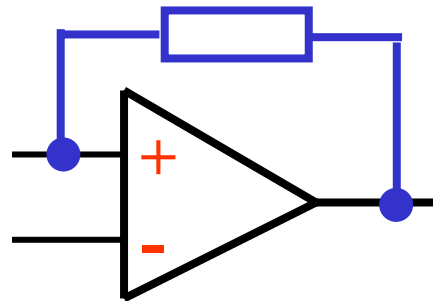


ZÁPORNÁ ZPĚTNÁ VAZBA

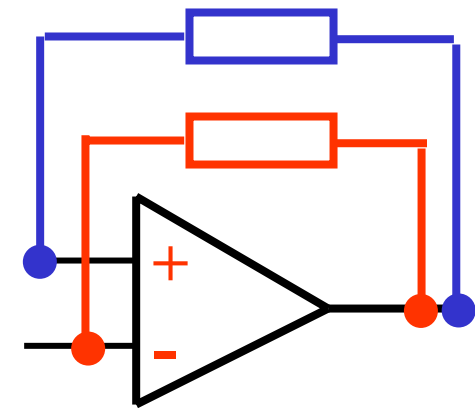
vede z výstupu do **invertujícího** vstupu

KLADNÁ ZPĚTNÁ VAZBA

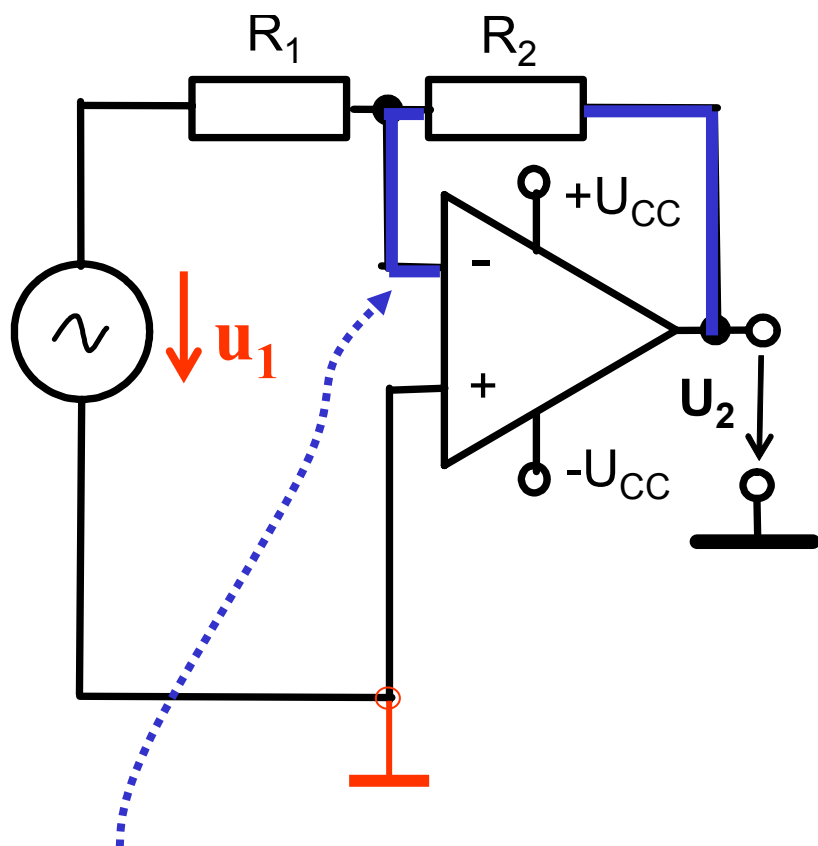
vede z výstupu do **neinvertujícího** vstupu



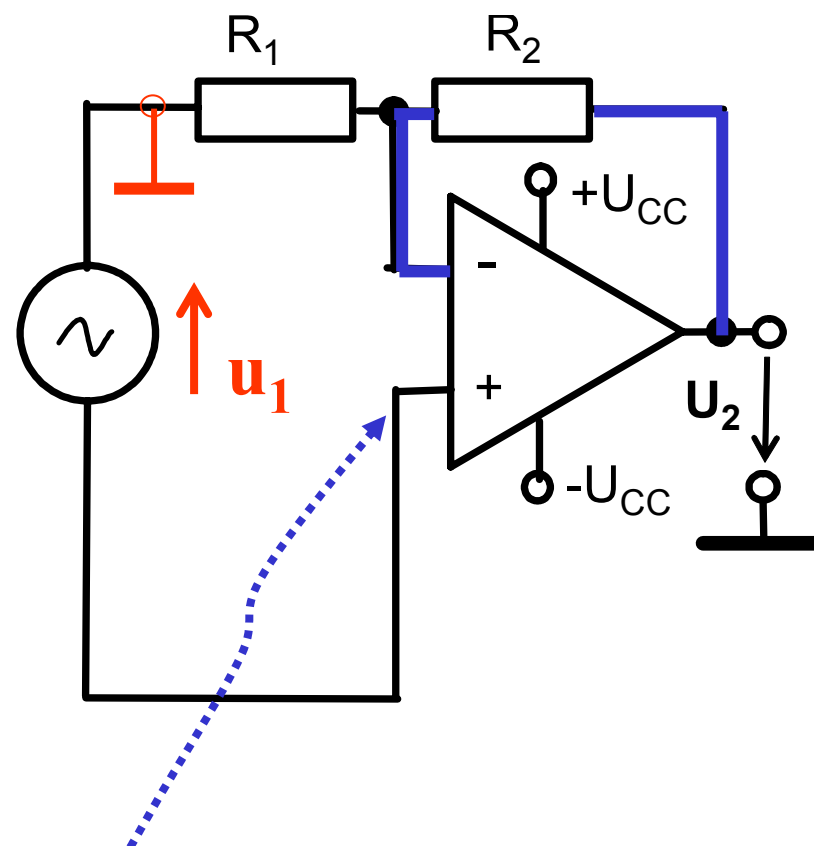
ZÁPORNÁ A KLADNÁ ZPĚTNÁ VAZBA



OZ se zápornou zpětnou vazbou



Invertující zesilovač s OZ
(vstup do invertujícího vstupu)



Neinvertující zesilovač s OZ
(vstup do **n**einvertujícího vstupu)

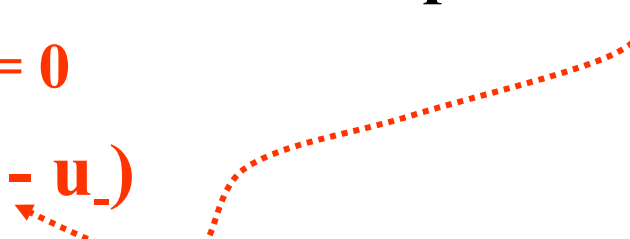
Zlatá pravidla OZ se zápornou zpětnou vazbou

Pravidlo 1:

„OZ se vždy pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.“

$$u_{\text{výst}} = A_{\text{OL}} \cdot (u_+ - u_-)$$

$= \infty$ $= 0$



ideální OZ

$$A_{\text{OL}} \rightarrow \infty$$

$$R_{\text{out}} \rightarrow 0$$

$$R_{\text{in}} \rightarrow \infty$$

$$BW \rightarrow \infty$$

$$SR \rightarrow \infty$$

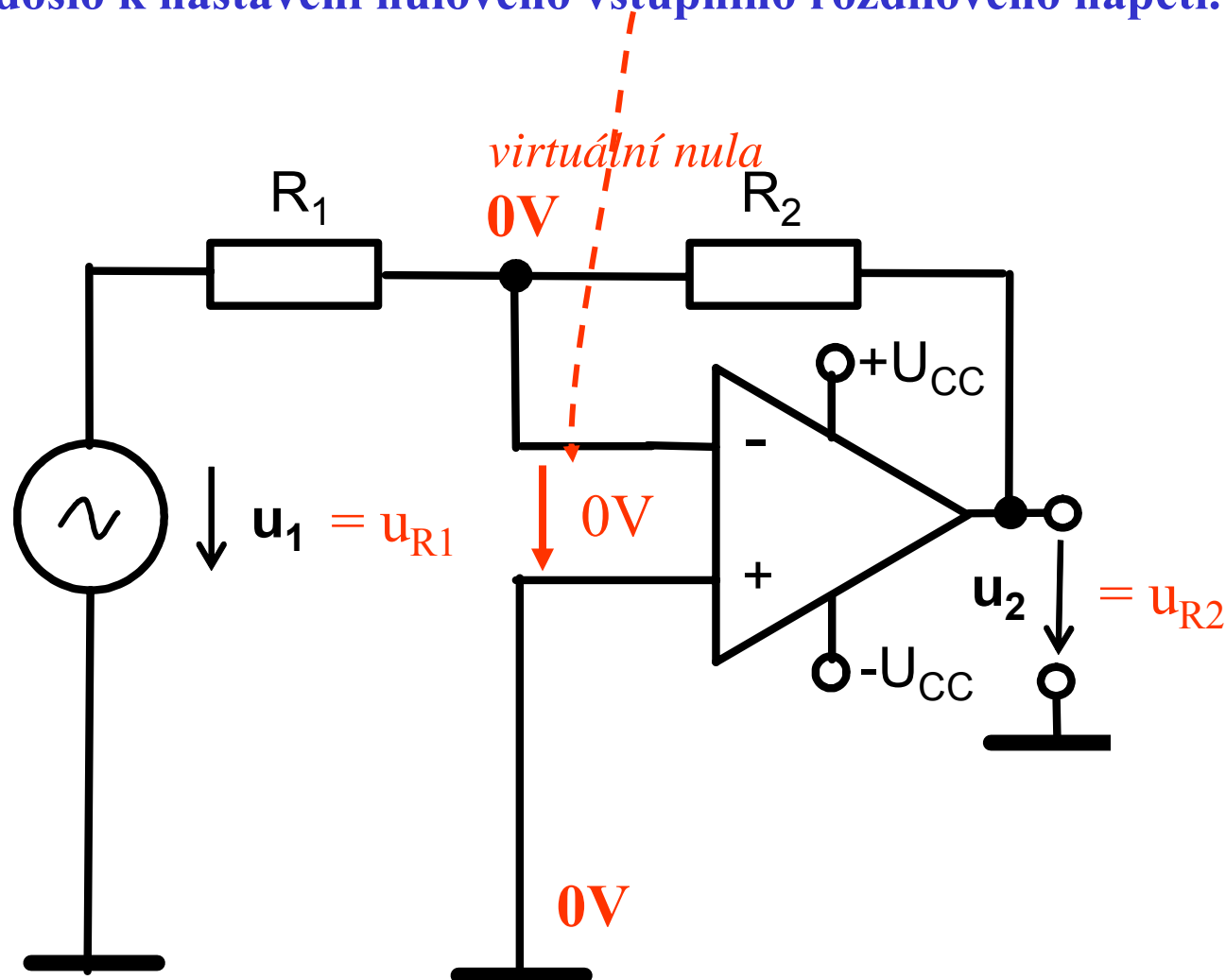
Pravidlo 2:

„Do vstupů OZ neteče proud.“



Invertující zesilovač s OZ

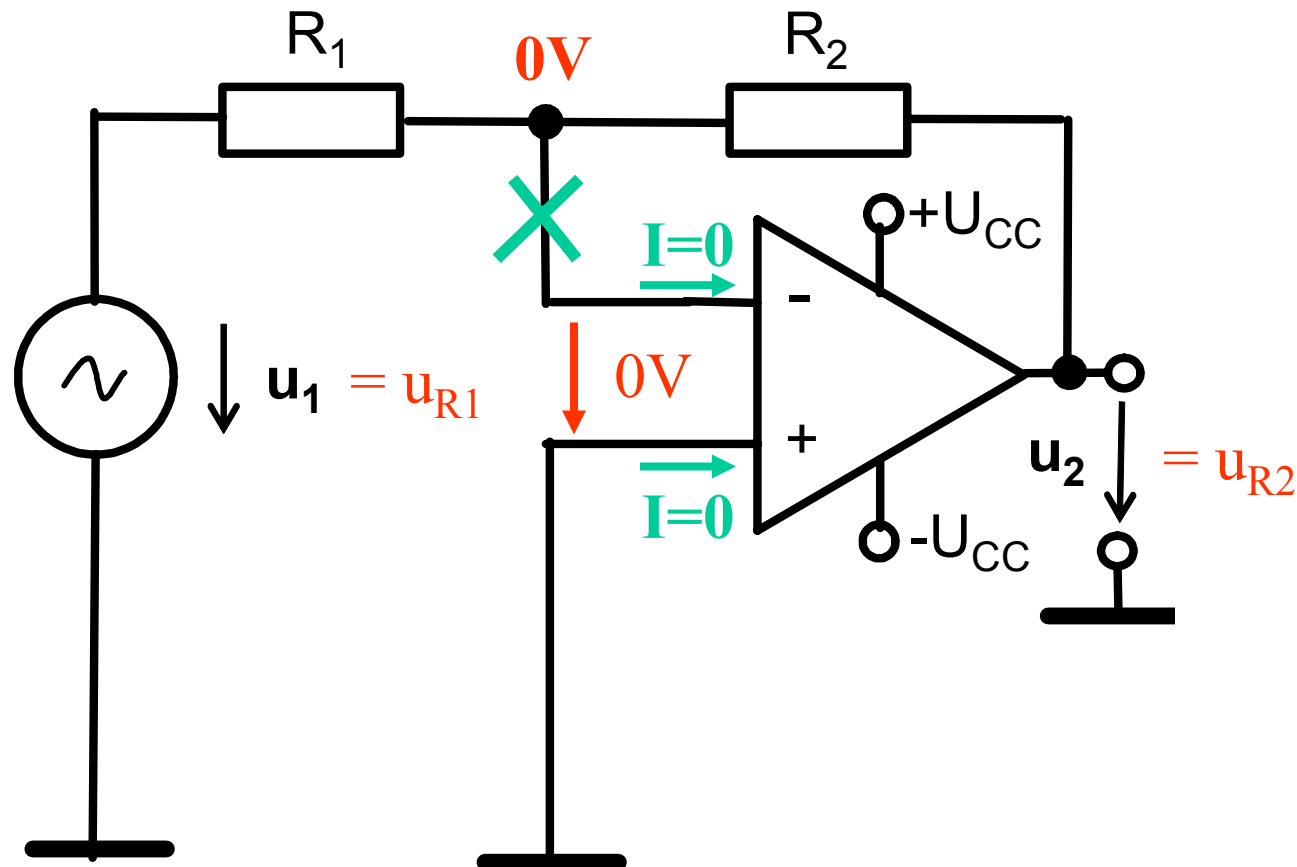
1. OZ se pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.



