

# Teoretické otázky ke zkoušce z předmětu EO1

Nejnovější verzi najdete vždy na

[https://github.com/cviop/E01-teorie/blob/main/E01\\_teoreticke\\_otazky.pdf](https://github.com/cviop/E01-teorie/blob/main/E01_teoreticke_otazky.pdf)

Pozn: u kapitol jsou prokliky na skripta.

Některé prohlížeče ale bohužel neotevřou PDFko  
na správném místě :(



## Obsah

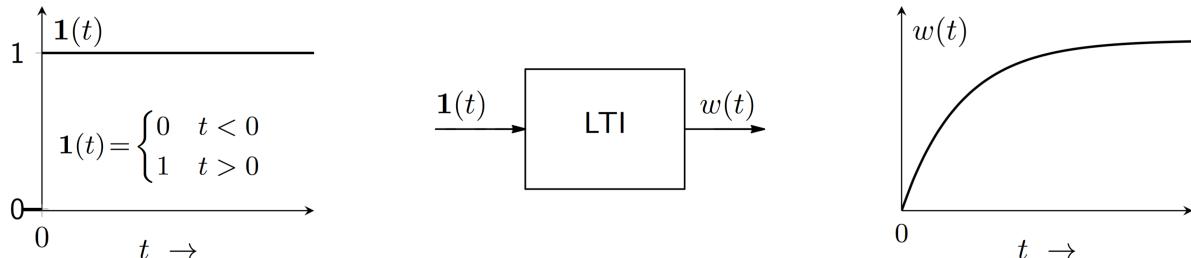
1 Napište jaké jsou možnosti určení časové odezvy lineárního systému na obecný vstupní signál a uveďte postup výpočtu. Jaké znáte standardizované odezvy a k čemu je lze použít . . . . .	1
2 Definujte přenosovou funkci lineárního systému a napište jaké vlastnosti musí takový systém splňovat. Uveďte co lze pomocí přenosové funkce charakterizovat a k čemu ji lze využít . . . . .	1
3 Uveďte, co musí splňovat přenosová funkce stabilního systému a proč demonstreujte na příkladu . . . . .	2
4 Napište přenosovou funkci kmitočtového filtru 2.řádu typu dolní/horní/pásmová propust, případně pásmová zádrž, definujte jednotlivé parametry a vysvětlete co určují (v kmitočtové a časové oblasti . . . . .	2
5 Nakreslete toleranční schéma filtru typu DP/HP/PP/PZ, popište význam charakteristických hodnot. Do schématu pak zakreslete typické modulové charakteristiky pro Besselovu / Butterworthovu / Chebyševovu / inverzní Chebyševovu / Cauerovu approximaci stejného řádu. Porovnejte jejich vlastnosti v kmitočtové a časové oblasti . . . . .	3
6 Nakreslete principiální zapojení zpětnovazební (ZV) struktury a odvoděte vztah pro výstupní signál. Uveďte základní dělení ZV obvodových struktur a vliv záporné ZV na vstupní a výstupní odpory zesilovače . . . . .	4
7 Jak se zajišťuje stabilita ZV soustav a co musí platit pro stabilní systém? Vysvětlete pojem „fázová jistota“ a „doplňkový zisk“. Co je to kmitočtová kompenzace zesilovače a proč se používá? . . . . .	10
8 Nakreslete invertující a neinvertující zesilovače s OZ a odvoděte vztah pro napěťové zesílení v případě ideálního OZ. Jaký je vstupní odpor zapojení? .	12
9 Nakreslete zapojení invertujícího sumátoru s OZ a odvoděte vztahy pro výstupní napětí v případě ideálního OZ. . . . .	14
10 Nakreslete rozdílový zesilovač s OZ a odvoděte vztah pro výstupní napětí v případě ideálního OZ. Definujte rozdílovou a souhlasnou složku vstupního signálu a odvoděte podmínu, pro kterou je souhlasná složka zesílení nulová. Co udává parametr CMRR? . . . . .	15

11 Nakreslete zapojení převodníku proud-napětí s OZ a odvodte převodní vztah pro případ ideálního OZ. Jaké jsou hlavní výhody a nevýhody uvedené implementace. . . . .	17
12 Nakreslete zapojení ideálního a ztrátového invertujícího integrátoru s OZ. Odvodte jejich přenos a nakreslete modulové charakteristiky s popisem významných hodnot uvedených v odvození. . . . .	18
13 Nakreslete typické modulové charakteristiky neinvertujícího zesilovače s OZ pro zesílení $A_u = 1, 10$ a $100$ , pokud je tranzitní kmitočet OZ $f_t = 1$ MHz . . . . .	20
14 Nakreslete zapojení jednocestného usměrňovače s OZ, popište jeho činnost a nakreslete časové průběhy na jednotlivých výstupech, včetně výstupu vlastního OZ při harmonickém buzení. . . . .	20
15 Nakreslete zapojení dvoucestného usměrňovače s OZ, popište jeho činnost a nakreslete časové průběhy na jednotlivých výstupech při harmonickém buzení. . . . .	22
16 Nakreslete zapojení neinvertujícího a invertujícího komparátoru s hysterezí, uveďte jeho převodní charakteristiku a odvodte vztahy pro překlápací úrovně. . . . .	23
17 Nakreslete principiální zapojení obvodu S&H (Sample and Hold) s OZ a popište jeho funkci, výhody/ nevýhody a použití. . . . .	25
18 Nakreslete principiální zapojení můstkového oscilátoru. Jaké typy článků (modulových charakteristik) jsou zapojeny v záporné nebo kladné ZV? Co musí být dodrženo, aby výstupní kmity byly harmonické? . . . . .	26
19 Nakreslete zapojení astabilního klopného obvodu s komparátorem (OZ). Popište princip jeho činnosti a nakreslete časové průběhy důležitých veličin. . . . .	27
20 Nakreslete zapojení generátoru funkcí trojúhelníkového a obdélníkového průběhu. Popište princip jeho činnosti a nakreslete časové průběhy důležitých veličin. . . . .	28
21 Nakreslete blokové schéma fázového závěsu, popište princip jeho činnosti a vysvětlete pojmy pásmo zachycení a pásmo zadržení. Dále nakreslete blokové schéma kmitočtové syntézy s fázovým závěsem a odvodte vztah pro kmitočet výstupního signálu. . . . .	29
22 Nakreslete základní zapojení s bipolárním/unipolárním tranzistorem jako spínačem pro buzení uzemněné/neuzemněné LED, resp. odporové/indukční zátěže. Určete vztah pro výpočet a volbu uvedených komponent pro známý proud zátěží $I_z$ v ustáleném stavu a dané úrovni řídícího napětí . . . . .	30
23 Nakreslete zapojení jednostupňového zesilovače s BJT NPN/PNP v zapojení SE/SB/SC a podle náhradního linearizovaného schématu odvodte vztah pro jeho vstupní odpor $R_i$ a napěťové zesílení $A_u$ . . . . .	33
24 Nakreslete zapojení jednostupňového zesilovače s MOSFET s indukovaným kanálem typu N/P v zapojení SS/SG/SD a podle náhradního linearizovaného schématu odvodte vztah pro jeho vstupní odpor a napěťové zesílení. . . . .	35

- 1** Napište jaké jsou možnosti určení časové odezvy lineárního systému na obecný vstupní signál a uveďte postup výpočtu. Jaké znáte standardizované odezvy a k čemu je lze použít

Odezva na jednotkový skok - přechodová charakteristika

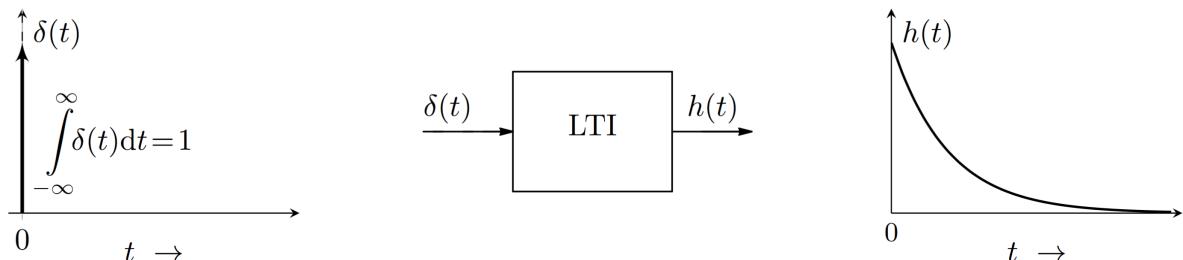
Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



Obrázek 1: Přechodová odezva LTI systému (integrační RC článek)

$$\omega(t) = u_c(t) = 1 - e^{-t/RC} \quad (1)$$

Odezva na diracův pulz - impulzní charakteristika



Obrázek 2: Impulzní charakteristika LTI systému

$$h(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad \omega(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau \quad (2)$$

- 2** Definujte přenosovou funkci lineárního systému a napište jaké vlastnosti musí takový systém splňovat. Uveďte co lze pomocí přenosové funkce charakterizovat a k čemu ji lze využít

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

Přenosová funkce (přenos) je definována jako **podíl** Laplaceových obrazů výstupní a vstupní veličiny systému při nulových počátečních podmírkách.