Invertující zesilovač s OZ

1. OZ se pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.

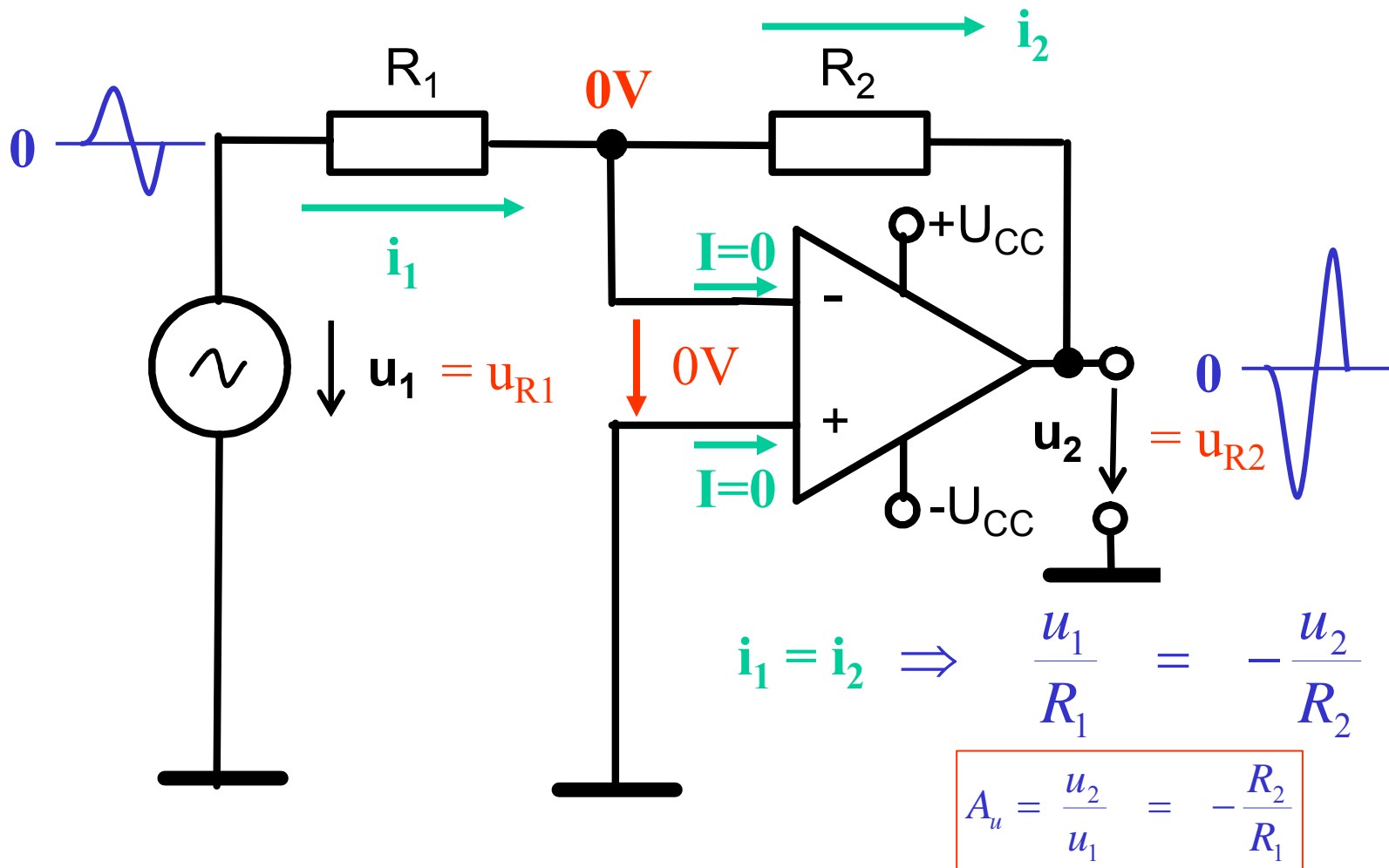
2. Do vstupů OZ neteče proud. $I=0$



Invertující zesilovač s OZ

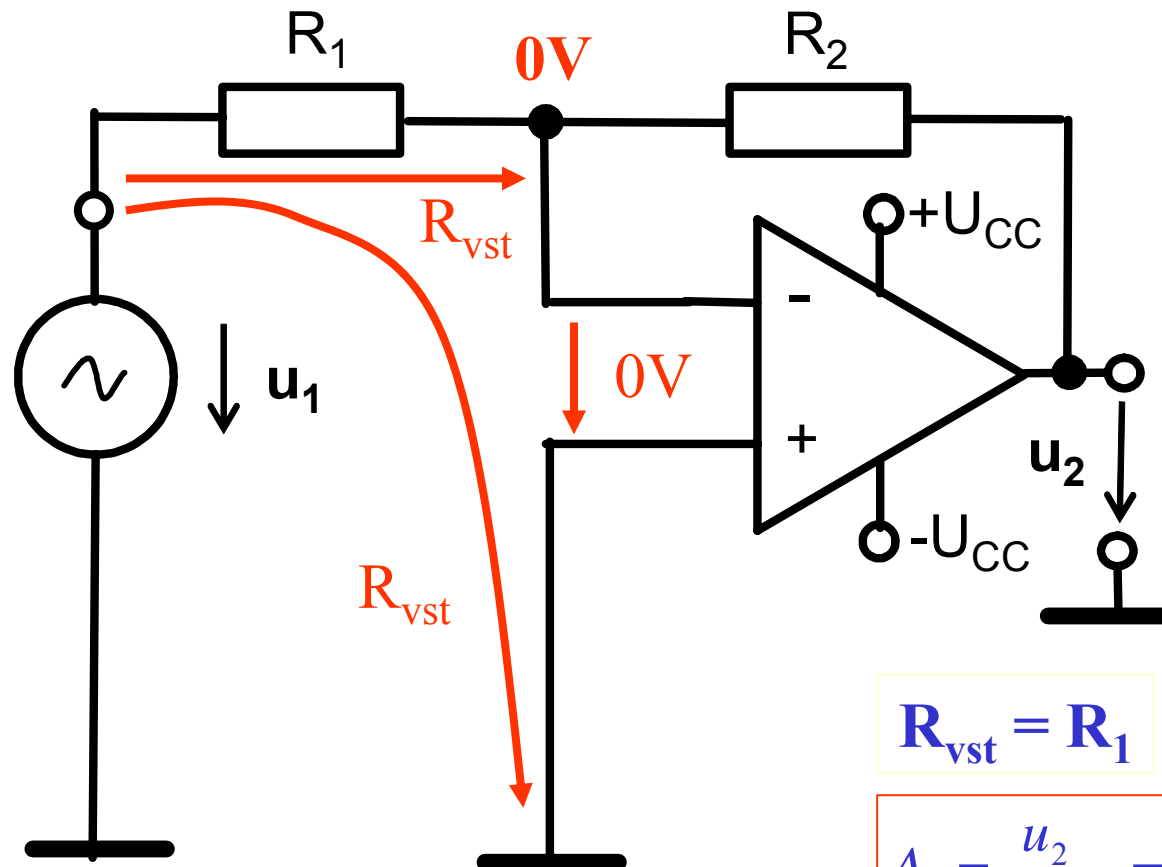
1. OZ se pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.

2. Do vstupů OZ neteče proud. $I=0$



Invertující zesilovač s OZ

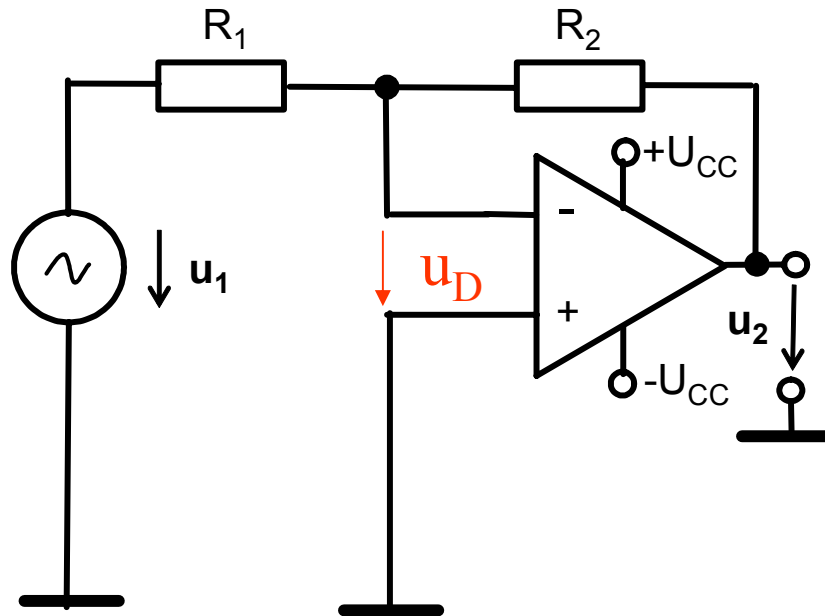
1. OZ se pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.
2. Do vstupů OZ neteče proud.



$$R_{vst} = R_1$$

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Příklad: $|A_u| = |A_{CL}| = 100$, rozkmit signálu $u_{\text{výstmax}} = 5\text{V}$,
 $R_{\text{vst}} = 1\text{k}$. $R_1 = ?$, $R_2 = ?$, $U_{CC} = ?$, $U_{EE} = ?$ pro ideální OZ.



$u_{\text{výstmax}} = 5\text{V} \Rightarrow$ s rezervou 1V volíme:
 $U_{CC} = 6\text{V}$, $U_{EE} = 6\text{V}$

$$R_{\text{vst}} = R_1 = 1\text{k}$$

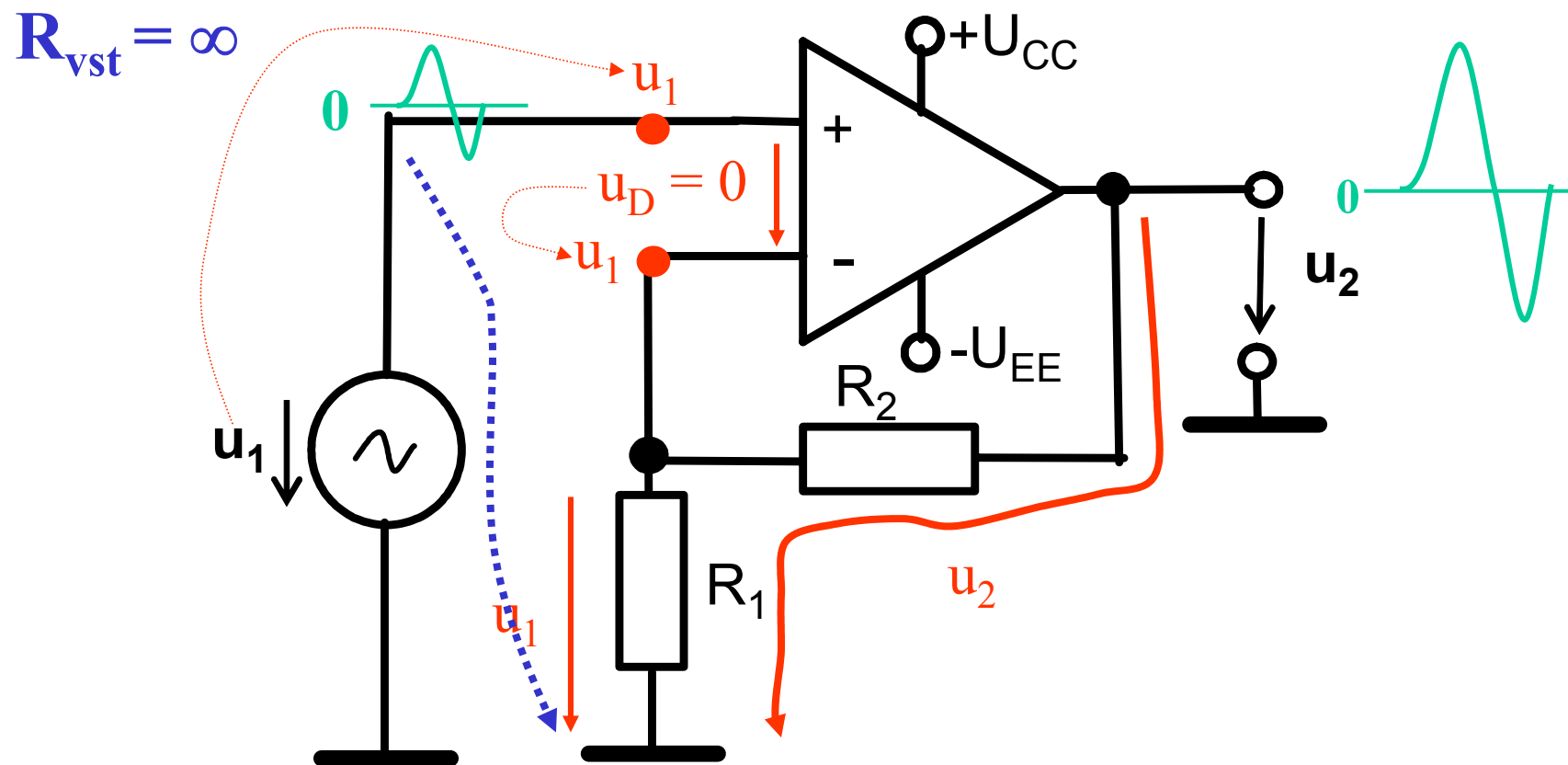
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow$$

$$R_2 = |A_u| \cdot R_1 = 100 \cdot 1\text{k} = 100\text{k}$$

$u_{D\text{max}} = ?$ pro reálný OZ typu 741 ($A_{OL} = 2 \cdot 10^5$):

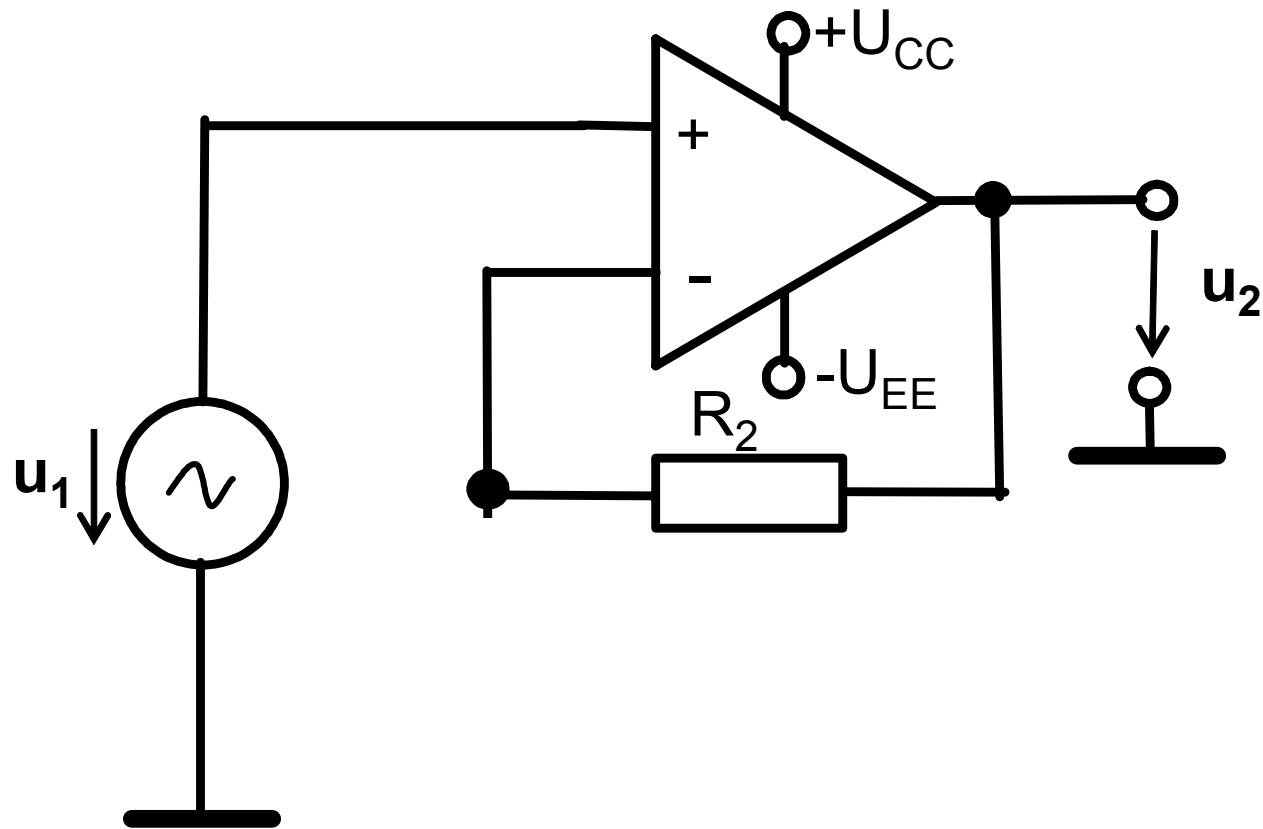
$$u_D = \frac{u_2}{A_{OL}} = \frac{6}{2 \cdot 10^5} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ V} = 30 \mu\text{V}$$

Neinvertující zesilovač s OZ



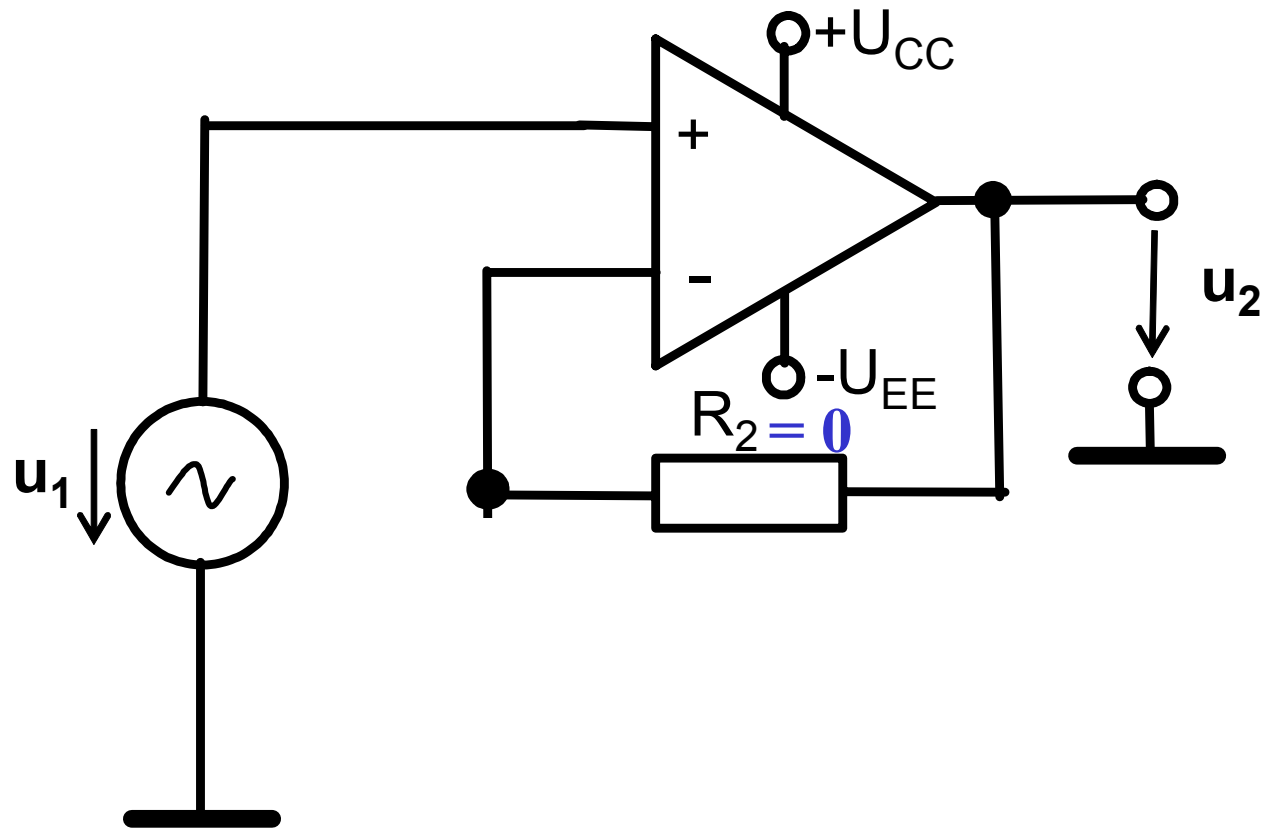
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Sledovač napětí s OZ (*Follower, Buffer*)