**Linearita:** pokud se zvětší vstupní signál, tak se lineárně zvětší i signál výstupní.

$$y(t) = \mathcal{S}\{u(t)\} \Rightarrow ay(t) = \mathcal{S}\{au(t)\} = a\mathcal{S}\{u(t)\} \quad (3)$$

**Princip superpozice:** součet odezev na dílčí složky signálu je odezva na celkový signál

$$y(t) = \mathcal{S}\{au_1(t) + bu_2(t)\} = y_1(t) + y_2(t) = a\mathcal{S}\{u_1(t)\} + b\mathcal{S}\{u_2(t)\} \quad (4)$$

**Časová invariance:** je jedno, kdy do signálu pustíme signál

$$y(t - t_0) = \mathcal{S}\{u(t - t_0)\} \quad (5)$$

Z přenosové funkce jde zjistit

- Stabilita systému
- Koeficienty modulové charakteristiky (nuly a póly)

### 3 Uvede, co musí splňovat přenosová funkce stabilního systému a proč demonstrujte na příkladu

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

Kořeny **jmenovatele** přenosové funkce stabilního systému musí ležet v **levé komplexní polohovině**, tj. kořeny musí být:

- reálné záporné
- komplexně sdružené se zápornou reálnou částí

Pak je časová odezva pro  $t \rightarrow \infty$  konečná, přičemž v případě komplexních kořenů (pólů) je odezva kmitavá.

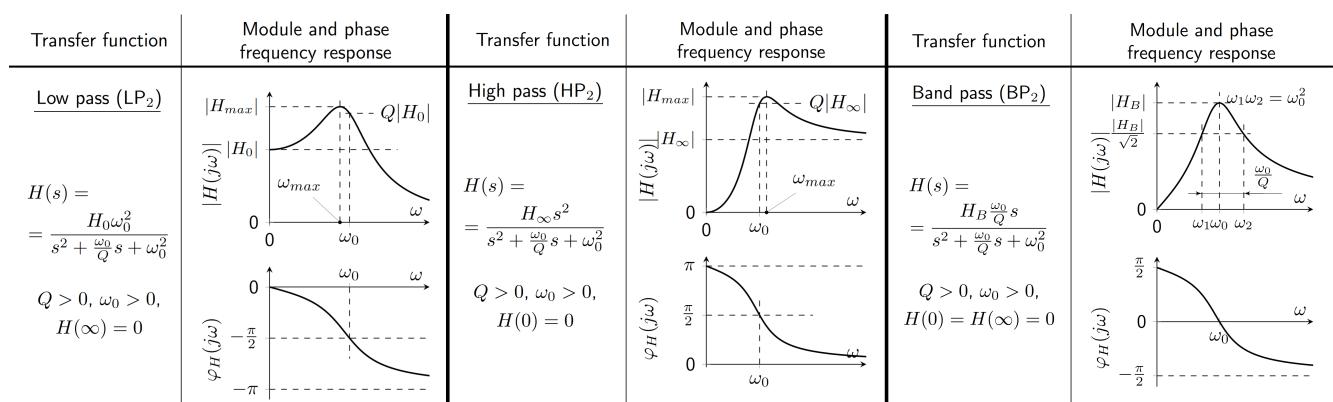
#### Příklad

$$H(s) = \frac{A \cdot s}{s + B} \rightarrow \text{pól} = -B \quad (6)$$

Pokud je  $ReB$  kladné  $\rightarrow$  pól je záporný  $\rightarrow$  systém je stabilní.

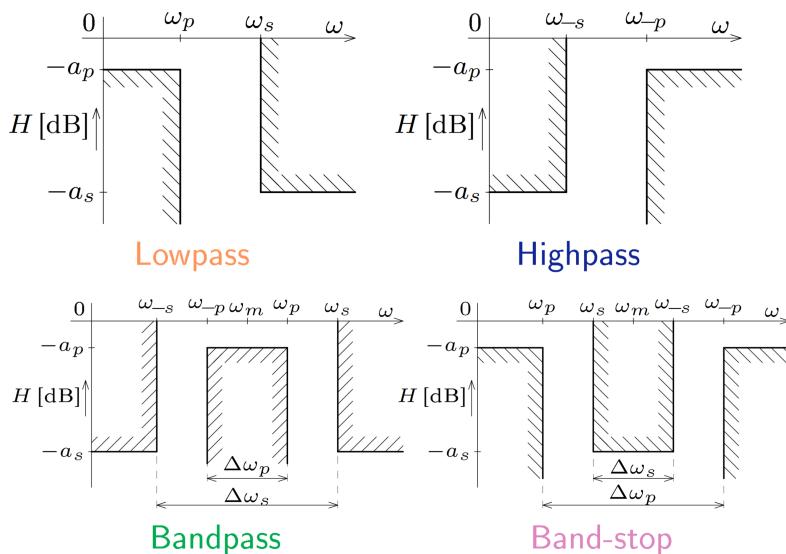
### 4 Napište přenosovou funkci kmitočtového filtru 2.řádu typu dolní/horní/pásmová propust, případně pásmová zádrž, definujte jednotlivé parametry a vysvětlete co určují (v kmitočtové a časové oblasti)

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

Obrázek 3: Filtry 2. řádu a jejich matematický popis<sup>1</sup> $s_{p1,2}$  - komplexně sdružený pól $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - resonanční frekvence $Q = \omega_0 \frac{L}{R}$  - činitel jakosti $\xi = \frac{1}{2Q}$  - tlumící faktor

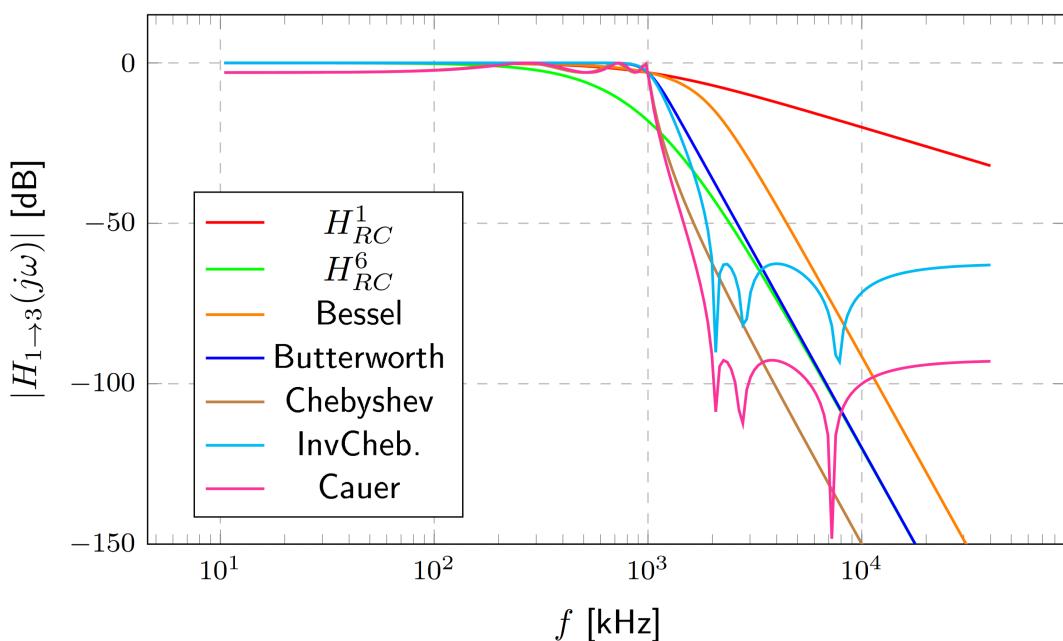
- 5 Nakreslete toleranční schéma filtru typu DP/HP/PP/PZ, popište význam charakteristických hodnot. Do schématu pak zakreslete typické modulové charakteristiky pro Besselovu / Butterworthovu / Chebyševovu / inverzní Chebyševovu / Cauerovu approximaci stejného řádu. Porovnejte jejich vlastnosti v kmitočtové a časové oblasti

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

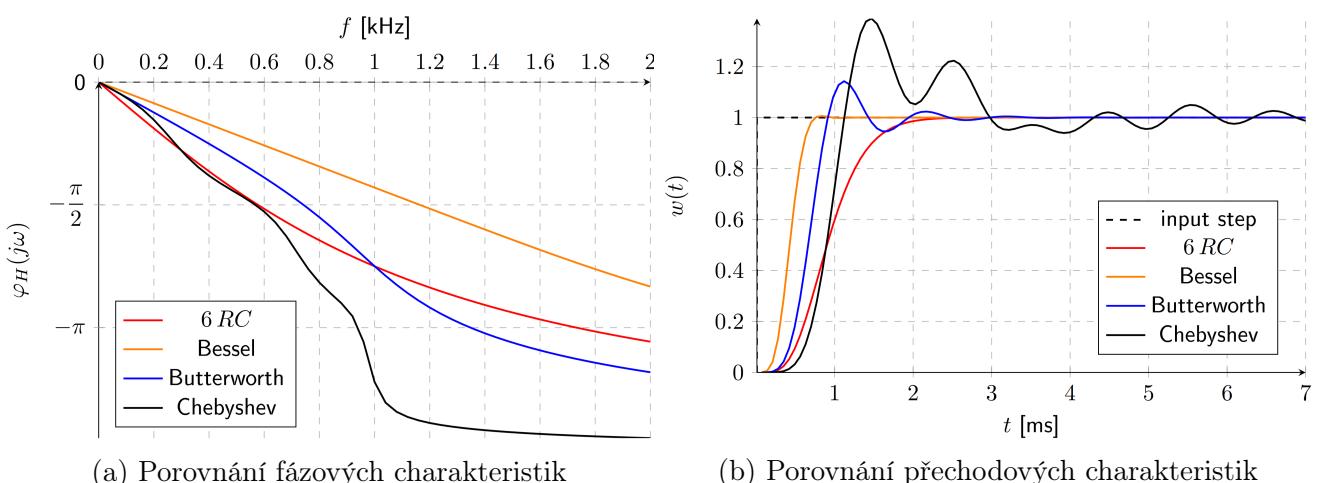


Obrázek 4: Toletranční schémata filtrů

<sup>1</sup>Ideálně vypálit do očí, ale pokud jste odvážní, můžete si všechno odvodit.