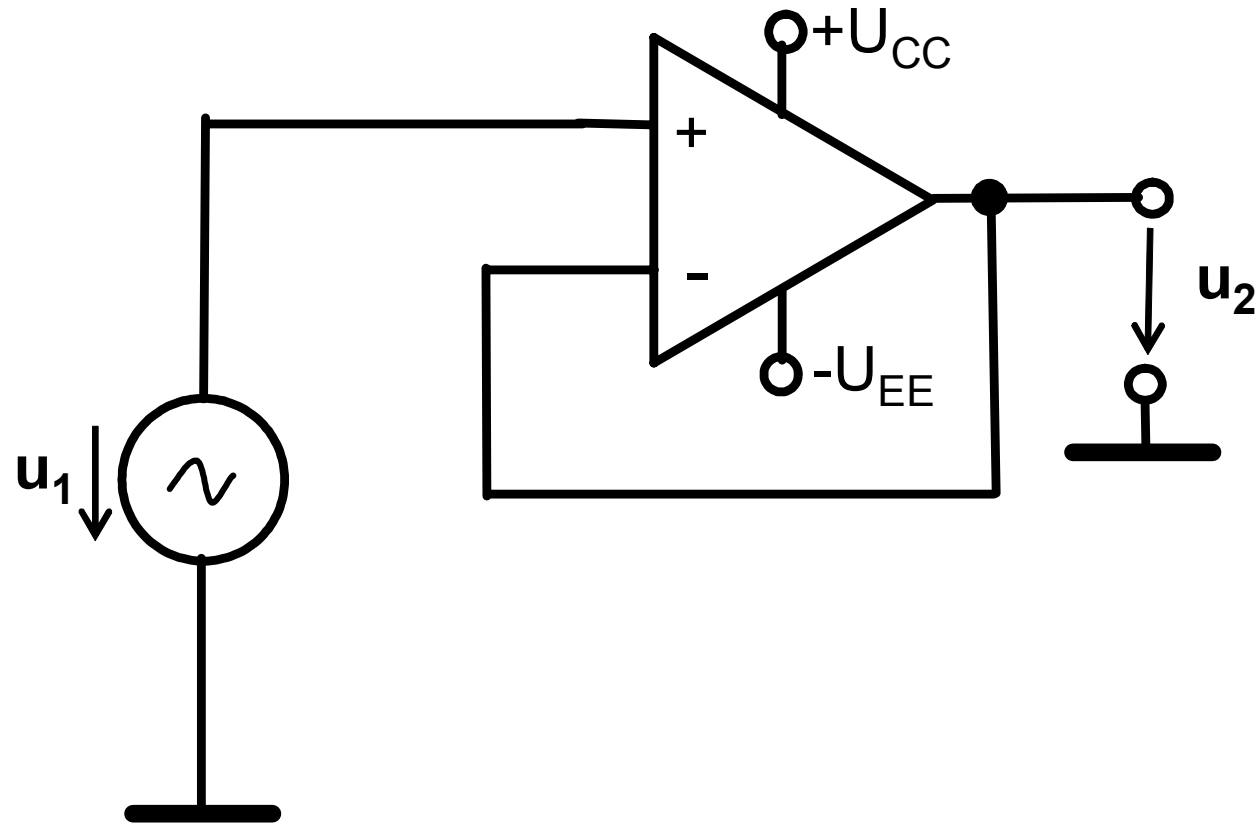
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{\infty} = 1$$

Sledovač napětí s OZ (*Follower, Buffer*)



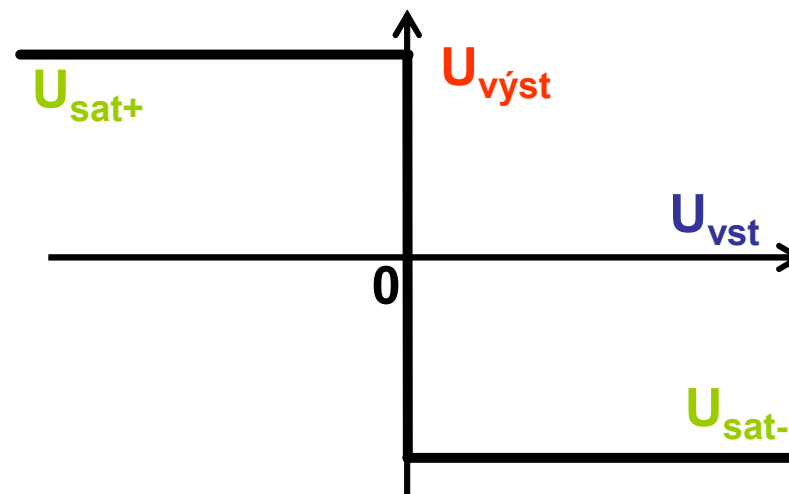
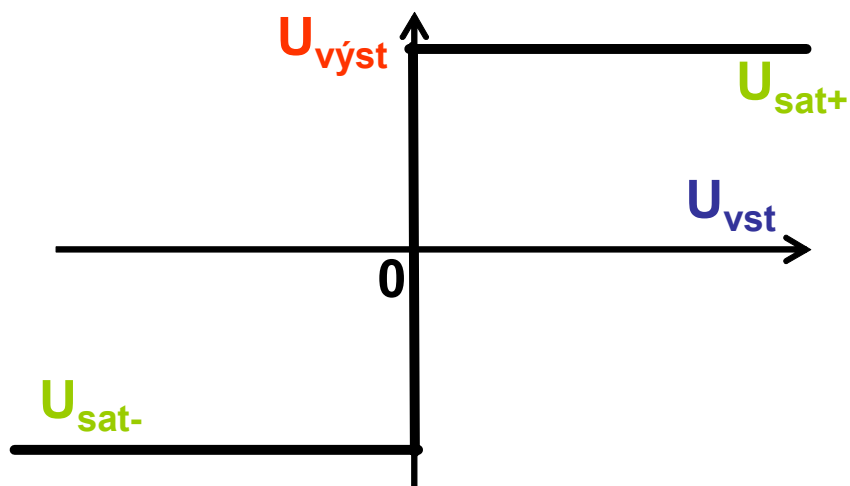
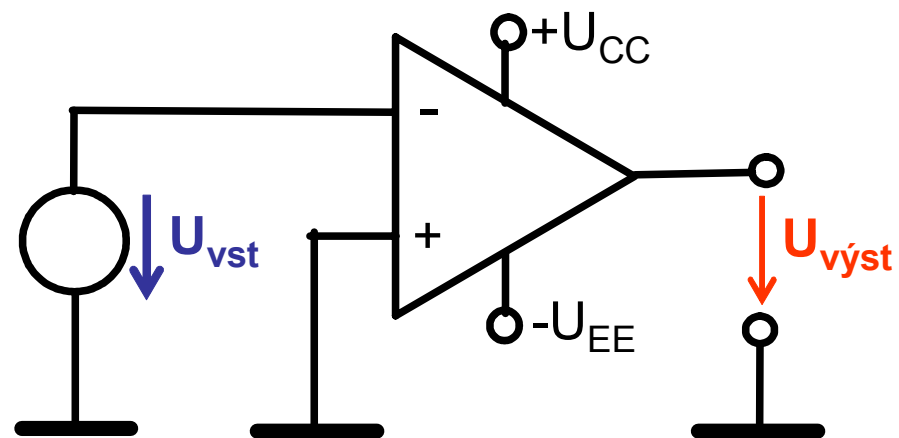
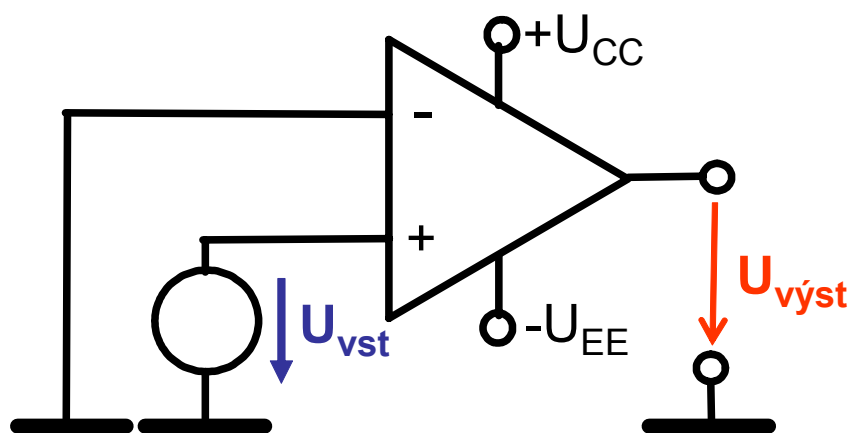
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

Sledovač napětí s OZ (*Follower, Buffer*)



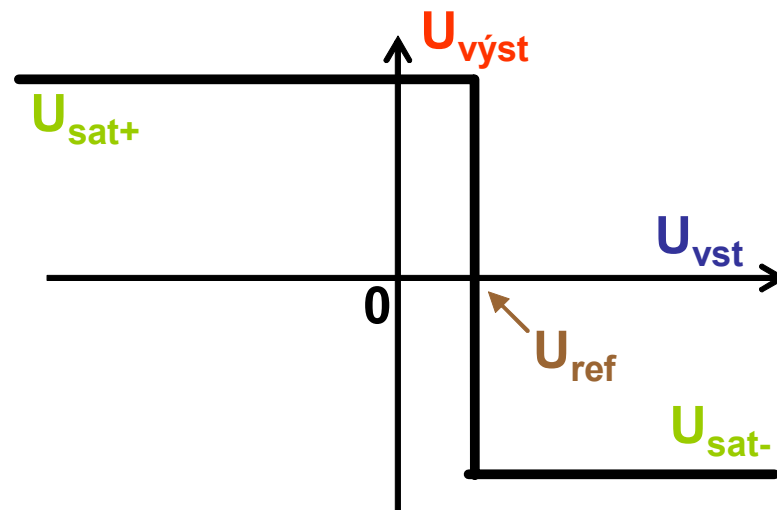
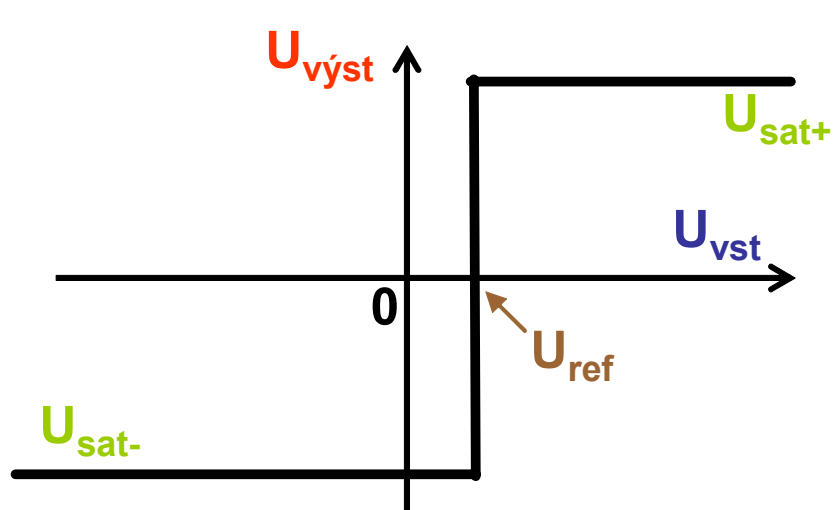
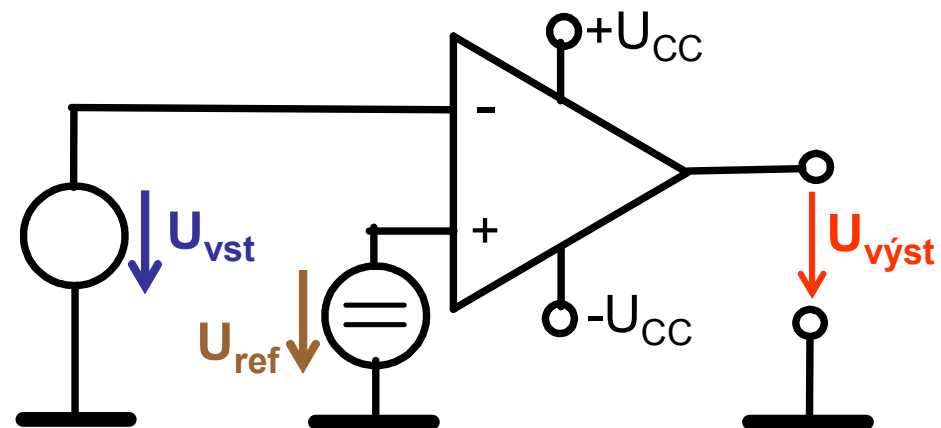
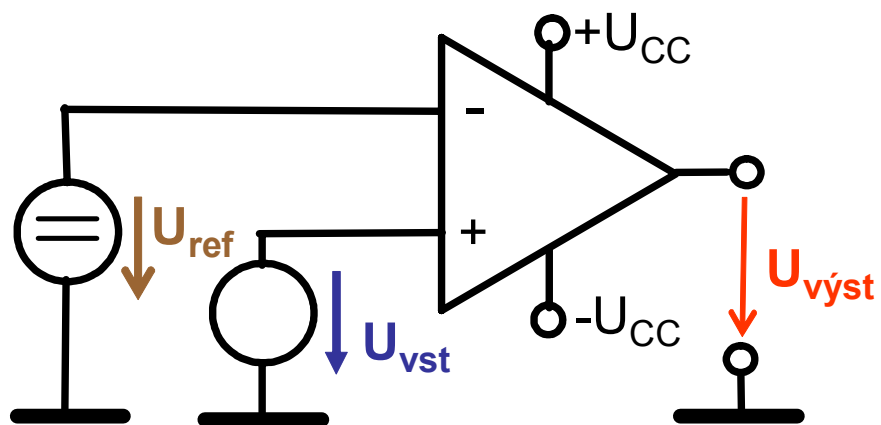
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

OZ bez zpětné vazby

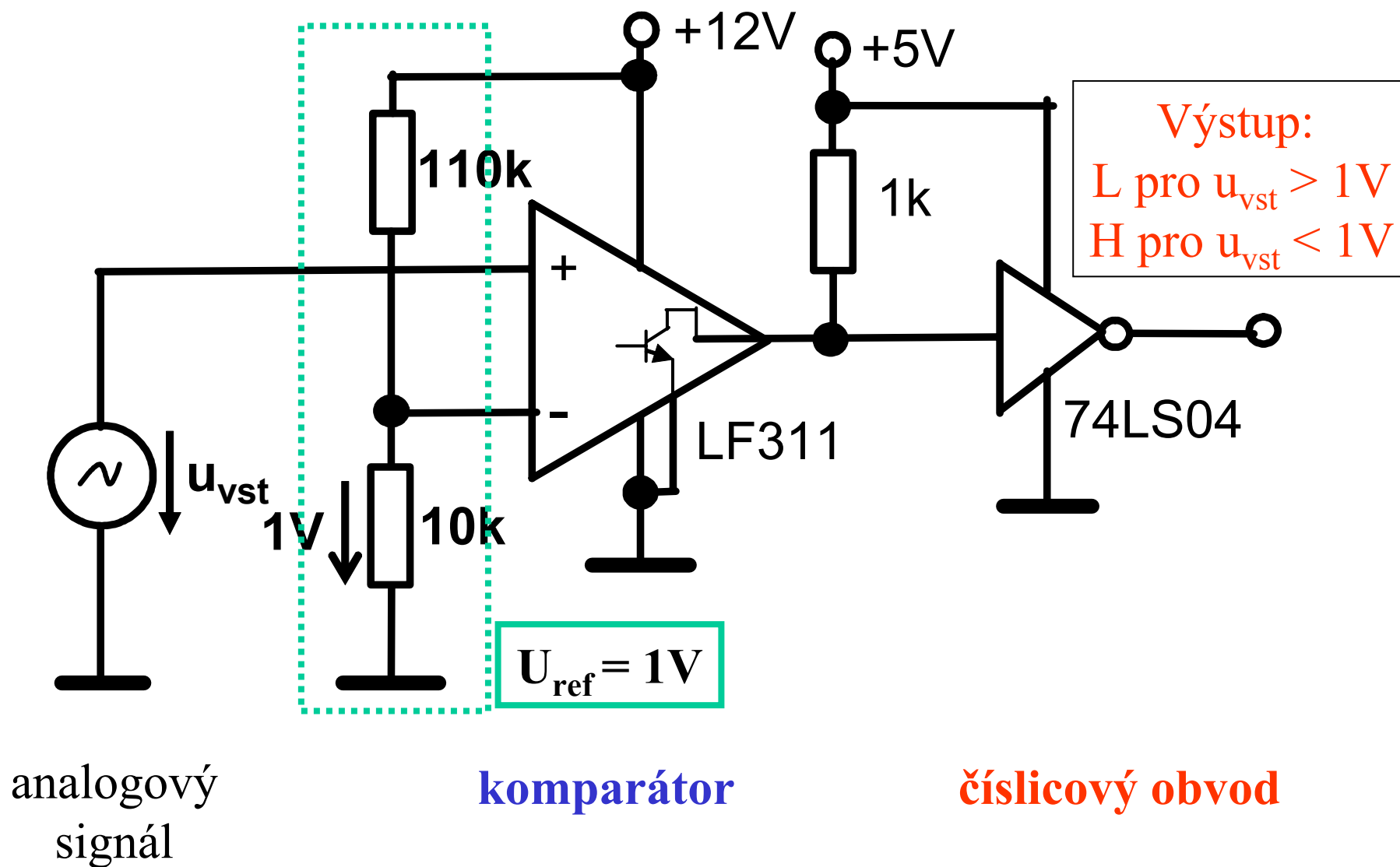


*Zlatá pravidla **neplatí!** Nejedná se o zápornou zpětnou vazbu.*

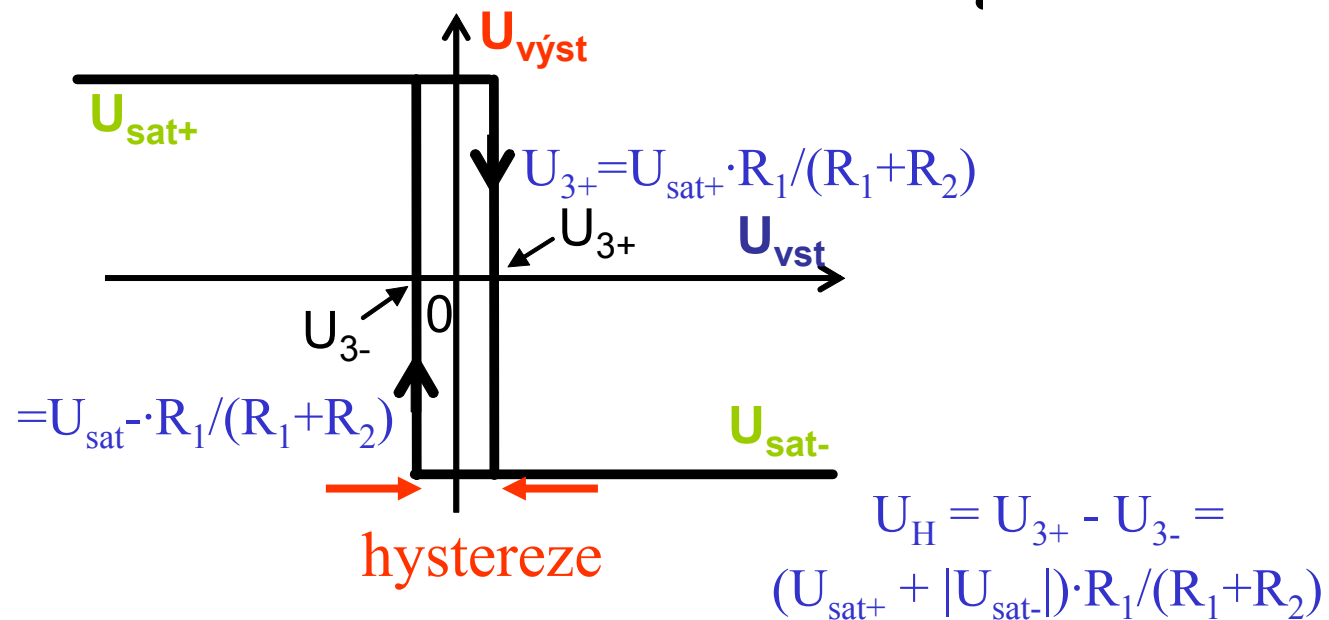
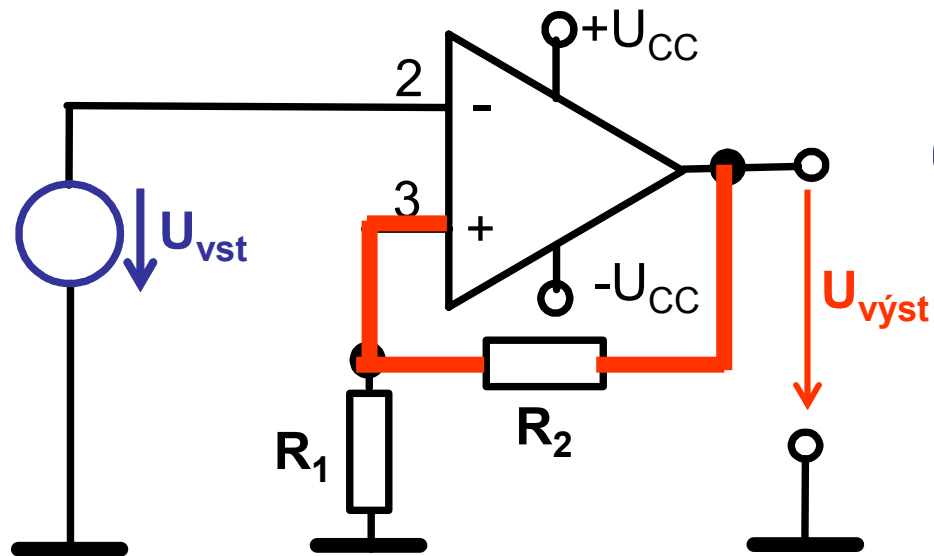
OZ bez zpětné vazby -komparátor



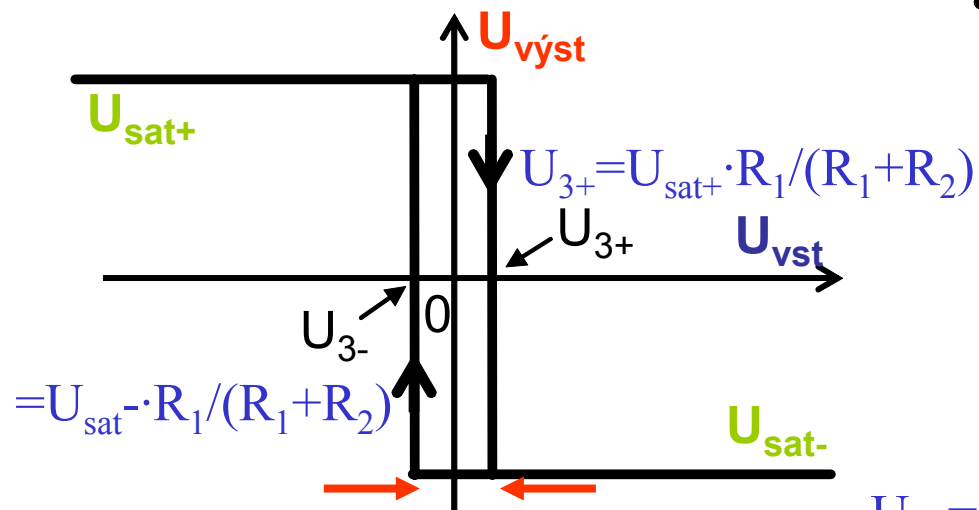
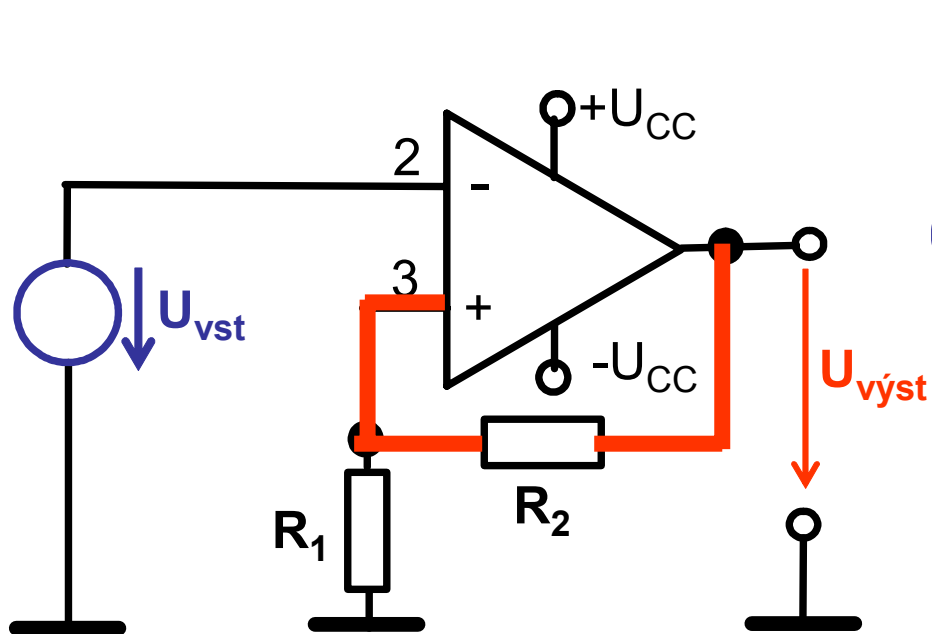
Komparátor - příklad



OZ a kladná zpětná vazba

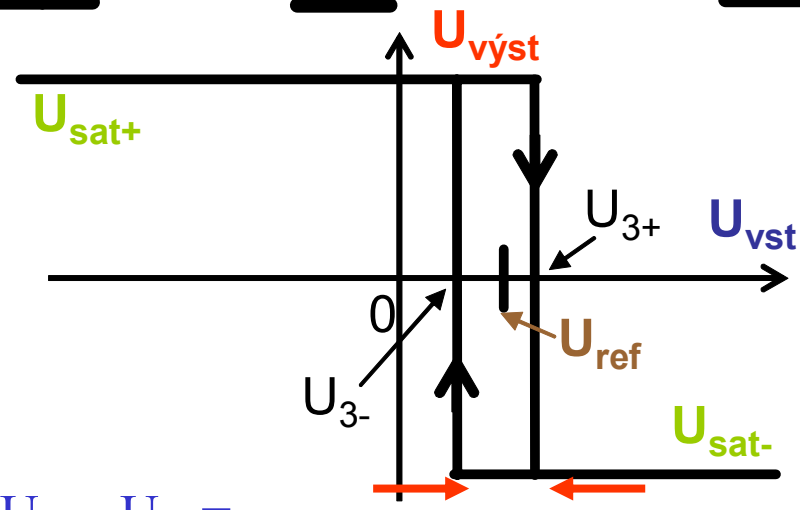
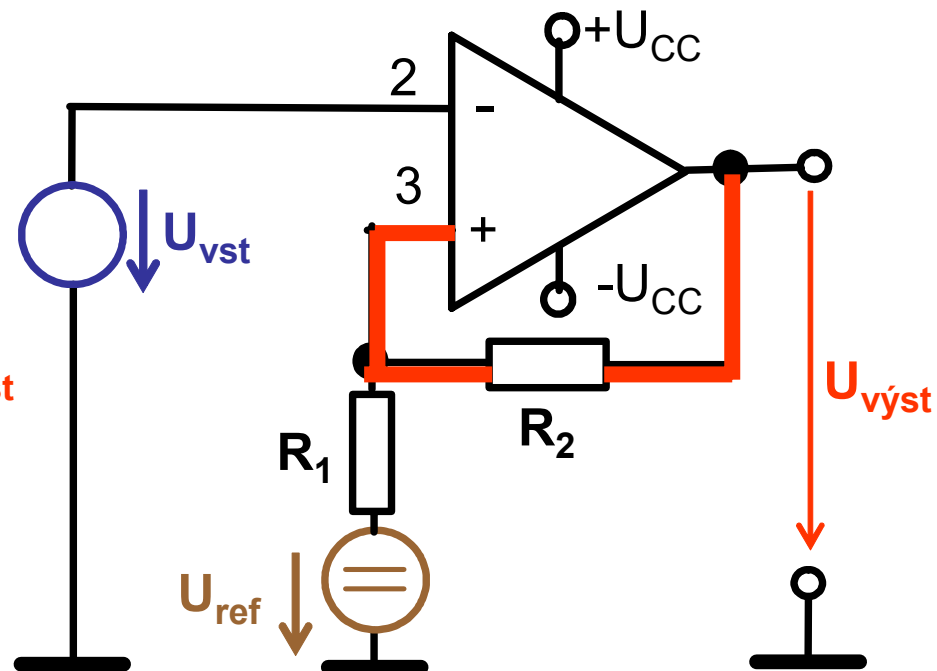


OZ a kladná zpětná vazba



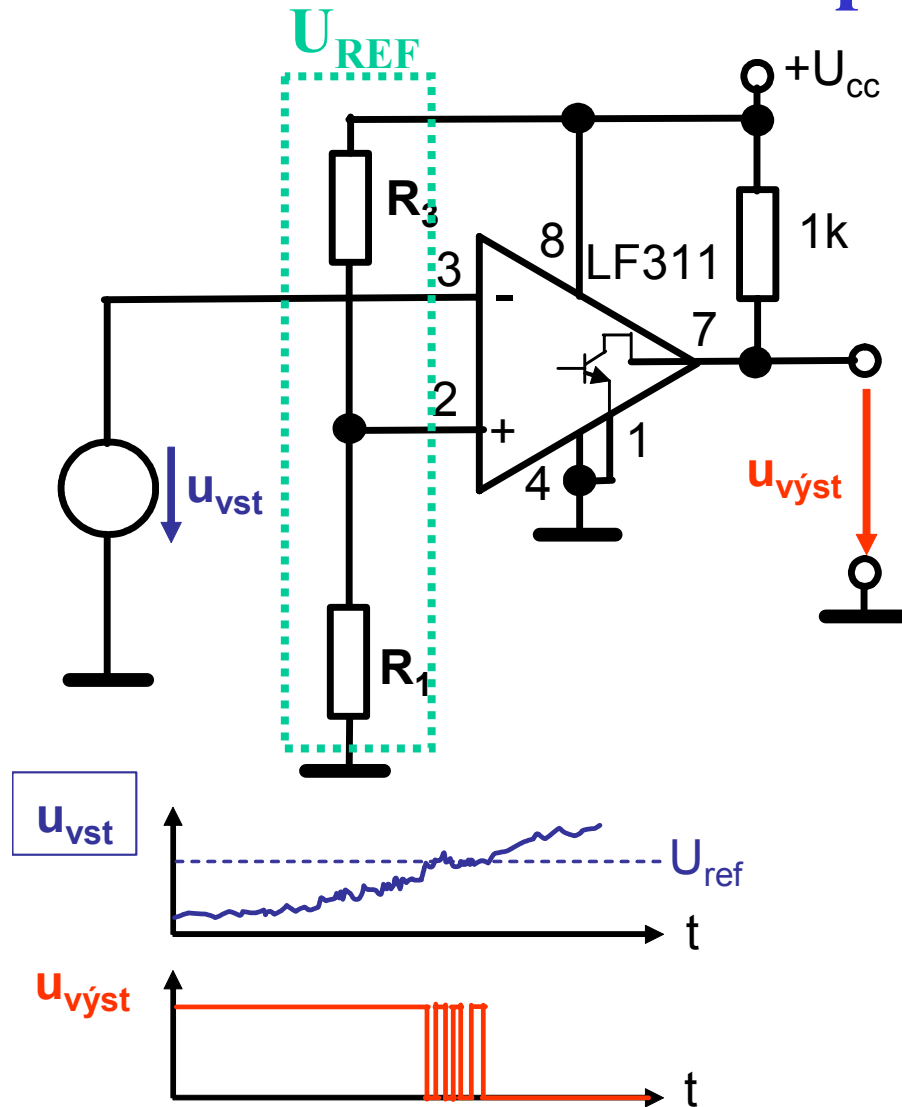
hystereze

$$U_H = U_{3+} - U_{3-} = (U_{sat+} + |U_{sat-}|) \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$$