Graf 1: Porovnání modulových charakteristik všech approximací



(a) Porovnání fázových charakteristik

(b) Porovnání přechodových charakteristik

hmhhmmmmmmmmmm

**6 Nakreslete principiální zapojení zpětnovazební (ZV) struktury a odvod'te vztah pro výstupní signál. Uved'te základní dělení ZV obvodových struktur a vliv záporné ZV na vstupní a výstupní odpor zesilovače**

**Principiální zapojení + vztah**

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách  
Dole je tabulka 1 s výsledkama*

Pro výstup  $u_1$  ze sumátoru  $\oplus$  platí

$$u_1 = u_i + u_\beta.$$

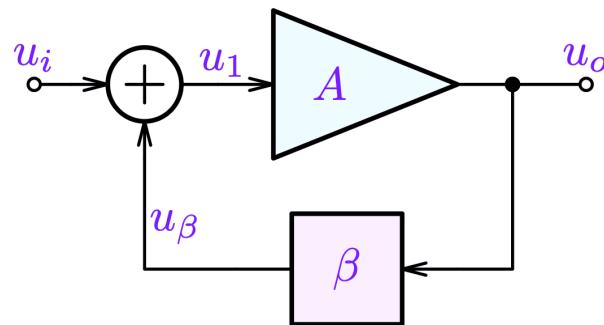


Schéma 1: Principiální zapojení ZV systému

Pro výstup z bloku  $\beta$  resp. vstup do sumátoru  $u_\beta$  platí:

$$u_\beta = u_o \beta.$$

Pro výstup ze zesilovače se zesílením  $A$  platí  $u_o = Au_1$ . Dosazením za  $u_1$  dostaneme:

$$u_o = A(u_i + \beta u_o) = \frac{u_i A}{1 - \beta A}.$$

Zesílení soustavy je definováno poměrem výstupu a vstupu tedy:

$$\underline{\underline{A' = \frac{u_o}{u_i} = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{A}{F}}}, \quad (7)$$

kde činitel  $F = 1 - \beta A$  je tzv. *vratným rozdílem* a činitel  $\beta A$  je *přenosem rozpojené ZV smyčky* (signál se zesílí  $A$ -krát a pak ještě  $\beta$ -krát).

### Základní dělení zpětnovazebních obvodových struktur

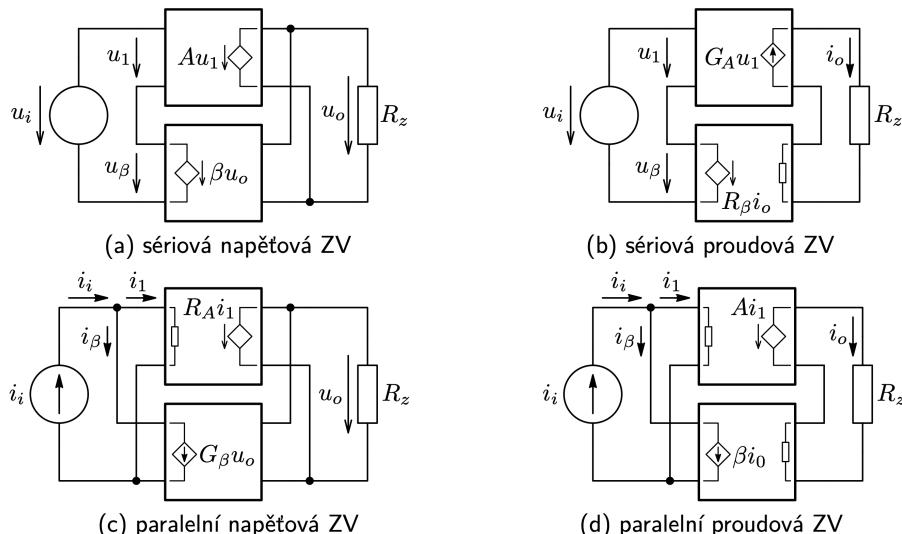


Schéma 2: Dělení ZV podle spojení signálů na vstupu a dle typu snímaného signálu na výstupu

## Záporná ZV u operačních zesilovačů

Jestliže se jedná o zápornou zpětnou vazbu, tak buď bude  $\beta$  záporná, anebo si ji „zezáporní“ zesilovač (např. invertující vstup do operačního zesilovače). Pokud se budeme odkazovat na principiální schéma zpětné vazby viz sch. 1, tak  $u_1$  - napětí, které se zesiluje (to žije pouze uvnitř toho čipu) je rozdíl napětí na neinvertujícím vstupu  $u_i$  a napětí na invertujícím vstupu  $u_\beta$  resp.  $u_o\beta$ . Z toho vychází vzoreček pro ZZV.

Jelikož je zpětná vazba vedena do invertujícího vstupu (invertující - „zezáporní“ se), platí *Blackův vztah pro ZZV*:

$$\begin{aligned} u_o &= u_d \cdot A = (u_i - \beta u_o)A \\ A' &= \frac{u_o}{u_i} = \frac{A}{1 + \beta A} \end{aligned} \quad (8)$$

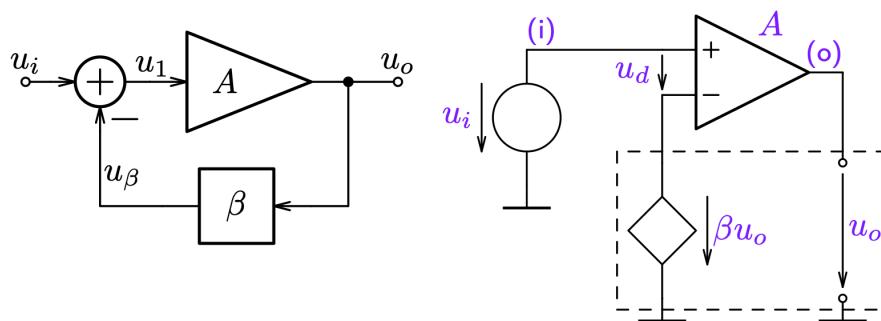


Schéma 3: Využití záporné zpětné vazby u zapojení s operačním zesilovačem

**Co je ta beta kurva?** Jak ji mám jako najít v nějakých načívaných schématech??

Pokud se podíváme na blokové schéma ZZV ve schématu 3 níže a porovnáme se zapojením ve sch. 4, vidíme jistou podobnost. Na horním obrázku jde do zpětné vazby čtvereček s betou. Na dolním obrázku je místo čtverečku s betou dělič napětí, u kterého můžeme říct, že  $\beta = \frac{R_g}{R_f + R_g}$ . (Vzoreček pro přenos děliče napětí). AHA! takže už nemusíme myslit abstraktně a máme v ruce stavící blok - dělič napětí, který zavedeme do zpětné vazby.

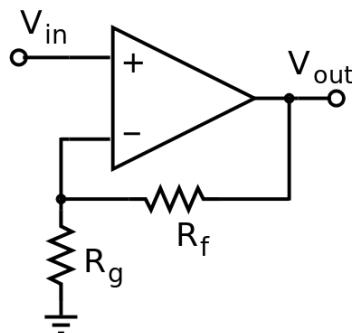


Schéma 4: Jedno ze dvou nejvíce basic zapojení s operátkem - **neinvertující zesilovač**

Vnitřní zesílení  $A$  operáku (neplést s  $A'$  - zesílení soustavy s přidanou ZZV) může být třeba  $10^6$ . Pokud vezmeme onen dělič napětí, který bude dejme tomu dvakrát zeslabovat (tedy  $R_g = R_f$ ),

tzn.  $\beta = 0.5$ , tak po dosazení do Blackova vztahu pro ZZV (8) dostaneme:

$$A' = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{10^6}{1 + 0.5 \cdot 10^6} \approx {}^2 \frac{1}{0.5} = 2$$

Vzoreček pro neinvertující zesilovač si nechávaj tetovat obvodáři na prsa a je  $A' = 1 + \frac{R_f}{R_g}$ . Pokud dosadíme, tak je všecko v cajku a sedí oba dva způsoby výpočtu

### Vliv ZZV na vstupní a výstupní odpor

Dole je tabulka 1 s výsledkama

Budou se tu vyskytovat čtyři veličiny které je potřeba si neplést:

$R_i$	vnitřní odpor součástky na vstupu
$R_o$	vnitřní odpor součástky na výstupu
$R_{in}$	vstupní odpor
$R_{out}$	výstupní odpor

Vnitřní odpory jsou dány výrobním procesem součástky. Stejně jako baterka má vnitřní odpor i výstupy čipů mají vnitřní odpor. Vstupní odpor je ale odpor, který vidí signál, když přichází do soustavy a nelze ho jednoduše změřit ohmmetrem. Jak dále uvidíme, tento odpor je závislý na zesílení soustavy.