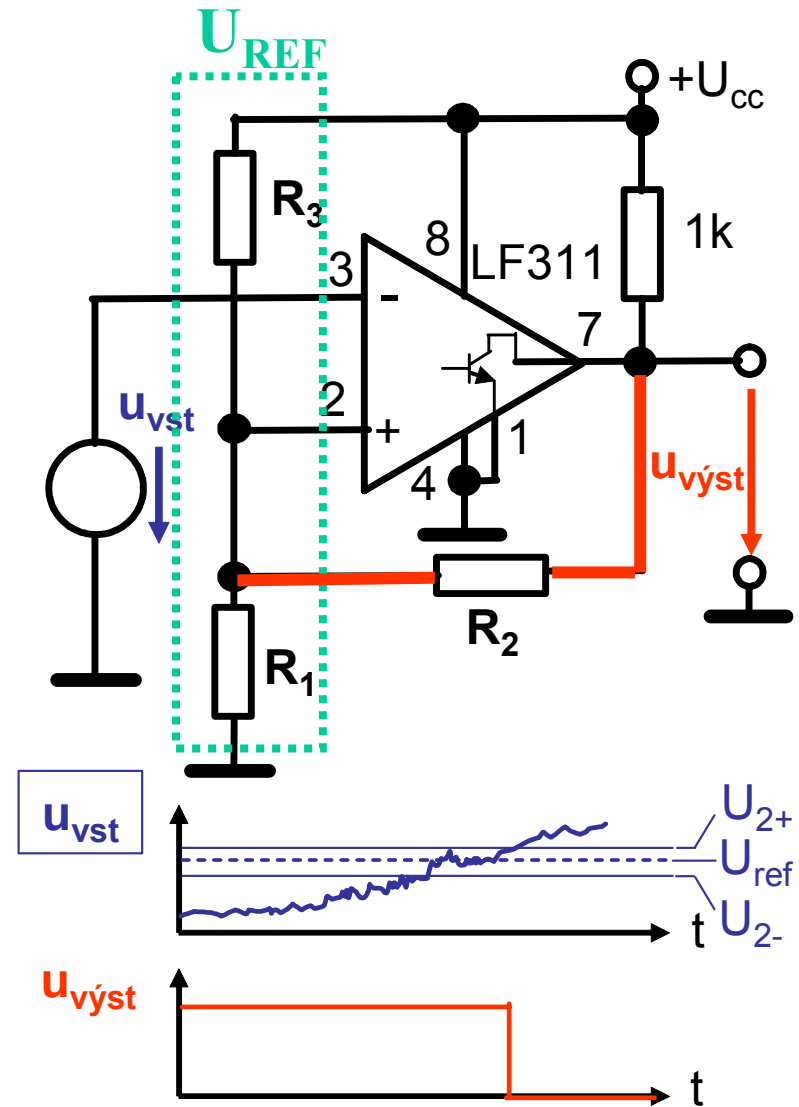


hystereze

Komparátor

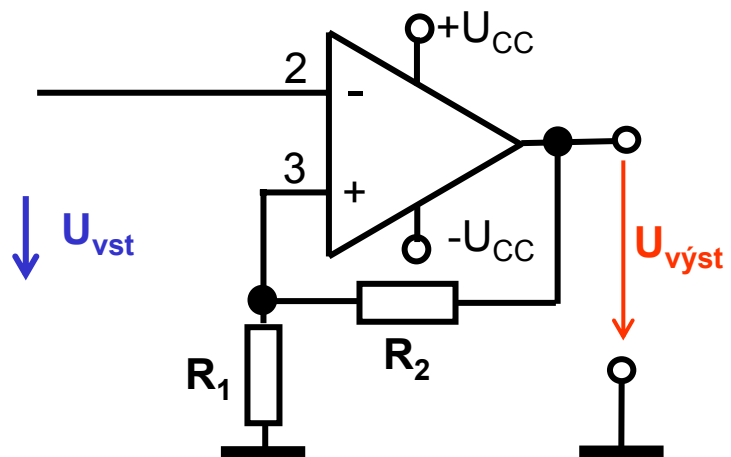


bez hystereze



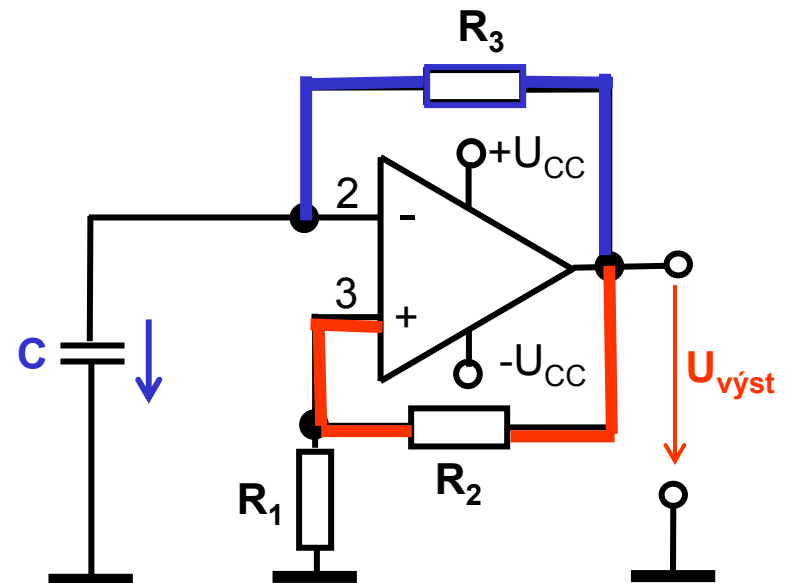
s hysterezí \Rightarrow bez zákmitů

Komparátor s hysterezí



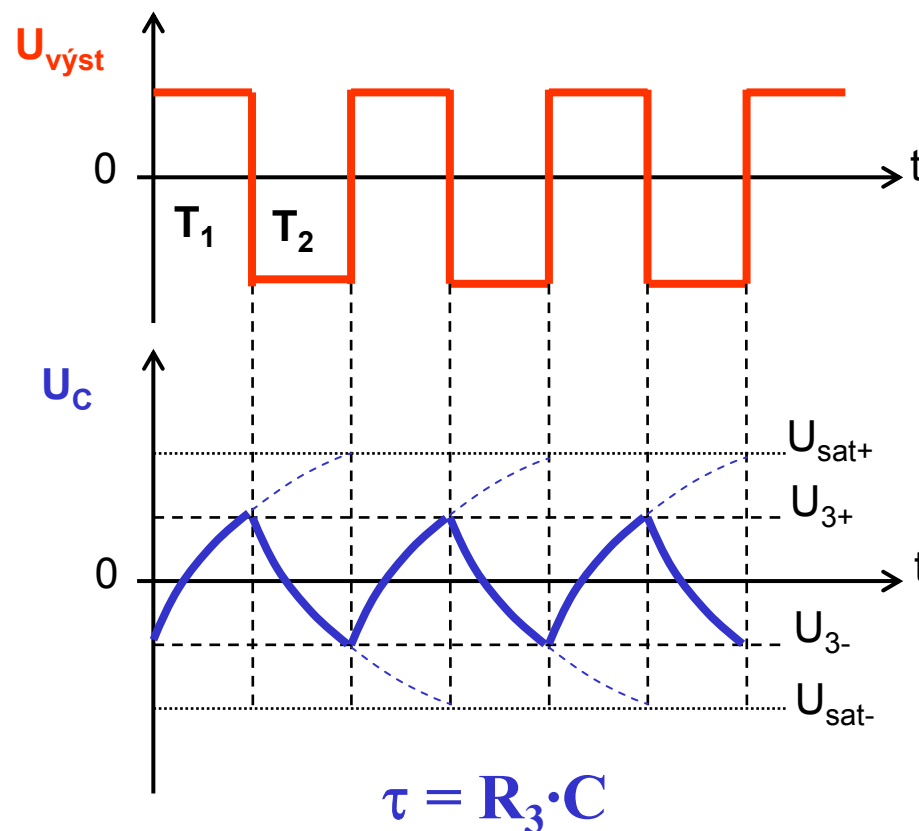
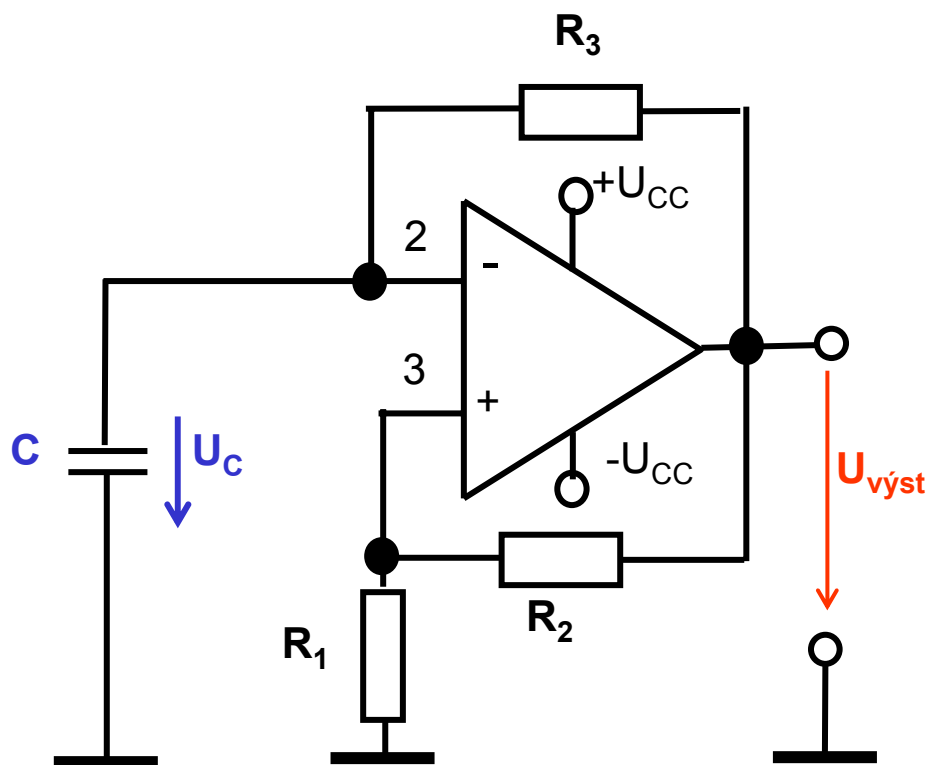
Astabilní klopný obvod

záporná zpětná vazba



kladná zpětná vazba

Astabilní klopný obvod - *AKO* (= *multivibrátor*)



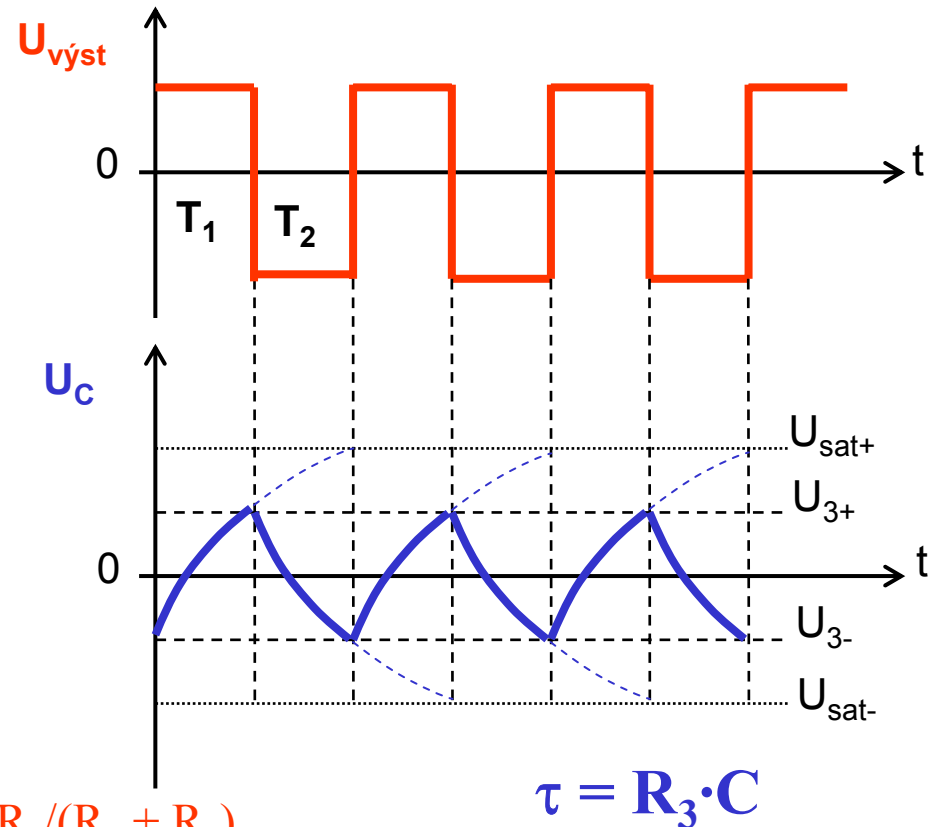
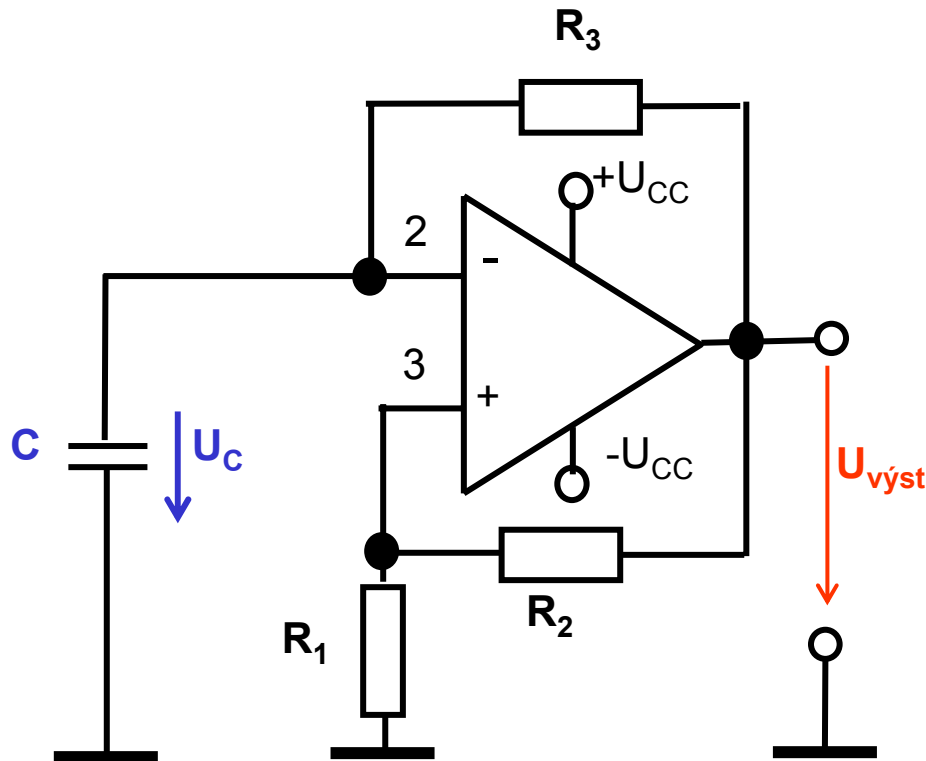
Nabíjení kapacitoru ze zdroje U_{SAT+} :

$$U_C(t) = U_{3-} + (U_{SAT+} - U_{3-}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = U_{SAT-} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT+} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

Vybíjení kapacitoru ze zdroje U_{SAT-} :

$$U_C(t) = U_{3+} + (U_{SAT-} - U_{3+}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = -U_{SAT+} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT-} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

Astabilní klopný obvod - AKO (= multivibrátor)



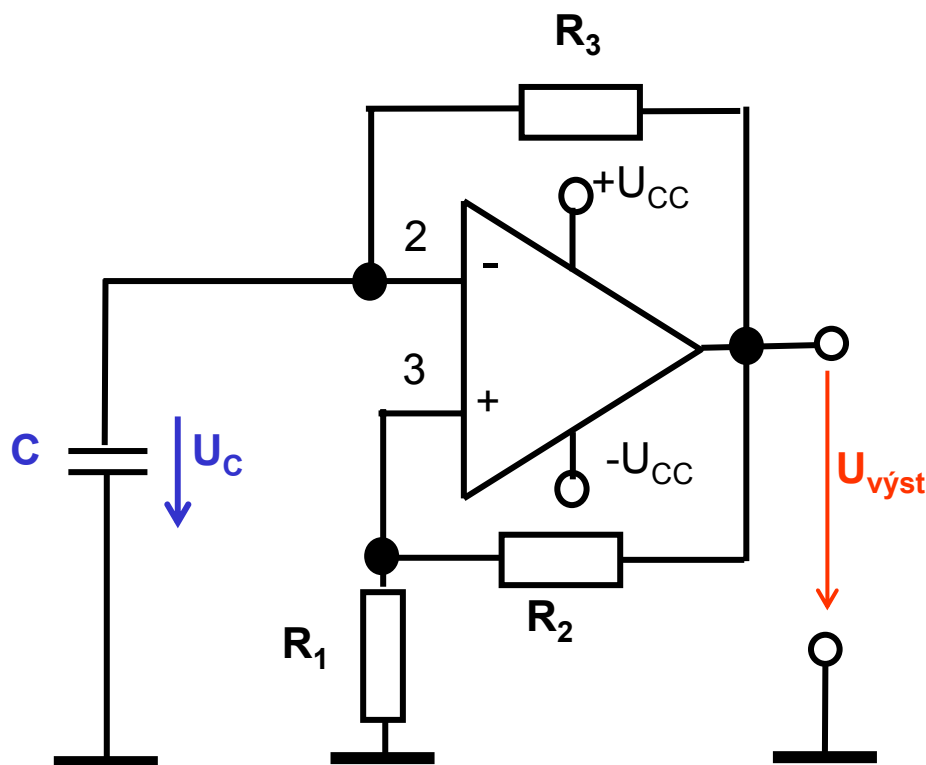
V okamžiku překlopení je $U_C = U_{3+} = U_{sat+} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$

$$U_C(t) = U_{3-} + (U_{SAT+} - U_{3-}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = U_{SAT-} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT+} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

V okamžiku překlopení je $U_C = U_{3-} = U_{sat-} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$

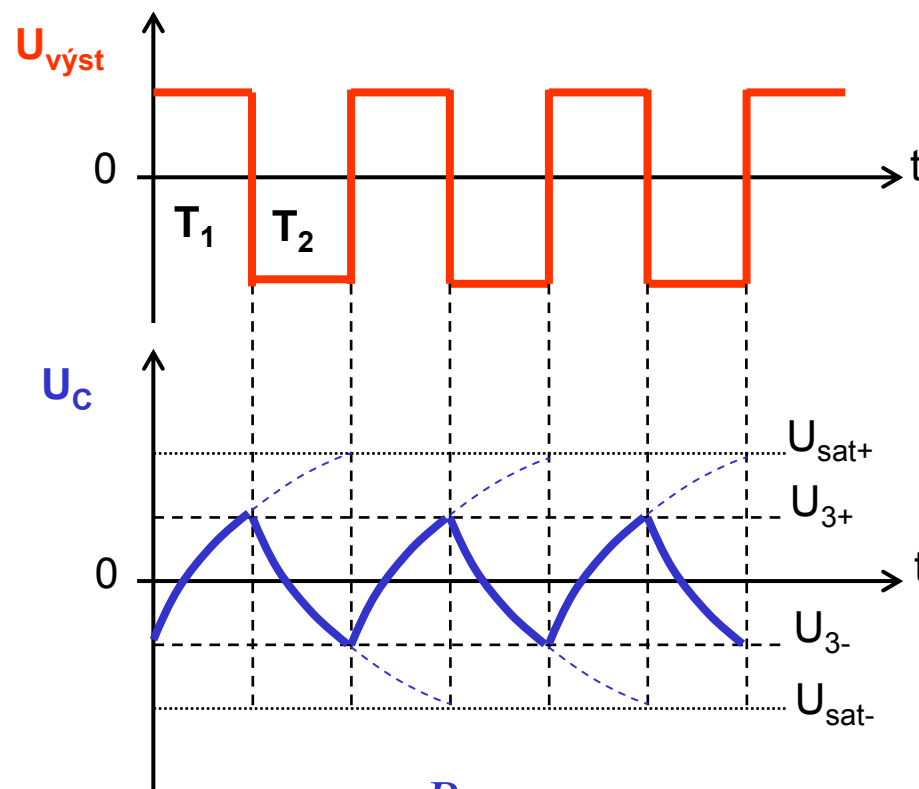
$$U_C(t) = U_{3+} + (U_{SAT-} - U_{3+}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = -U_{SAT+} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT-} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

Astabilní klopný obvod - *AKO* (= *multivibrátor*)



$$T_1 = \tau \cdot \ln \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{SAT-} - U_{SAT+}}{U_{SAT+} \cdot \frac{-R_2}{R_1 + R_2}}$$

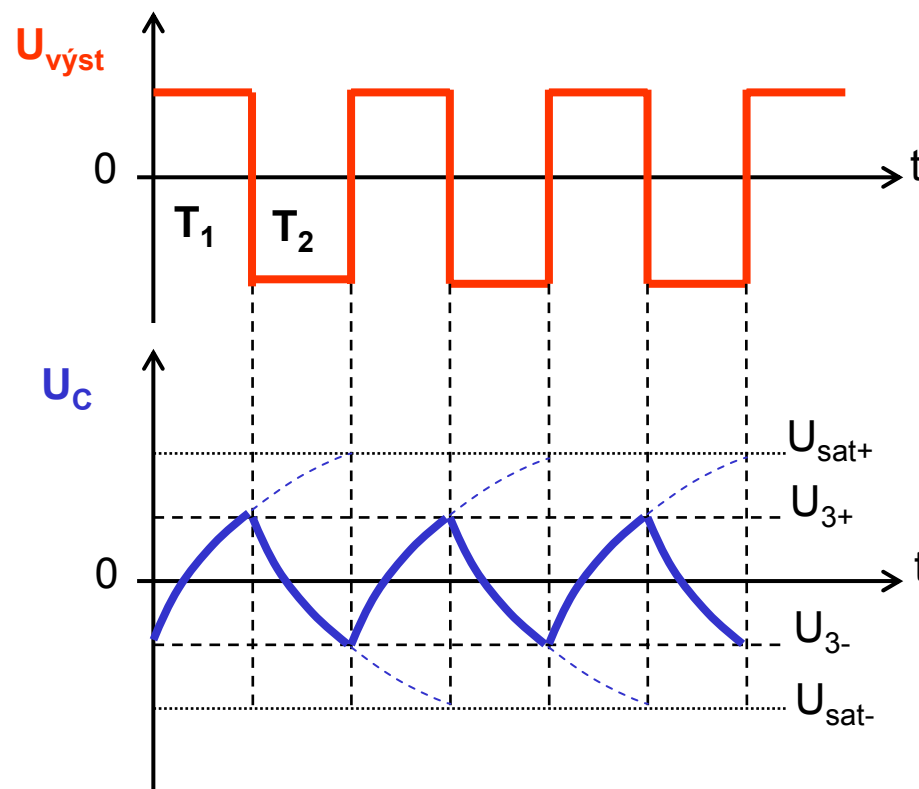
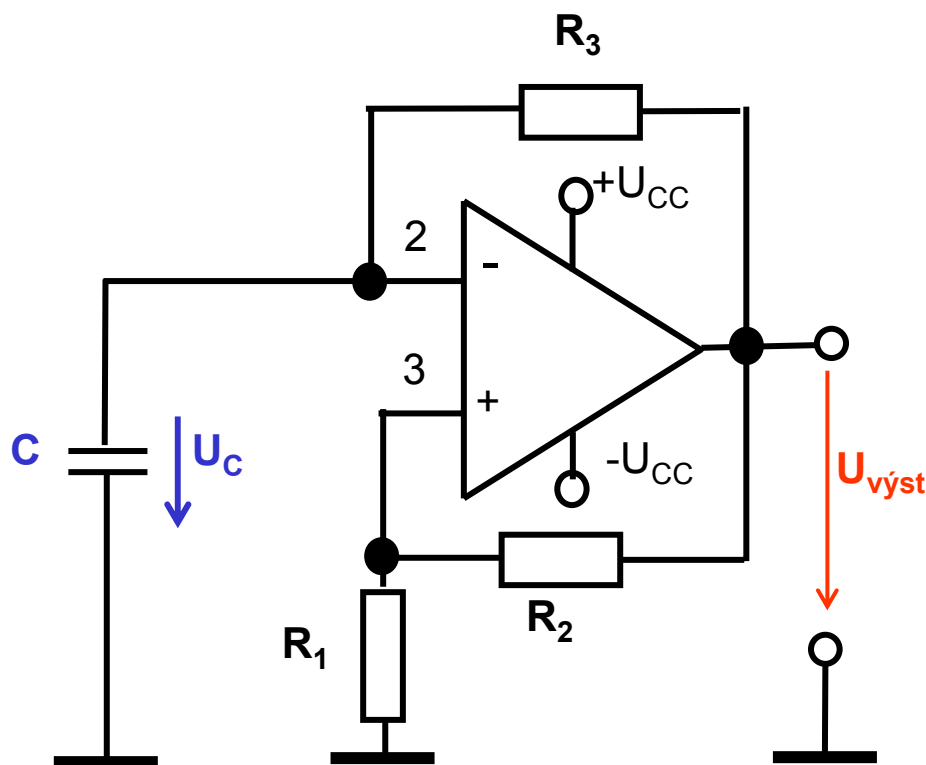
Pro $U_{SAT-} = U_{SAT+}$:



$$T_2 = \tau \cdot \ln \frac{-\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{SAT+} + U_{SAT-}}{-U_{SAT-} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$T = T_1 = T_2 = \tau \cdot \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$$

Astabilní klopný obvod - *AKO* (= *multivibrátor*)



Pro $R_1 = R_2$:

$$T = \tau \cdot \ln 3 = 1,1 \cdot R_3 \cdot C$$

Pro $U_{SAT-} = U_{SAT+}$:

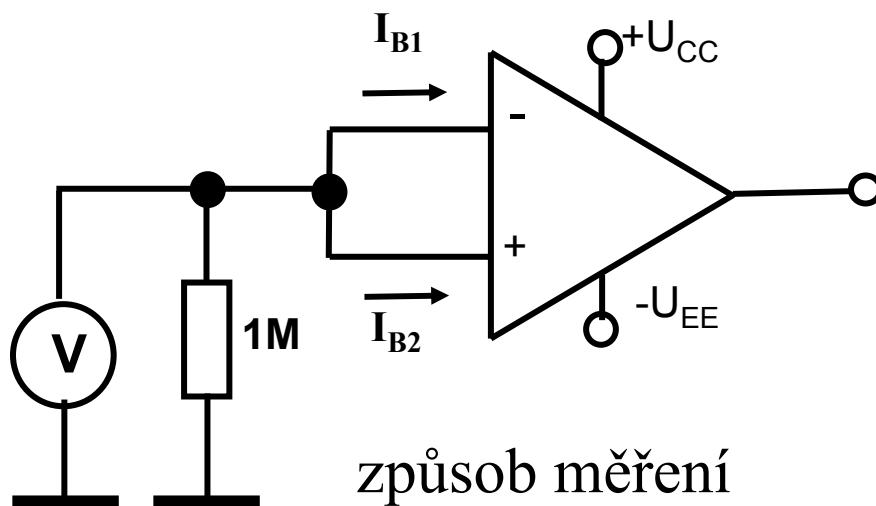
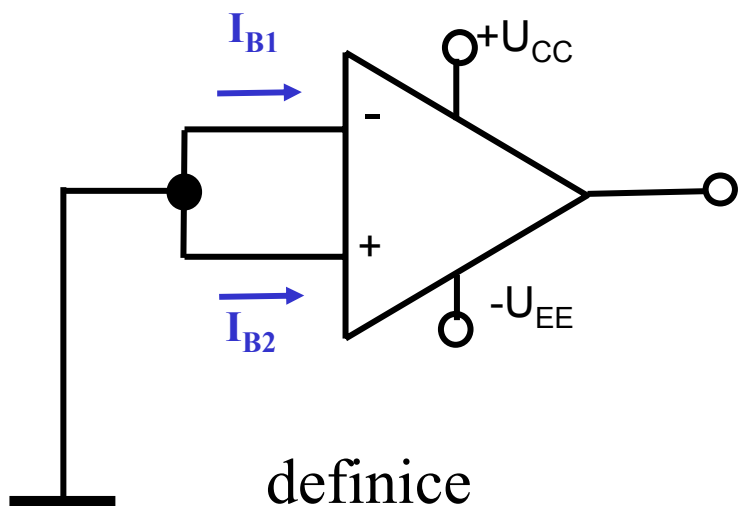
$$T = T_1 = T_2 = \tau \cdot \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$$

Vlastnosti reálného OZ

Vstupní proud: I_{IB} (*Input Bias Current*)

$$I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

Příčinou je proud do bází vstupních tranzistorů.



$$I_{IB} \text{ (Input Bias Current)} \quad I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

LM741

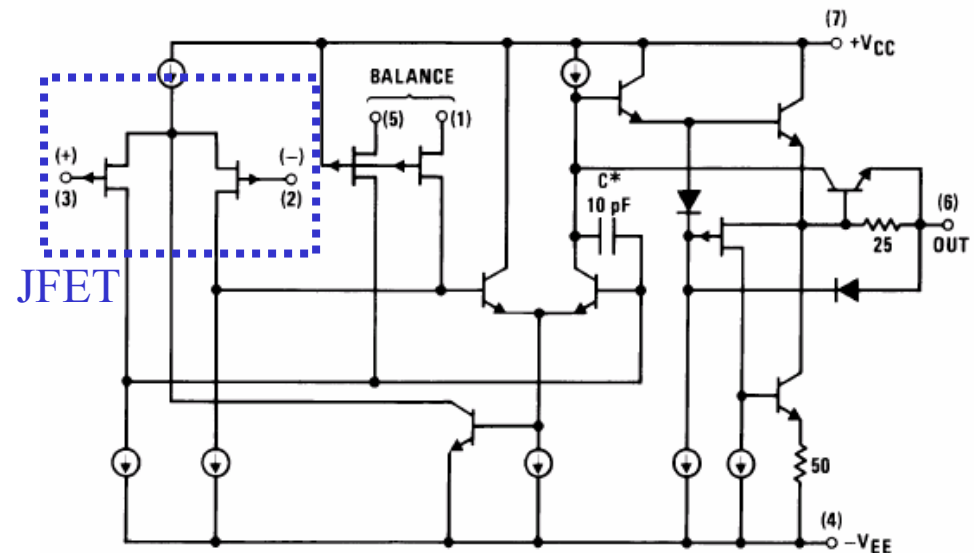
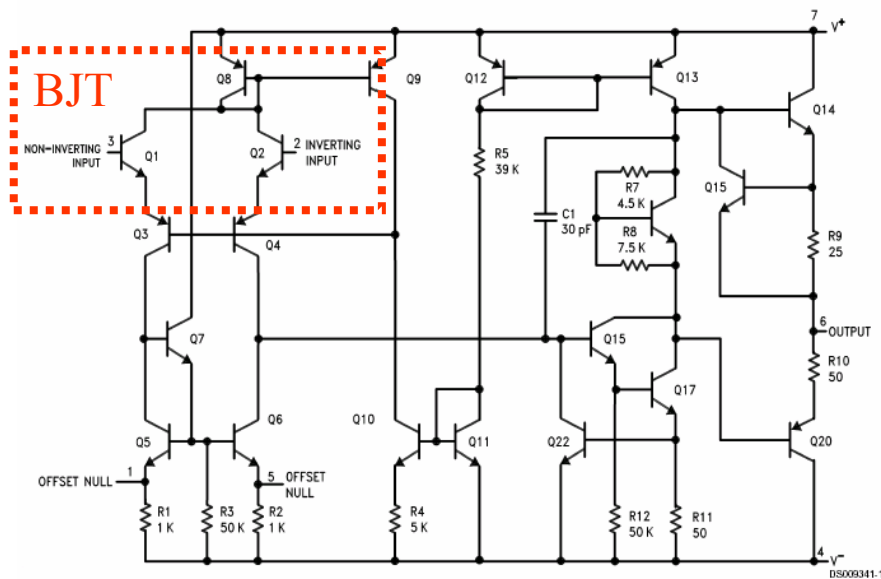
Operational Amplifier

		LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	μA

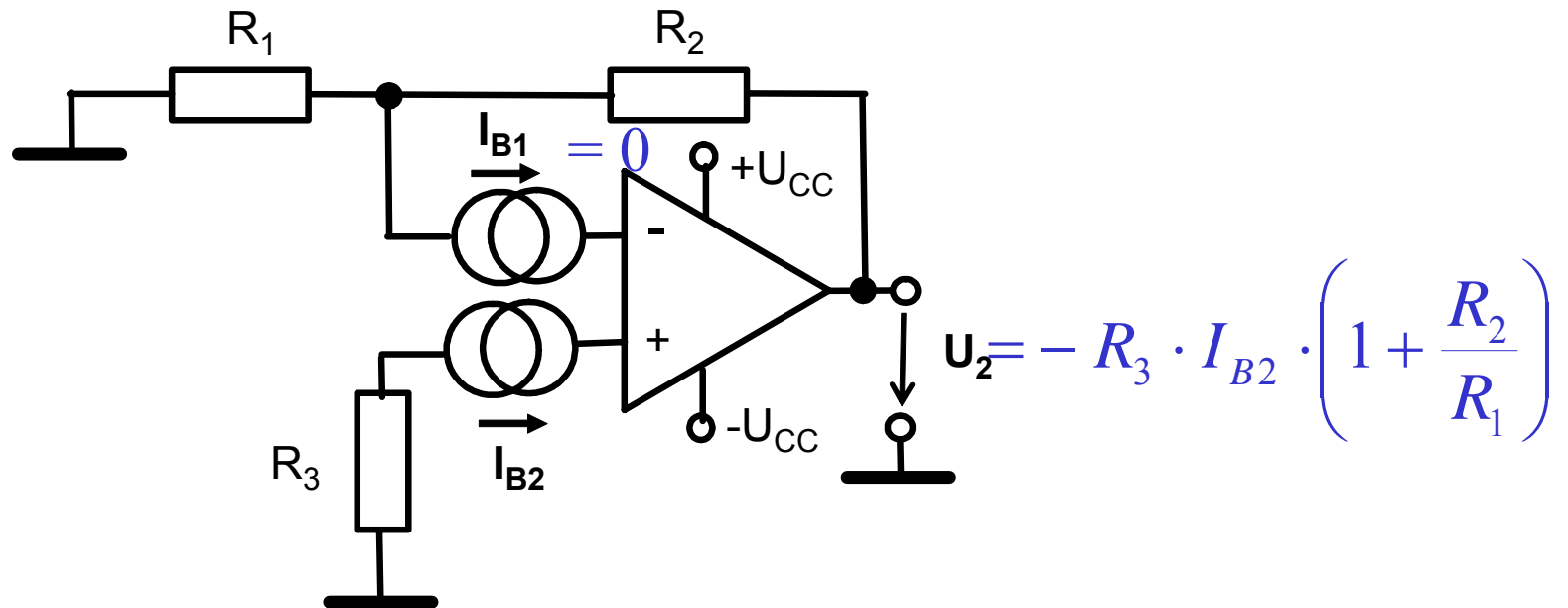
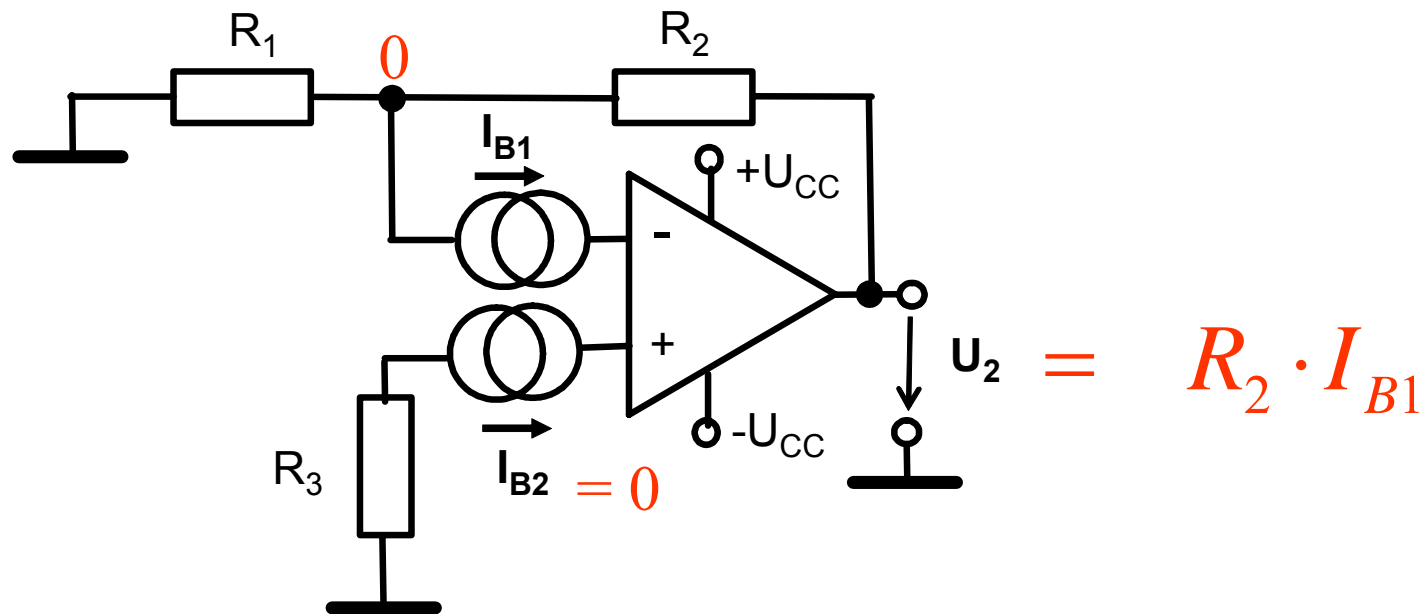
LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

JFET Input Operational Amplifiers

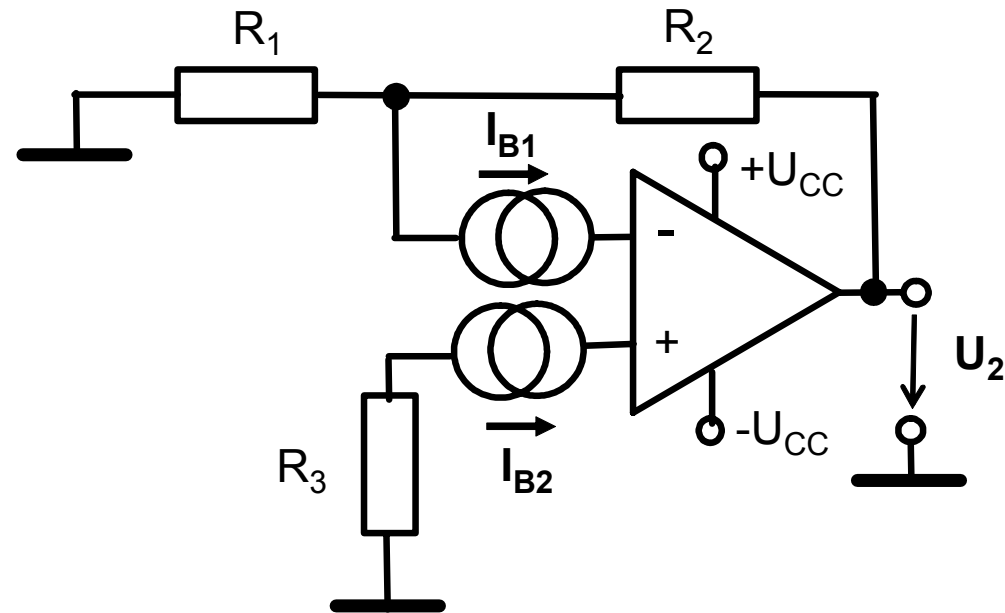
Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
I_B	Input Bias Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5)		30	100		30	100		30	200	pA
		$T_J \leq T_{HIGH}$			50			5			8	nA



Eliminate I_{IB} (*Input Bias Current*)



Eliminace I_{IB} (*Input Bias Current*)



Lineární superpozicí:

$$U_2 = R_2 \cdot I_{B1} - R_3 \cdot I_{B2} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = R_2 \cdot I_{B1} - R_3 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} I_{B2}$$

$$U_2 = \boxed{-\left(R_3 \frac{R_1 + R_2}{R_1} - R_2\right)} \cdot \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} - \left(R_3 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + R_2\right) \cdot \frac{I_{B2} - I_{B1}}{2}$$