### Vstupní odpor $R_i$ sériové ZV

Pro sériovou ZV se budeme koukat na schéma 5.

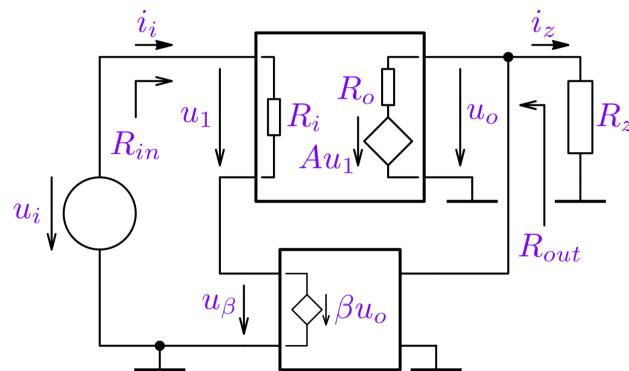


Schéma 5: Základní zapojení **sériové** ZV pro výpočet vstupního a výstupního odporu

Pár vztahů, které lze vyčíst ze schématu 5 (bereme výstupní odpor  $R_o = 0$ ):

- Proud, který teče ze zdroje  $u_i$  je stejný jako ten, co protéká skrz  $R_i$ :

$$i_i = i_{Ri} = \frac{u_1}{R_i} \quad (9)$$

<sup>2</sup>jedničku ve jmenovateli pošleme v pizdu, protože vůči milionu je pidi midi

- Dále platí, že součet napětí  $u_1$  a  $u_\beta$  musí dát  $u_i$

$$u_i = i_1 + u_\beta \quad (10)$$

- Malý bloček s betou snímá zprava napětí na  $R_z$  resp. výstupní napětí  $u_o = Au_1$ . Toto napětí pak zesílí (zeslabí) beta krát a prdne se doleva jako  $u_\beta$ :

$$u_\beta = \beta u_o = \beta A u_1 \quad (11)$$

FAKT BACHA! my tu předpokládáme, že napětí na zátěži  $R_z$  je rovno zesílenému  $Au_1$ . Tohle jde pouze za předpokladu, že výstupní odpor  $R_o = 0$ . Zesík nemá výstupní (vnitřní) odpor a tedy na něm není žádný úbytek napětí.

Ohmův vztah praví, že  $R = U/I$ . Takže vstupní odpor  $R_{in}$  jest:

$$R_{in} = \frac{u_i}{i_i} = \text{viz rovnice (10) a (9)} = \frac{R_i(u_1 + u_\beta)}{u_1} = \text{viz rce (11)} = \frac{u_1(1 + \beta A)R_i}{u_1} = \underline{\underline{R_iF}} \quad (12)$$

Fuuuuha, vstupní odpor je dán vnitřním odporem násobeným nějakým zesílením (v našem případě vratným rozdílem  $F = (1 - \beta A)$ ). Tohle je velice častá věc a není blbý si na ni zvyknout.

### Výstupní odpor $R_o$ sériové ZV

Resetujeme mozek a opět uvažujeme, že vnitřní odpor na výstupu  $R_o$  existuje a má nějakou hodnotu.

Výstupní odpor se určí sloganem *napětí na prázdro lomeno proud nakrátko*.

Napětí naprázdno je (*zkuste odvodit*):

$$u_o = \frac{u_i A}{1 + \beta A}$$

Proud nakrátko je

$$i_z = \frac{Au_i}{R_o}$$

Dosadíme do sloganu pro výpočet výstupního odporu a máme

$$R_{out} = \frac{u_o}{i_z} = \frac{R_o u_i A}{\cancel{u_i A}(1 + \beta A)} = \underline{\underline{\frac{R_o}{F}}} \quad (13)$$

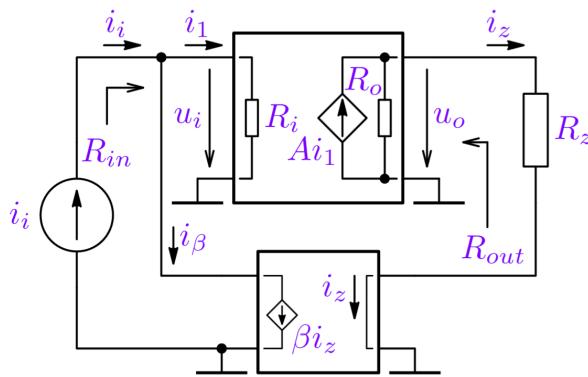
### Vstupní odpor $R_i$ paralelní ZV

Pro paralelní ZV se budeme koukat na schéma 6.

Už to vezmeme letem světem. V tomto případě je na výstupu proudový zdroj. Abychom si zjednodušili život, tak  $R_o \rightarrow \infty$ , takže proud tvořený zdrojem (kosočtverec vpravo na výstupu zesilovače) poteče všechem do zátěže. Pak platí:

$$u_i = u_1 R_i, \quad i_i = i_1 + i_\beta, \quad i_\beta = \beta i_z = \beta i_1 A \quad (14)$$

$$R_{in} = \frac{u_i}{i_i} = \cdots = \underline{\underline{\frac{R_i}{F}}} \quad (15)$$

Schéma 6: Základní zapojení **paralelní ZV** pro výpočet vstupního a výstupního odporu

### Výstupní odpor $R_i$ paralelní ZV

Výstupní odpor určíme opět sloganem *napětí na prázdro lomeno proud nakrátko*. Pokud pošleme zátěž  $R_z$  v pizdu (odborně se tomu říká  $R_z \rightarrow \infty$ ), můžeme psát:

$$u_o = Ai_1 R_o = Ai_i R_o$$

Pro tento případ se  $i_i = i_1$ . To proto, že jsme odebrali  $R_z$  a tedy nic neteče do zpětné vazby a  $i_\beta = 0$

Proud na krátko získáme proklemováním (přemostěním)  $R_z$ . Před Hospodkou budeme říkat  $R_z = 0$ . Pak platí:

$$i_z = \frac{i_i A}{1 + \beta A}$$

Výstupní odpor  $R_{out}$  pak získáme jako

$$R_{out} = \frac{\text{napeti naprazdro}}{\text{proud nakrátko}} = \frac{u_o}{i_z} = \dots = \underline{\underline{R_o F}}, \quad (16)$$

kde  $F = 1 + \beta A$

Suma sumárum máme tuhle tabulkou:

	Sériová ZV	Paralelní ZV
Vstupní odpor	$R_{in} = R_i F$	$R_{in} = \frac{R_i}{F}$
Výstupní odpor	$R_{out} = \frac{R_o}{F}$	$R_{out} = R_o F$

Tabulka 1: Výsledné odpory pro daná zapojení,  $F = 1 + \beta A$ 

Pokud chceme být jooo cool lidi, tak můžeme začít házet slova jako impedance a admittance. To se hodí v případě střídavých signálů a vstupní a výstupní impedance jsou poté:

Sériová ZV	Paralelní ZV
Vstupní impedance: $Z_{in} = Z_i F$	Vstupní admitance: $Y_{in} = Y_i F$
Výstupní admitance $Y_{out} = Y_o F$	Výstupní impedance $Z_{out} = Z_o F$

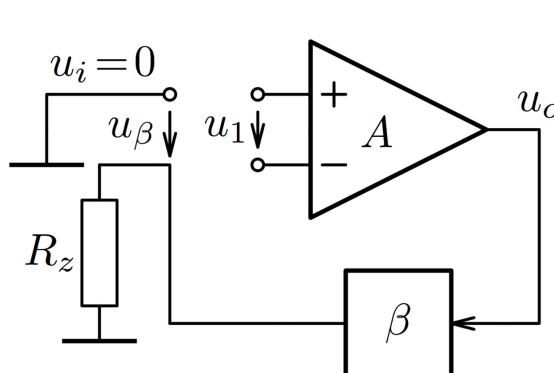
Tabulka 2: Výsledné impedance a admitance pro daná zapojení,  $F = 1 + \beta A$ ,  $Z_i = \frac{1}{Y_i}$  a  $Z_o = \frac{1}{Y_o}$  pro  $A = 0$

7 Jak se zajišťuje stabilita ZV soustav a co musí platit pro stabilní systém? Vysvětlete pojem „fázová jistota“ a „doplňkový zisk“. Co je to kmitočtová kompenzace zesilovače a proč se používá?