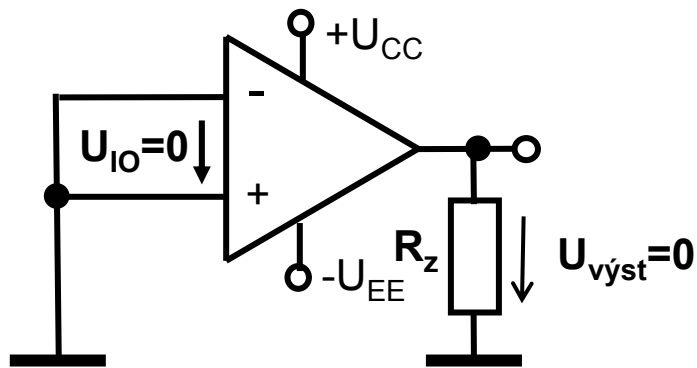
$$= 0$$

$$\Rightarrow R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

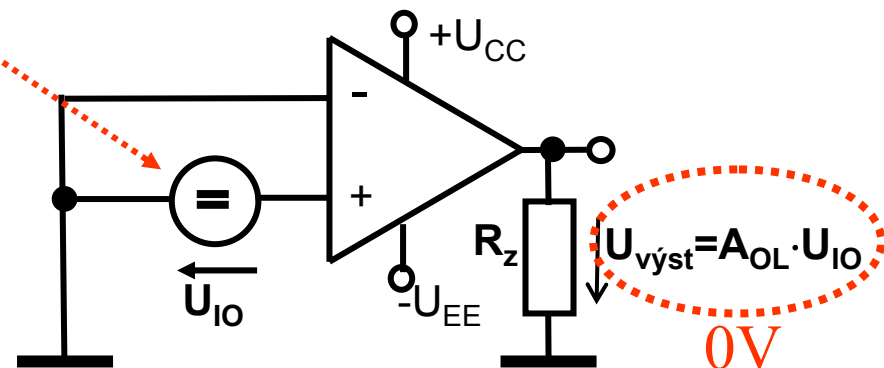
„shodné odpory
do vstupů“

U_{OB} (*Input Offset Voltage*) - vstupní nesymetrie napětí

= vstupní rozdílové napětí, které zajistí nulové výstupní napětí

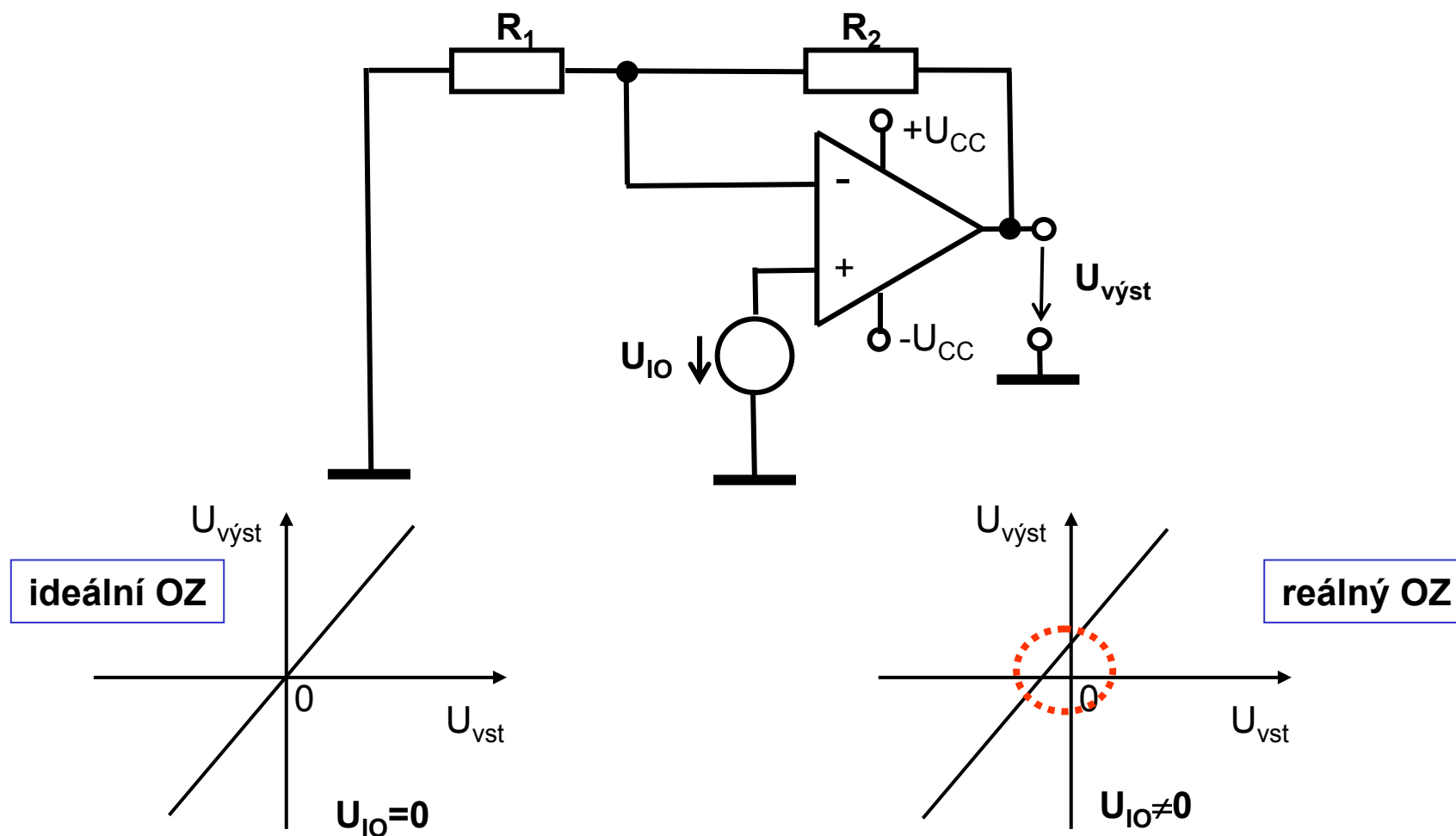


Ideální OZ



Reálný OZ

U_{OB} (*Input Offset Voltage*) - vstupní nesymetrie napětí



Vliv U_{IO} na $U_{výst}$ invertujícího a neinvertujícího zesilovače pro $U_{vst} = 0V$:

$$U_{výst} = U_{IO} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = U_{IO} \cdot A_{CL}$$

U_{OB} (*Input Offset Voltage*) - vstupní nesymetrie napětí

= vstupní rozdílové napětí, které zajistí nulové výstupní napětí

LM741

Operational Amplifier

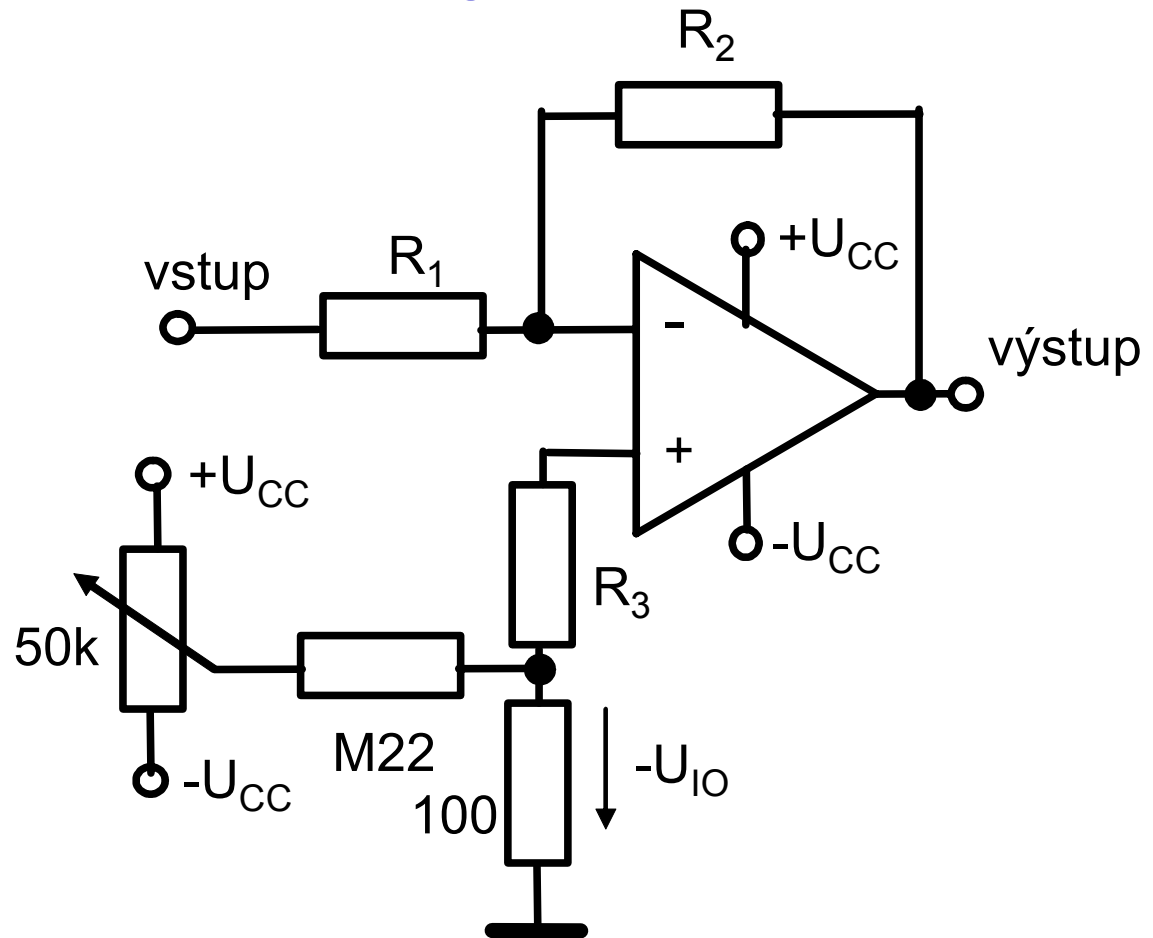
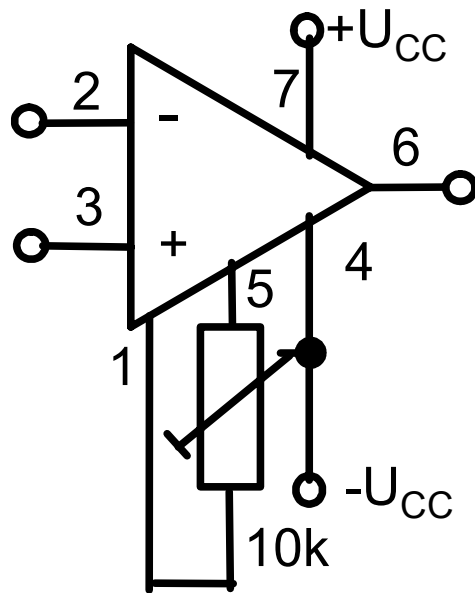
Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$					1.0	5.0		2.0	6.0	mV
			0.8	3.0							mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV

LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

JFET Input Operational Amplifiers

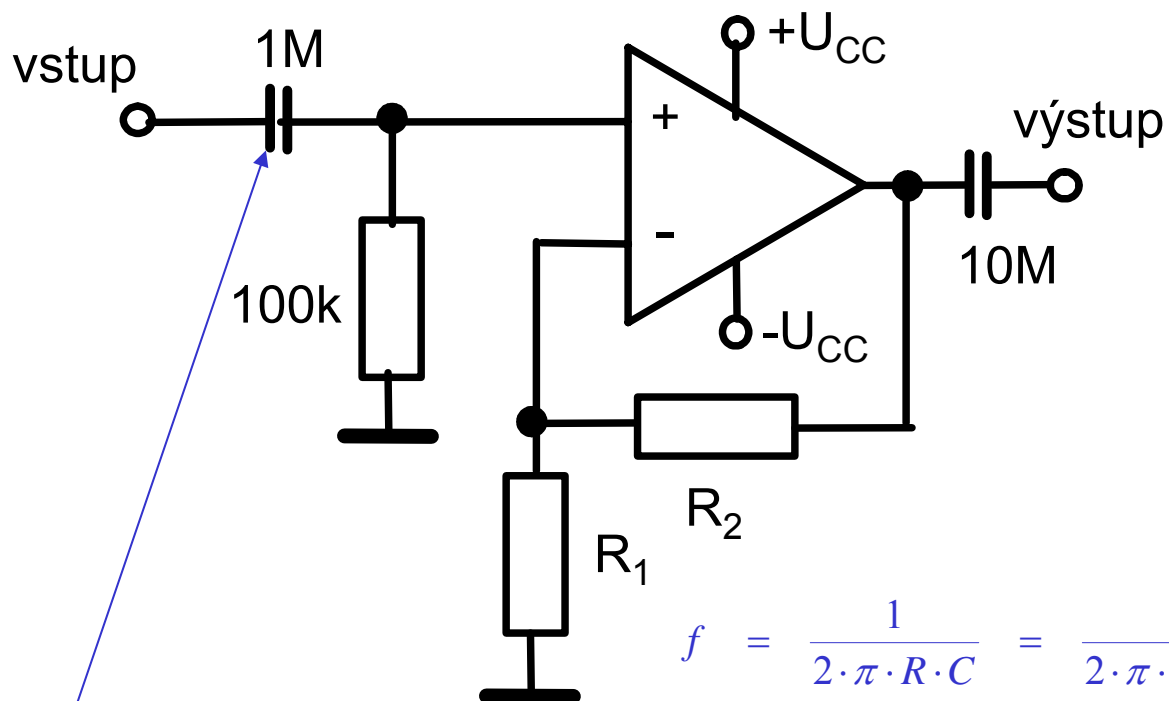
Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ Over Temperature		3	5		3	5		3	10	mV
					7			6.5			13	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$		5			5			5		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Kompenzace U_{OB}



1. doporučeno výrobcem
2. přivedením pomocného kompenz. napětí
3. volbou OZ s malou hodnotou U_{OB}

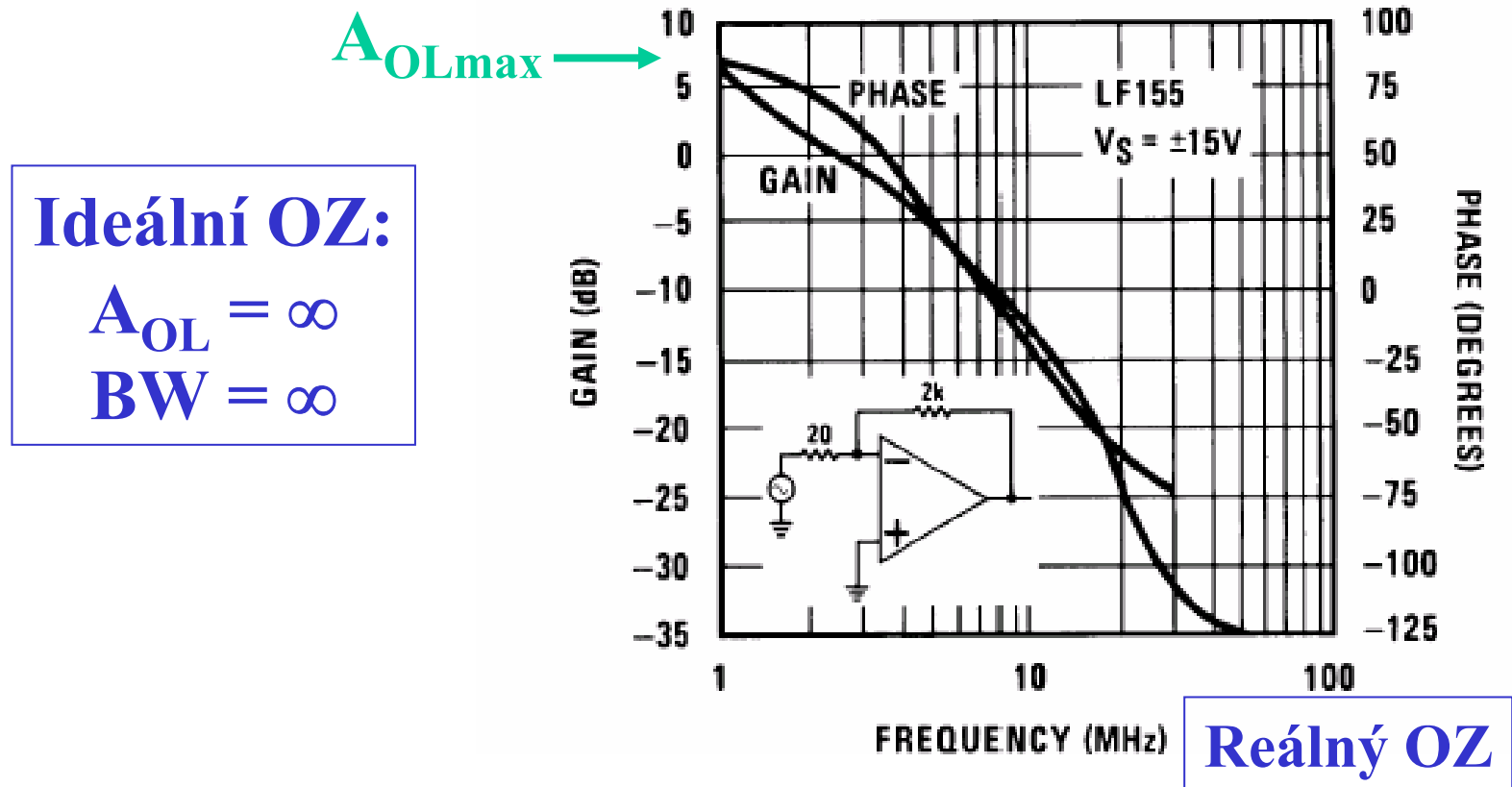
4. Odstranění vlivu U_{OB} volbou vhodného zapojení



$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \text{ Hz}$$

odblokováním ss složky vstupního napětí

Kmitočtová charakteristika OZ

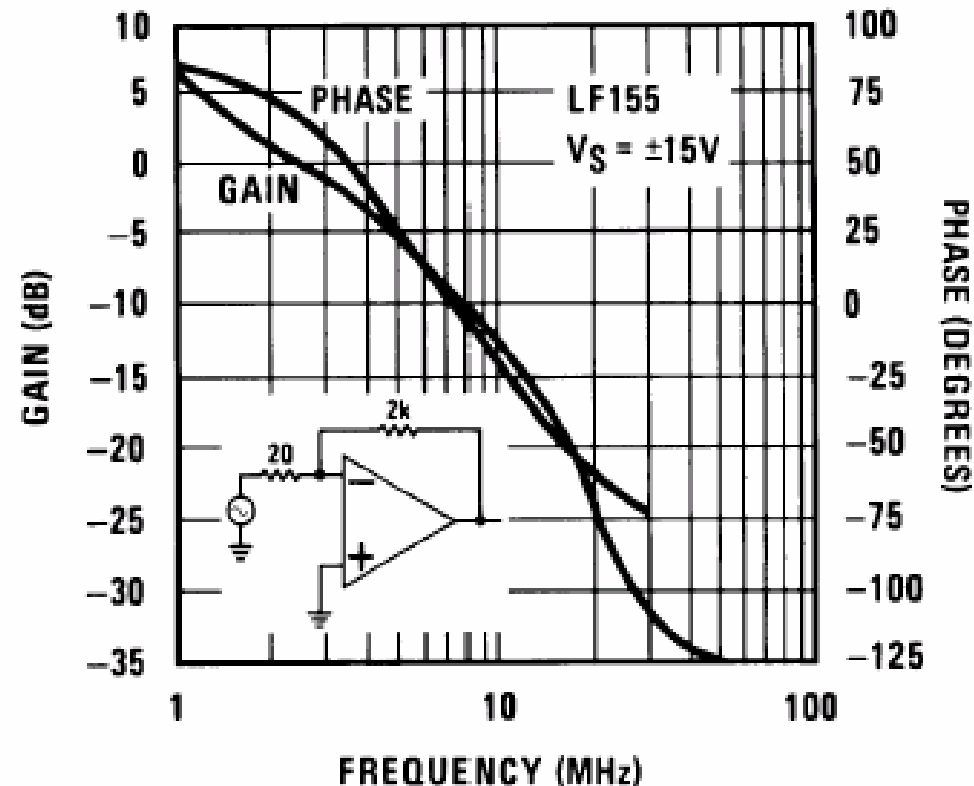


Mezní kmitočet $f_m \Leftrightarrow |A| = A_{max} - 3 \text{ dB}$, resp. $|A| = A_{max}/\sqrt{2}$

BW je frekvenční rozsah, ve kterém přenos zesilovače neklesne pod hodnotu A_{OLmax} o více než o 3 dB.

Kmitočtová charakteristika OZ

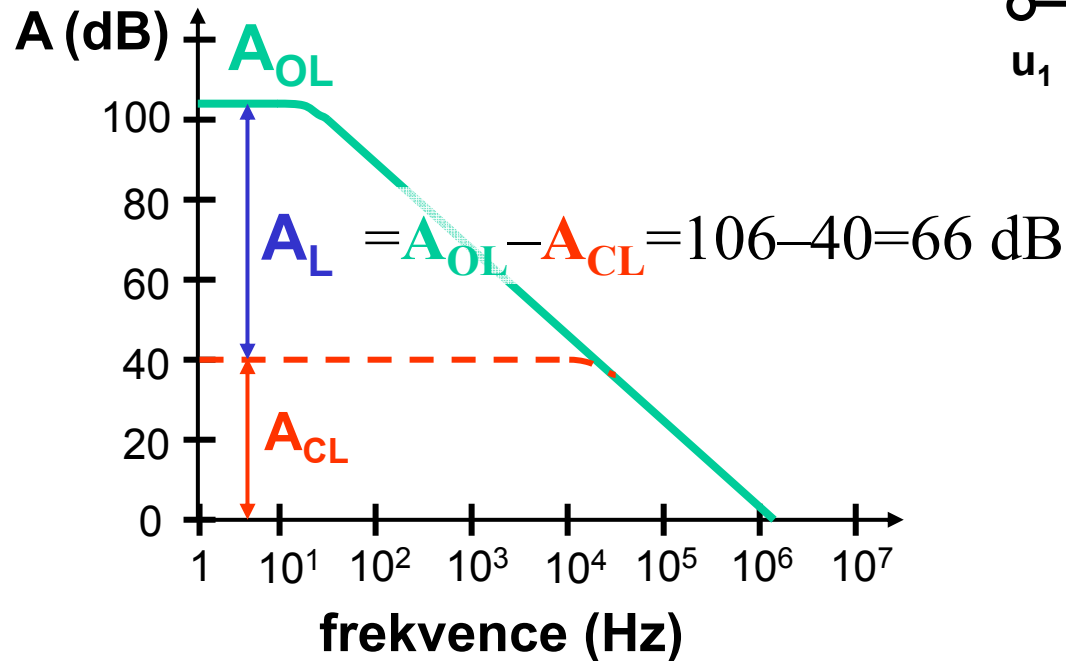
Bode Plot



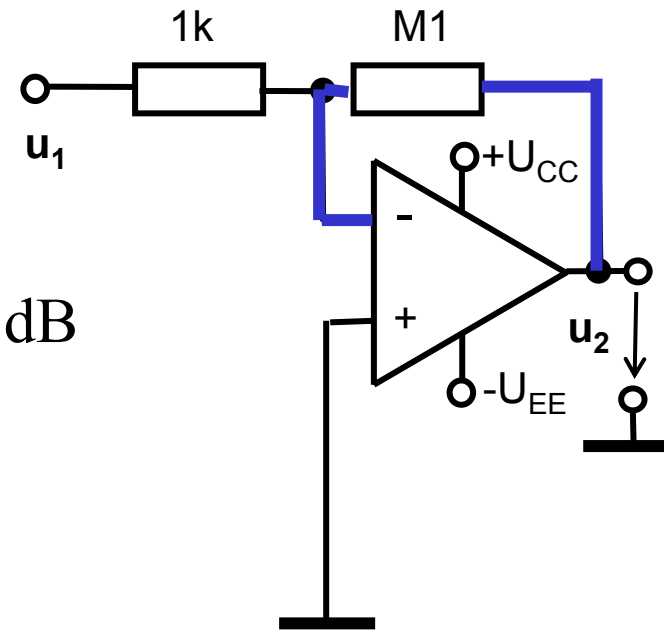
$$A_u = 20 \cdot \log |A_u| = 20 \cdot \log \left| \frac{u_2}{u_1} \right| \quad (dB; -; V, V).$$

Sledovač: $A_u = 20 \cdot \log(1) = 0dB$ $A_u = 10 \Leftrightarrow A_u = 20dB$ $A_u = 100 \Leftrightarrow A_u = 40dB$

Amplitudová frekvenční charakteristika



BW: → bez záporné zpětné vazby
→ se zápornou zpětnou vazbou

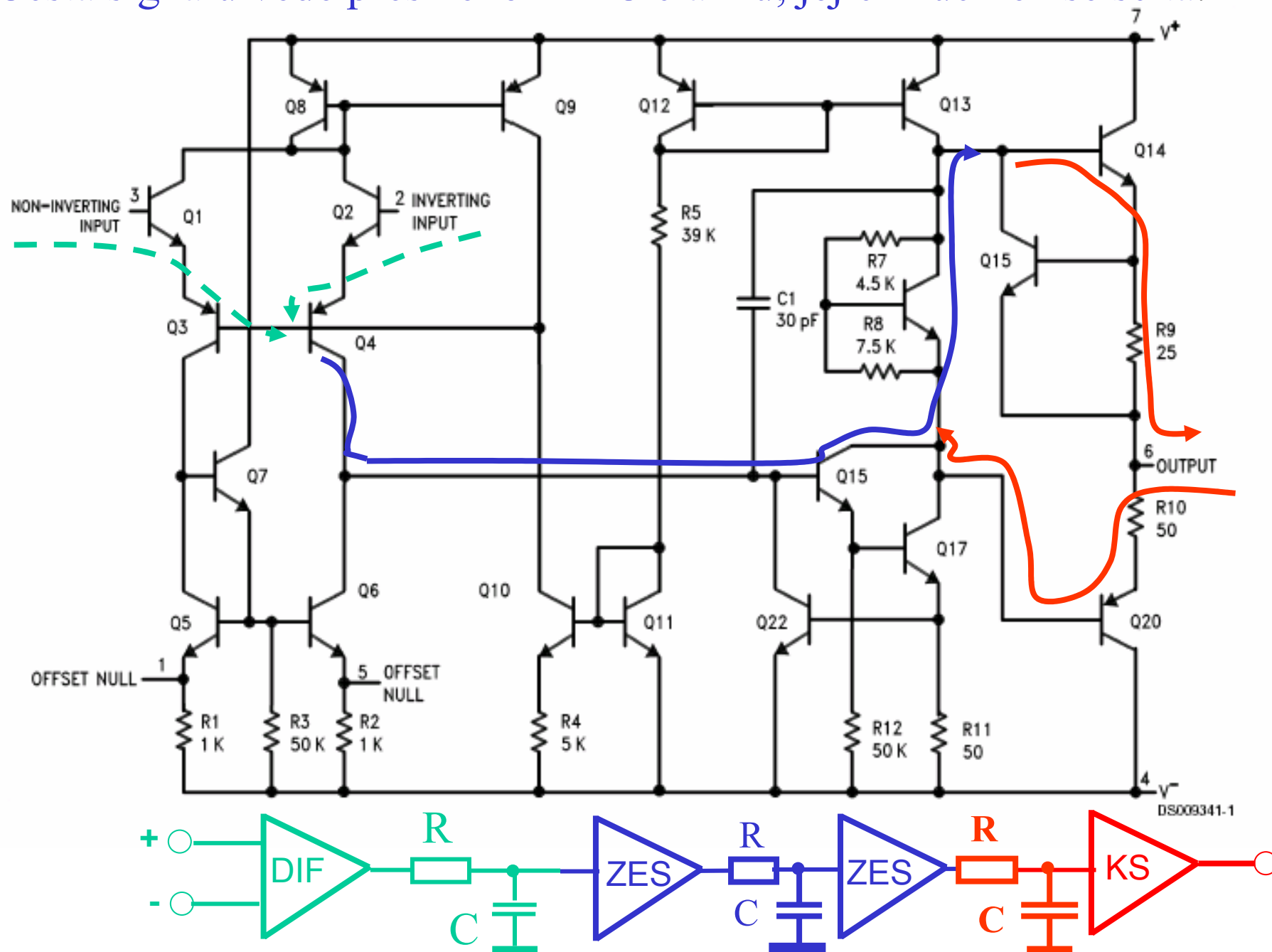


Čím nižší je A_{CL} , tím větší část z A_{OL} uzavíráme do smyčky ZV!!!

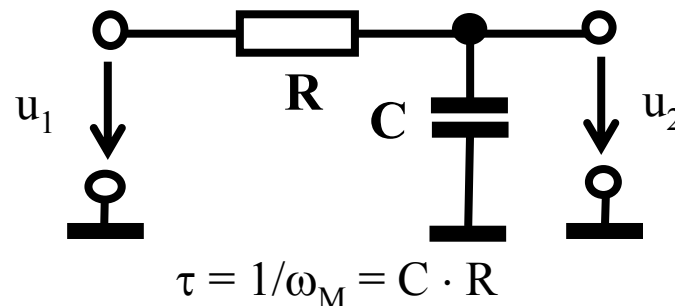
Sledovač napětí ($A_{CL} = 0$ dB):

ve smyčce ZV bude $A_L = A_{OL} = 106$ dB, tj. celé napěťové zesílení A_{OL} .

Cesta signálu vede přes několik RC článků, jejichž účinek se sčítá.



RC článek



Přenosová funkce:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{X_C}{X_C + R} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} = \frac{1}{1 + j\omega^2\tau^2} - j \cdot \frac{\omega\tau}{1 + j\omega^2\tau^2} \quad ,$$

$$f = f_M \Leftrightarrow R = X_C, \text{ resp. } R = 1/\omega C$$

Pro $\omega \cdot C \cdot R = 1$:

$$A_{udB} = 20 \log \frac{u_2}{u_1} = 20 \log \sqrt{(\operatorname{Re} A_u)^2 + (\operatorname{Im} A_u)^2} = 20 \log \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{-1}{2}\right)^2} = 20 \log \frac{\sqrt{2}}{2} = -3 \text{ dB}.$$

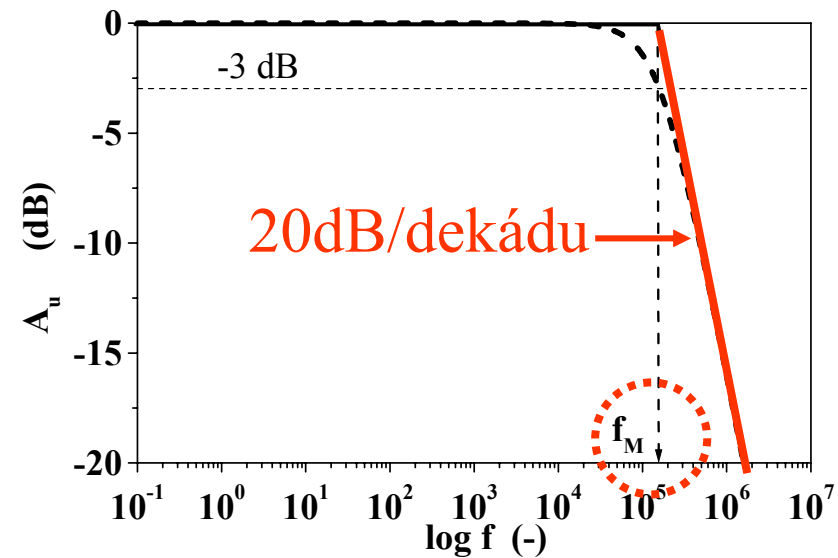
$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\operatorname{Im} A_u}{\operatorname{Re} A_u} = -\omega \cdot \tau = -\omega \cdot C \cdot R = -\frac{\omega}{\omega_M} = -\frac{f}{f_M}.$$

Fázová charakteristika:

$$\phi = -\operatorname{arctg} \frac{\omega}{\omega_M} = -\operatorname{arctg} \frac{f}{f_M}.$$

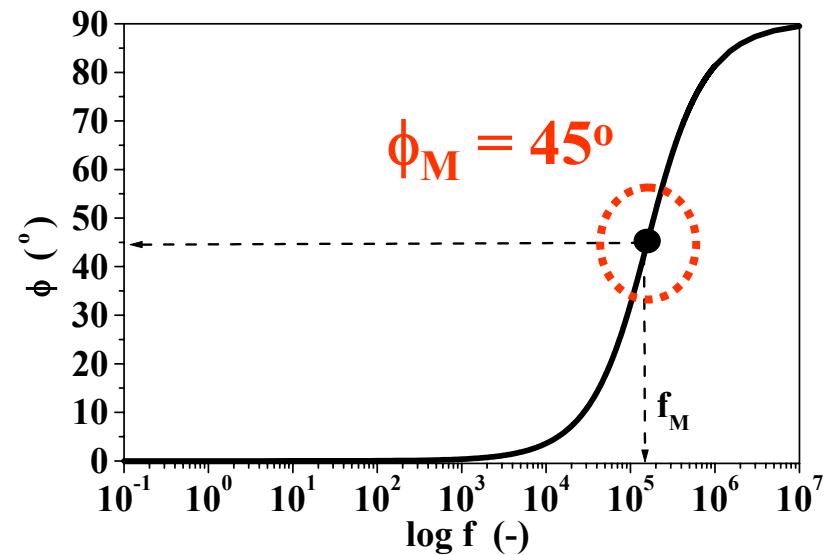
Integrační RC článek – *Bode plot*

Amplitudová charakteristika

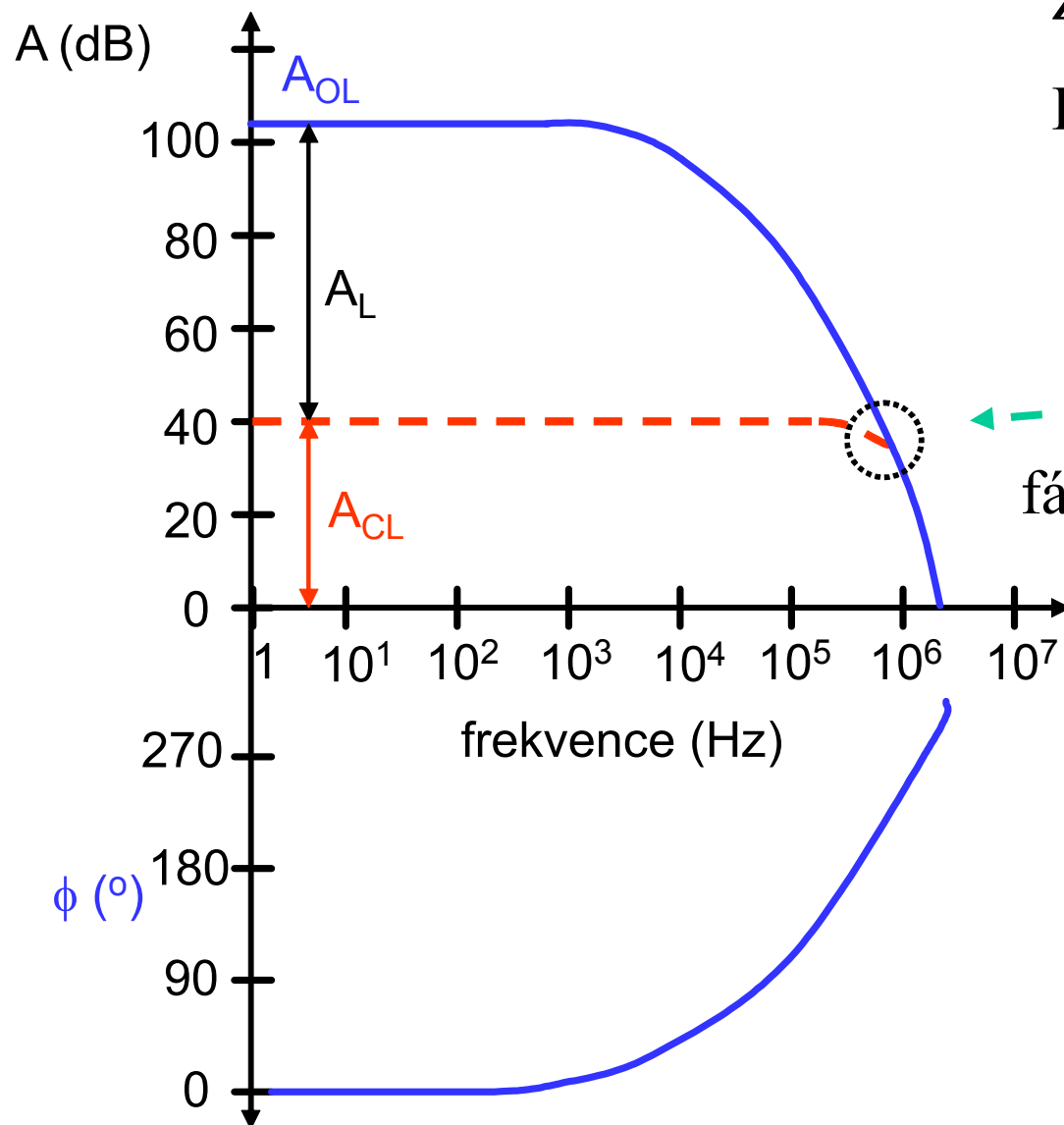


Fázová charakteristika

$$\phi = -\arctg (f / f_M)$$



Operační zesilovač – Bode plot



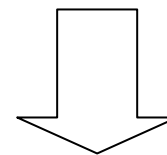
Záporná ZV otáčí fázi o 180°

Přidá-li OZ $180^\circ \Rightarrow$ kladná ZV

Podmínka stability :

$\phi < 135^\circ$ až do $A_{CL}=0\text{dB}$

fázová jistota (*Phase Margin*) $= 45^\circ$



kmitočtová kompenzace