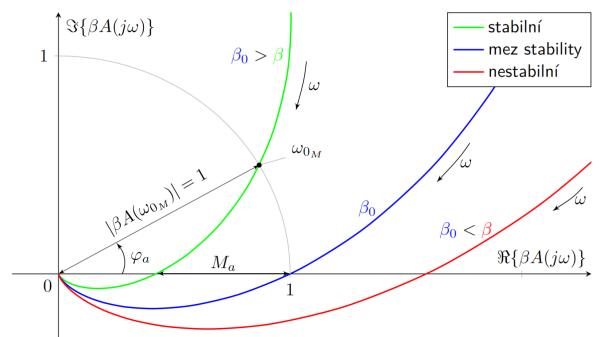
Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

### Stabilita zpětnovazebné soustavy - co zajišťuje & podmínky

Stabilita se ověřuje v tzv. open loop zapojení - zapojení s rozpojenou zpětnovazební smyčkou viz schéma 6a. Zatěžovací odpor  $R_z$  je dán zapojením ZV (sériová/paralelní), vstupním odporem a vnitřním odporem zesilovače.



(a) Určení přenosu rozpojené ZV smyčky



(b) Kmitočtové charakteristiky pro různé hodnoty  $\beta$

Obrázek 6: Zjišťování stability ZV soustav

$\beta A < 0 (F > 1)$	stabilní záporná ZV
$\beta A = 0 (F = 0)$	obvod bez vazby
$0 < \beta A < 1 (1 > F > 0)$	stabilní kladná vazba
$\beta A = 1 (F = 0)$	mez stability, obvod kmitá

Tabulka 3: Stabilita pro různé činitele  $\beta A$  resp. vrazný rozdíl  $F$

## Fázová jistota a doplňkový zisk

Abychom zajistili stabilitu systému, tak kmitočtová charakteristika viz graf 6b by měla protnout jednotkovou kružnici lehce nad reálnou osou. Jak je vidět v grafu, úhel  $\varphi_a = 30^\circ$  a nazývá se fázová jistota. Jde o bod, kde  $|\beta A(\omega_{0_M})| = 1$  a tedy  $\varphi_{\beta A}(\omega_{0_M}) = \varphi_a > 30^\circ$ .

**Lidsky:** kmitočet  $\omega_{0_M}$  je právě ten, při kterém charakteristika protne jednotkovou kružnici a tento průnik by měl svírat úhel větší jak  $30^\circ$

**Doplňkový zisk** je poté definován jako

$$M_a = 1 - |\beta A(\omega_{0_\varphi})| > 10 \text{ dB}.$$

Jedná se o vzdálenost mezi jedničkou a bodem, kde protíná zelená charakteristika reálnou osu.

Přenos skrze zesilovač a zpětnou vazbu bude následně

$$A' = \beta A = \frac{u_\beta}{u_1} = \frac{U_\beta(s)}{U_1(s)}$$

## Kmitočtová kompenzace

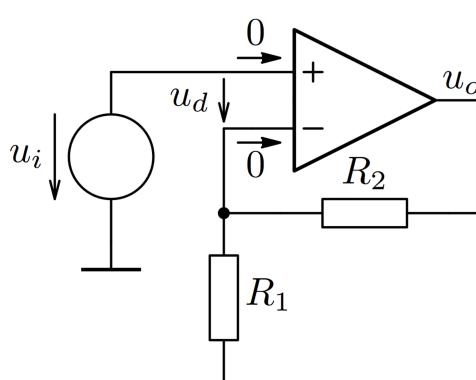
Při zesilování střídavého napětí se směrem k vyšším kmitočtům snižuje zesílení a mění fáze signálu. To bývá příčinou nestability. Pokud se totiž fáze změní až o  $180^\circ$ , změní se původně záporná zpětná vazba na kladnou a OZ se rozkmitá. Proto se zavádí kmitočtová kompenzace.

Jde o techniku **přidání dominantního pólu**, aby byla soustava stabilní i pro vysoké kmitočty, při kterých by jinak docházelo k obracení fáze rozpojené zpětnovazební smyčky.

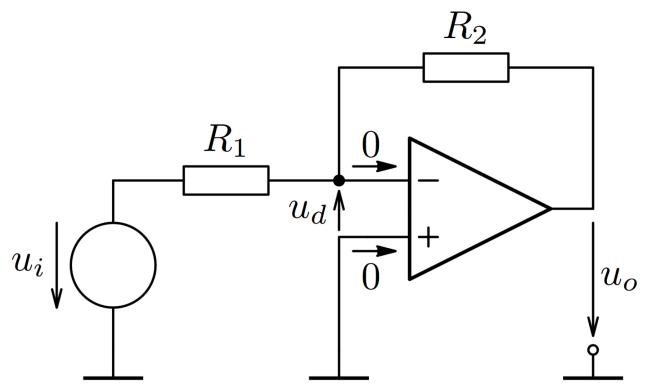
## 8 Nakreslete invertující a neinvertující zesilovače s OZ a odvod'te vztah pro napěťové zesílení v případě ideálního OZ. Jaký je vstupní odpor zapojení?

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

**Motivace:** důležitá věc pro praxi, tohle je fakt dobrý mít zmáknutý.



(a) Neinvertující zesilovač



(b) Invertující zesilovač

Obrázek 7: Dvě úplně nějvíc basic zapojení zesilovačů s operákama

### Odvození vztahu

Dvě MEGAMEGAMEGAmoc důležité mantry:

1. Pokud se k operáku chováme hezky, tak si výstup řídí tak, aby na vstupu byla **stejná napětí**
2. Do vstupů operáku **neteče žádný proud**

Tyto mantry jsou největší základ při odvozování vztahů. Opravdu je důležité je umět. S tímto se tedy můžeme vydat do světa odvozování:

#### Neinvertující zesilovač

Na neinvertujícím (+) vstupu je napětí  $u_i$ . Mantra říká, že i na invertujícím (-) vstupu bude  $u_i$ . Napětí  $u_i$  bude i na výstupu dělícem rezistory  $R_1$  a  $R_2$ . To nám dává do ruky následující vztah:

$$u_i = u_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Nyní si už stačí vyjádřit  $u_o$ :

$$u_o = u_i \frac{R_1 + R_2}{R_1} = u_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Zesílení je následně dáno poměrem výstupu a vstupu a tedy dostaneme

$$\underline{\underline{A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}}}.$$

Mega cool vlastnost je vstupní odpor tohoto zapojení. Jak mantra říká - do vstupu nic neteče - a tedy se vstup chová jako nekonečný odpor. Velice užitečné na měření slabých signálů (např. EKG).

$$\underline{\underline{R_{in} = \infty}}$$

## Invertující zesilovač

Úvaha pro invertující zesilovač je lehce složitější, ale ne zase tolik:

Jestliže je neinvertující vstup připojen na zem, tak napětí na něm bude 0 V. Stejné napětí bude také na invertujícím vstupu (to říká jedna z manter). Napětí zde bude vůči zemi 0 V a někdy se tomuto bodu říká **virtuální zem**. Druhá mantra říká, že do vstupu operáku nic neteče. Tedy proud skrze  $R_1$  musí v plné síle protéct také skrze  $R_2$ .

Proud tekoucí skrze  $R_1$  je snadné spočítat, jelikož na jedné straně má  $u_i$  a na druhé straně 0 V, které si tam hlídá operák. Tedy pro proud platí:

$$i_i = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$$

Stejný proud bude protékat také skrze  $R_2$  (mantra 2) a tento proud způsobí úbytek napětí. Úbytek napětí na rezistoru  $R_2$  bude:

$$u_{R2} = i_{R2} \cdot R_2 = i_i R_2 = \frac{u_i}{R_1} R_2 \quad (17)$$

Ted' je ale potřeba se zamyslet. Proud teče jedním směrem. Od zdroje  $u_i$  skrze  $R_1$  a  $R_2$  do výstupu operáku, který slouží jako proudová nora (já vím, je to výstup a přitom do něj teče proud... prostě... smiřte se s tím a bude vám líp). Pokud jsme se ale napěťově od  $u_i$  dostali přes rezistor  $R_1$  na nulu, tak logicky po rezistoru  $R_2$  musí být napětí záporné.<sup>3</sup>

Všimněte si, že ve schématu s invertujícím operákiem měříme napětí na  $R_2$  od invertujícího vstupu (virtuální zem) k  $u_o$ . Pokud se ale bavíme o napětí na výstupu měříme napětí od  $u_o$  k zemi. Tedy je opačný smysl měření napětí a výsledné napětí  $u_o$  bude záporné:  $u_{R2} = -u_o$ . Po dosazení do rovnice (17) dostaneme:

$$u_o = -u_{R2} = -i_{R2} R_2 = -i_i R_2 = -\frac{u_i}{R_1} R_2$$

Zesílení je poměr výstupu  $u_o$  ku vstupu  $u_i$  a tedy

$$\underline{\underline{A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1}}}.$$

Vstupní odpor je zde dán čistě  $R_1$ , jeslikož je to jediný odpor, který vidí signál vidí vůči zemi. Byť je to v tomto případě zem virtuální.

$$\underline{\underline{R_{in} = R_1}}$$

<sup>3</sup>Představte si, že napouštíte nádobu vodou a chcete mít hladinu přesně na nějaké rysce. Pustíte kohoutek  $u_i$  a ted' upouštíte výpusť vaničky  $u_o$  tak, aby si hladina sedla na rysku. Ryska bude potencální nula a vy musíte jít výpustí  $u_o$  tak moc do záporu, aby si hladina sedla tam, kam má.

## 9 Nakreslete zapojení invertujícího sumátoru s OZ a odvodte vztahy pro výstupní napětí v případě ideálního OZ.

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

**Motivace:** proudová sčítačka. Pokud chcete míchat např. audiosignály, proudová sčítačka je nejjednodušší řešení, jelikož se signály navzájem neovlivňují (jak se dále dozvímme).

Díky rezistorům  $R_1 \dots R_n$  můžeme váhovat vstupní signály  $u_1 \dots u_n$ . A jak to tedy funguje?

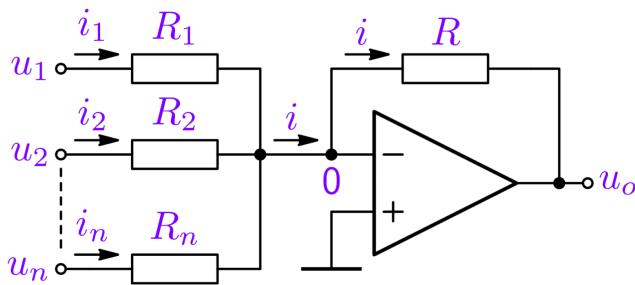


Schéma 7: Zapojení invertujícího sumátoru (proudové sčítačky)

Mantra říká, že do vstupu operáku nic neteče. Také říká, že na vstupech bude stejně napětí. Jestliže každý vstup vyrobí proud o velikosti  $i_k = \frac{u_k}{R_k}$  pro  $k \in (1..n)$ , tak celkový proud tekoucí do uzlu bude:

$$i_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n i_k.$$

Stejný proud ale musí také někudy odtéct a odteče jen a pouze rezistorem R. Aby mohl takový proud odtéct, musí operační zesilovač stáhnout svůj výstup do záporna. A jak moc do záporna?

$$u_o = -u_R = -i_{\Sigma}R = -R \sum_{k=1}^n i_k = -R \sum_{k=1}^n \frac{u_k}{R_k} \quad (18)$$

V motivaci bylo zmíněno, že se signály neovlivňují. Dokud je schopen OZ držet výše zmíněnou **virtuální zem**, každý vstup si bude myslet, že je jeho odpovídající rezistor  $R_k$  skutečně připojen na zem resp. na fixní potenciál 0 V. Ačkoliv ho jen OZ bullshituje, protože koriguje výstup tak, aby na tomto sčítacím bodě bylo 0 V.

### A proč to taky umět?

Protože tohle bylo ve zkoušce. Na první pohled divoký obvod je ve výsledku pouze jen nejjednodušší zapojení invertujícího sumátoru.

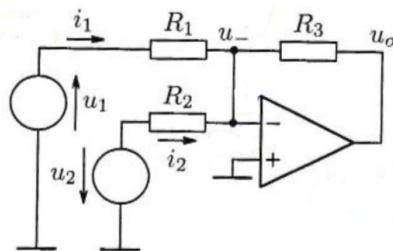


Schéma 8: Úloha z testu za 14 bodů

- 10 Nakreslete rozdílový zesilovač s OZ a odvod'te vztah pro výstupní napětí v případě ideálního OZ. Definujte rozdílovou a souhlasnou složku vstupního signálu a odvod'te podmínu, pro kterou je souhlasná složka zesílení nulová. Co udává parametr CMRR?

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

### Schéma, odvození vztahu

**Motivace:** rozdílový zesilovač je supr čupr věc, která bere v pozaz pouze rozdíl signálů. Pokud někam vedete signál dvěma vodiči a nedejbože by se vám na nich naindukoval nějaký bordel, tak to je rozdílovému zesilovači úúúplně buřt. To proto, že naindukovaný bordel bude pro oba vodiče stejný a to náš zesík nezajímá. Náš zesík zajímá pouze rozdíl signálů a ten zůstane nepolíben. Docela cool, co?

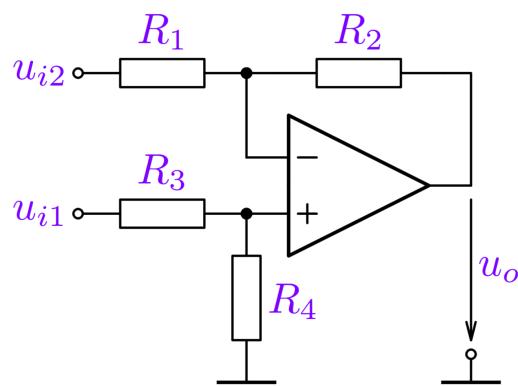


Schéma 9: Rozdílový zesilovač s OZ

Při odvozování si pomůžeme superpozicí. Super pozice je třeba v hospodě, ale superpozice nám pomůže teď stejně dobře. Vždy jeden vstup uzemníme a počítáme ten neuzemněný: **Vlevo** vidíme

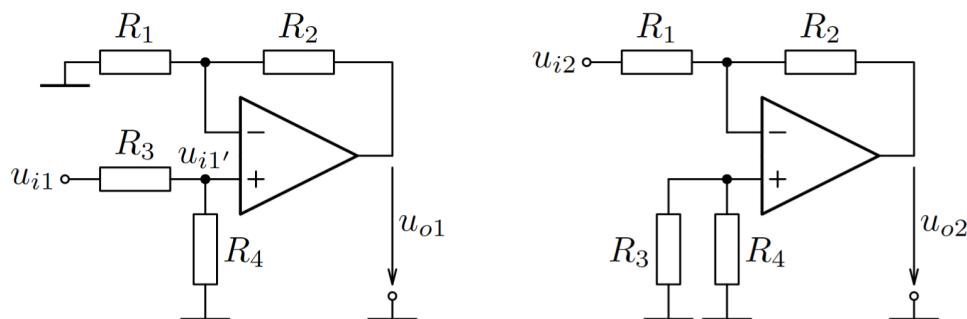


Schéma 10: Superpozice rozdílového zesilovače

(sice vzůru nohama, ale přece) neinvertující zesilovač. Jen je zde navíc na vstupu do zesilovače další dělič napětí ( $u'_{i1} = u_{i1} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$ ). Tedy pro napětí  $u_{o1}$  platí

$$u_{o1} = u'_{i1} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = u_{i1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

**Vpravo** se nám zase narodil invertující zesilovač. Uzemněné rezistory  $R_3, R_4$  nehrají roli a pro zesílení resp. výstupní napětí plaví obyč vztah

$$u_{o2} = -u_{i2} \frac{R_2}{R_1}$$

Sečtením superponovaných napětí  $u_{o1,2}$  dostaneme výsledný vztah pro  $u_o$

$$u_o = u_{i1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - u_{i2} \frac{R_2}{R_1}. \quad (19)$$

Fuj, to je hnusnej vztah, kdo si to má pamatovat? Pokud si nebudeme znepříjemňovat život a budeme se držet podmínky, že

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1},$$

tak pro výsledné napětí můžeme psát

$$\underline{\underline{u_o = \frac{R_2}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})}}. \quad (20)$$

Vstupní odpor pro rozdílový signál bude

$$\underline{\underline{R_{i_d} = R_1 + R_3}}. \quad (21)$$

### Souhlasná a rozdílová složka + podmínka

Souhlasná složka je definována jako

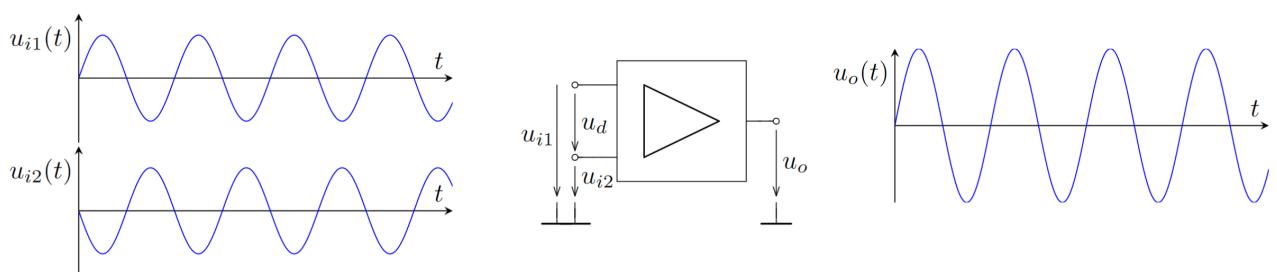
$$u_s = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}.$$

Rozdílová poté jako

$$u_d = u_{i1} - u_{i2}.$$

**Podmínka**, aby byla souhlasná složka rušení nulová:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (22)$$



Obrázek 8: Oba vstupy vedou signál - s opačnou polaritou. Tedy souhlasná složka  $u_s$  bude nulová

## Co je to CMRR

Common Mode Rejection Ratio.

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_s} \right| \quad (23)$$

Sice by bylo naprostě epesní, kdyby zesilovač skutečně zesiloval pouze rozdíl, ale on bohužel zesiluje i tu souhlasnou složku. Maximizací CMRR se rozumí co největší poměr zesílení rozdílové složky vůči zesílení souhlasné složky.

**11 Nakreslete zapojení převodníku proud-napětí s OZ a odvodte převodní vztah pro případ ideálního OZ. Jaké jsou hlavní výhody a nevýhody uvedené implementace.**

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

**Motivace:** pokud posvitíme na fotodiodu, tak začne generovat proud úměrný intenzitě osvitu. Tento proud (řádově  $\mu\text{A}$ ) ale potřebujeme převést na napětí, abychom ho mohli snímat např. mikrokontrolérem. Proto využijeme převodník proud → napětí.

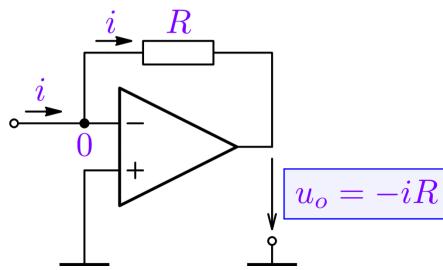


Schéma 11: Převodník proud - napětí

Proud tekoucí do uzlu na invertujícím vstupu musí v plné síle protéct dál do rezistoru  $R$ . Na vstupech operáku je stejné napětí a jelikož je neinvertující vstup uzeměn, tak i na invertujícím vstupu bude 0 V. Proud  $i$  tekoucí do převodníku poteče skrz rezistor, kde nastane úbytek napětí

$$\underline{\underline{u_o = -i R}} \quad (24)$$

**Výhody:** s dobrým operačním zesilovačem lze dosáhnout veliké přesnosti<sup>4</sup>

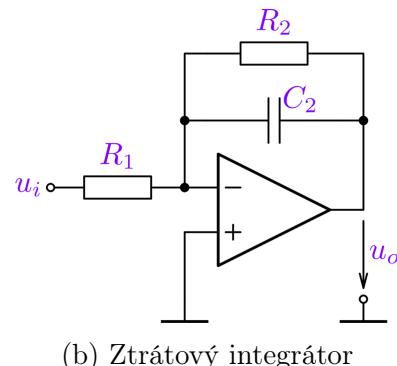
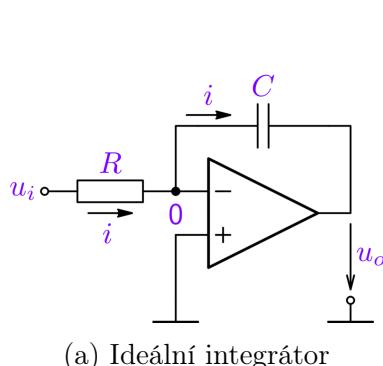
**Nevýhody:** stejný proud, který snímáme, musí být operační zesilovač schopen odebrat na výstupu (current sink) - omezený rozsah. Další nevýhoda zapojení ve schématu 11 je to, že můžeme snímat pouze proud, který by jinak tekl do země. To proto, že na invertujícím vstupu je **virtuální zem**. Nemůžeme tedy např. snímat proud tekoucí do báze tranzistoru, jelikož náš obvod umí snímat pouze proudy, které mají téct do země.

<sup>4</sup>Snažíme se minimalizovat proud, který poteče do vstupu operačního zesilovače. V datasheetu se tento parametr jmenuje input bias current a u obyč operáku může mít řádově  $\mu\text{A}$ . U spešl operáku se dostaneme až na jednotky fA. FEMPTOAMPÉRY!! Zde vyložene počítáte počet kuliček elektronů za sekundu.

## 12 Nakreslete zapojení ideálního a ztrátového invertujícího integrátoru s OZ. Odvod'te jejich přenos a nakreslete modulové charakteristiky s popisem významných hodnot uvedených v odvození.

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

**Motivace:** Mega cool shit, můžete integrovat signál a nepotřebujete k tomu ani matlab. Lze využít také např. pro převod z obdélníkového signálu na trojúhelníkový.



### Ideální integrátor

Pro proud tekoucí kondenzátorem platí

$$i(t) = C \frac{du}{dt}.$$

Z toho si lze vyjádřit napětí jako

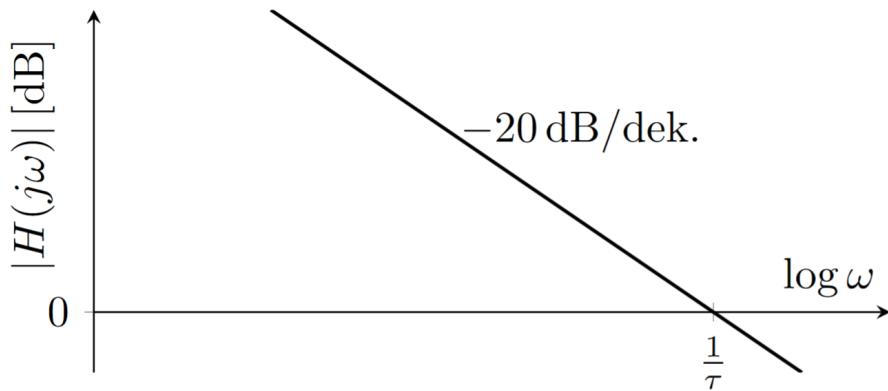
$$u(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(x) dx = //i = \frac{u_i}{R} // = u_c(0) + \frac{1}{RC} \int_0^t u(x) dx.$$

Naše zapojení vypadá skoro jako invertující zesilovač, jen místo jednoho rezistoru je kondenzátor. U popisu invertujícího zesilovače jsme dělali jistou myšlenkovou gymnastiku, abychom vysvětlili, proč bude na výstupu **záporné** napětí. (napětí na kondenzátoru měříme ve směru proudu tedy od invertujícího vstupu (0 V) vůči výstupu operáku). Naopak napětí na výstupu měříme od onoho výstupu vůči zemi - tedy opačný směr a opačné znaménko.

$$u_o(t) = -u_c(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u(x) dx.$$

Přenos systému je poté

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{1}{s\tau}, \quad \tau = RC \quad (25)$$



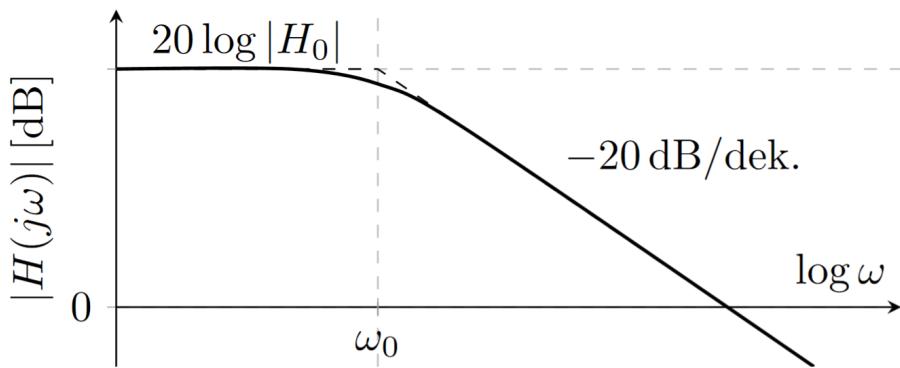
Graf 2: Přenos ideálního integrátoru

### Ztrátový integrátor

Kondenzátor by se nám ale při integraci mohl nabíjet do nekonečna. Abychom zabránili tomu, že narazíme na limit napájecího napětí operačního zesilovače, přidáme paralelně s kondenzátorem ještě rezistor. Ten zajistí, že maximální napětí na výstupu bude omezeno „jako kdyby to byl jen invertující zesilovač“.

$$H(s) = -\frac{Z_2}{R_1} = \frac{\frac{R_2}{1+sC_2R_2}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1+sC_2R_2} = \frac{H_0}{1+s\tau}, \quad (26)$$

kde  $H_0 = -\frac{R_2}{R_1}$ ,  $\tau_2 = C_2R_2$ ,  $\omega_0 = \frac{1}{\tau_2}$



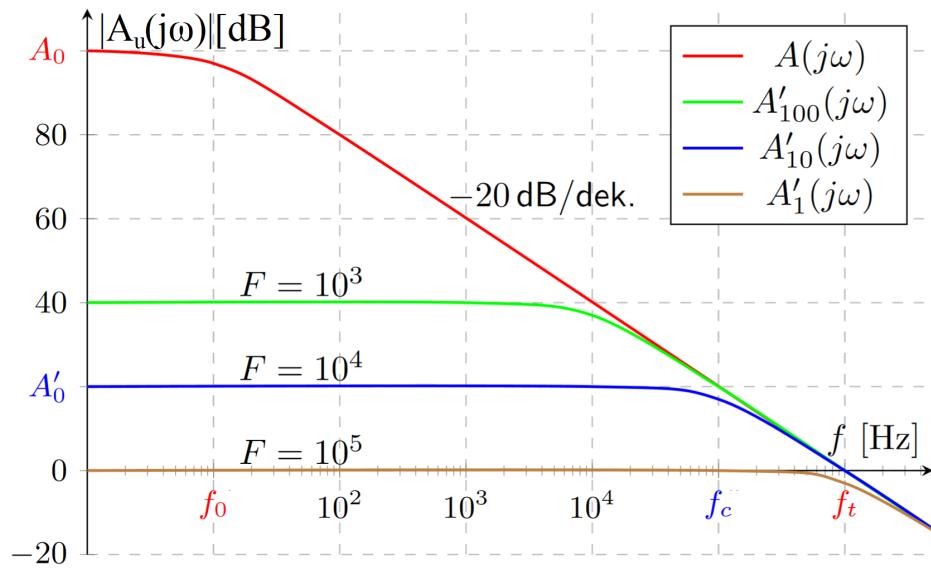
Graf 3: Přenos ztrátového integrátoru

*Pozn:* chová se to jako lowpass, což není náhoda u systémů, co integrují vstupní signál. Pokud půjdeme s frekvencí nízko, tak se kondenzátor bude chovat jako rozpojené svorky a tedy se uplatní pouze rezistory tvořící invertující zesilovač. Naopak při vysokých frekvencích se bude kondenzátor chovat jako zkrat a paralelní kombinace  $R_2||C_2$  bude mít minimální odpor. Zesílení zesilovače je dáno jako  $A_u = -\frac{R_2||C_2}{R_1}$ . Jestliže se pro vysoké frce snižuje impedance paralelní kombinace, bude se pro vyšší frce snižovat také zesílení. Cool init?

- 13 Nakreslete typické modulové charakteristiky neinvertujícího zesilovače s OZ pro zesílení  $A_u = 1, 10$  a  $100$ , pokud je tranzitní kmitočet OZ  $f_t = 1$  MHz

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

Modulová charakteristika resp. přenos v závislosti na frekvenci je zobrazen v grafu 4. Zesílení jsou v rámečku napsaná a tranzientní kmitočet  $f_t$  je tam, kde to jde prostě všechno do kopru. V ten moment přestane zesilovač zesilovat.



Graf 4: Modulové charakteristiky operačního zesilovače

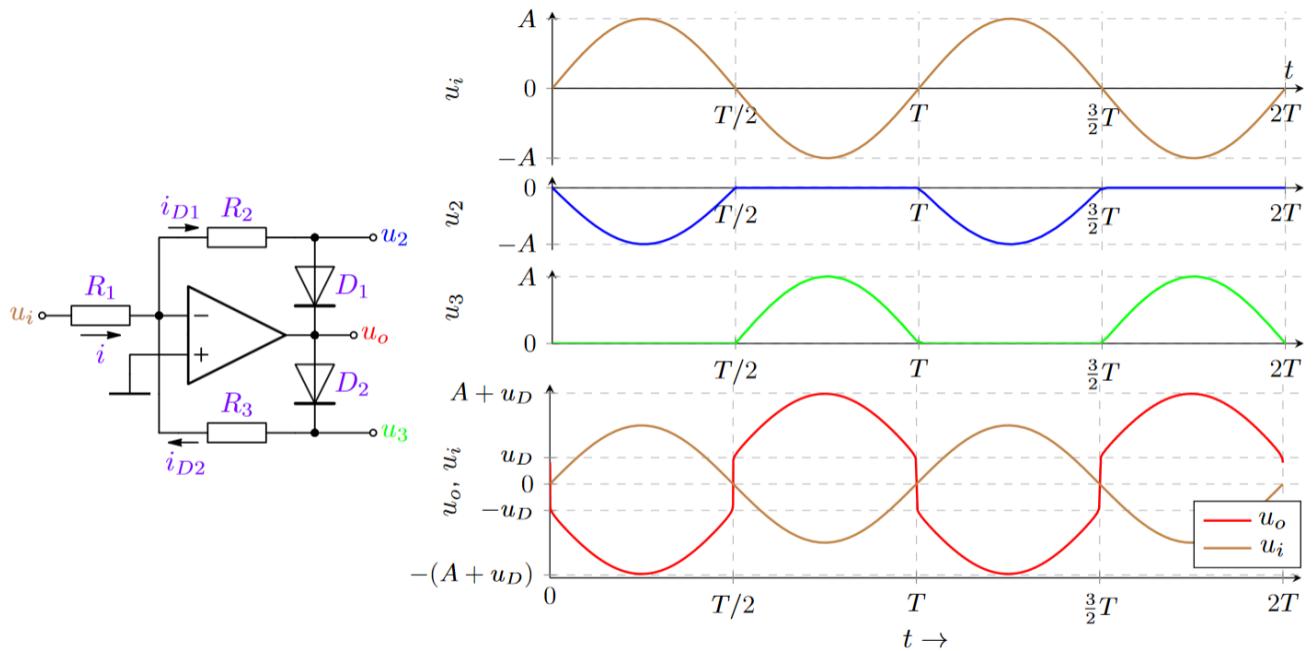
Červená křivka  $A$  je open loop zesílení bez zavedené zpětné vazby. Další průběhy jsou již pro OZ se zpětnou vazbou.

- 14 Nakreslete zapojení jednocestného usměrňovače s OZ, popište jeho činnost a nakreslete časové průběhy na jednotlivých výstupech, včetně výstupu vlastního OZ při harmonickém buzení.

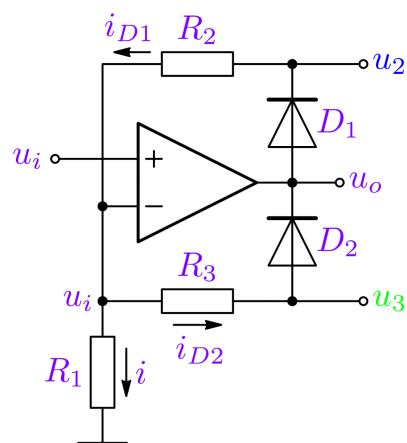
Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

**Motivace:** reálná dioda se začne otevírat až v momentě, kdy úbytek napětí na ní je větší než cca  $u_d = 0.6$  V. Proto je nemožné usměrňovat signály s nižším napětím. Tento problém elegantně řeší právě usměrňovač s OZ, který dokáže kompenzovat úbytek napětí na diodě.

Zapojení se chová jako klasický invertující zesilovač s tím rozdílem, že ve zpětné vazbě je dioda, která ubírá cca  $u_d = 0.6$  V. O tuto hodnotu bude vždy výstup offsetnut. Pokud má operák zajistit na invertujícím vstupu 0 V, musí napětí na výstupu ještě „přebít“ úbytek napětí na diodě. Jak je vidět na dolním grafu z obrázku 10.



Obrázek 10: Jednocestný invertující usměrňovač



Obrázek 11: Jednocestný neinvertující zesilovač

**15 Nakreslete zapojení dvoucestného usměrňovače s OZ, popište jeho činnost a nakreslete časové průběhy na jednotlivých výstupech při harmonickém buzení.**

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách

**Motivace** stejná jako u jednocestného, ale místo toho, aby se záporná složka ořízla a poslala do kopru, tak je přivedena a invertována. Viz dále.

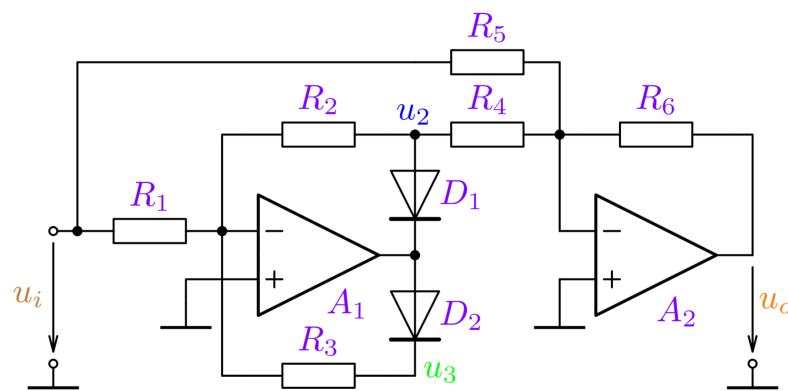
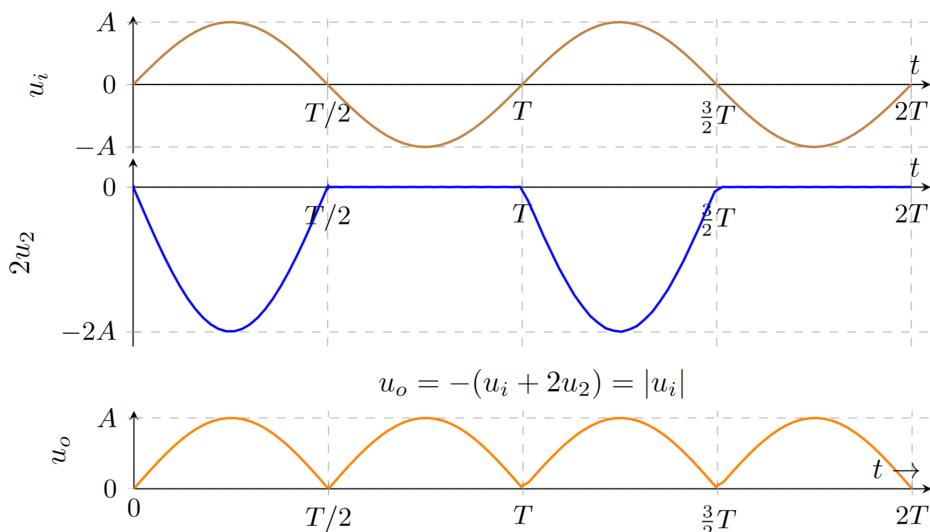


Schéma 12: Dvoucestný usměrňovač s proudovou sčítávkou



Graf 5: Časové průběhy v obvodu s dvoucestným usměrňovačem

Schéma 12 je tvořeno dvěma bloky. Jednocestným usměrňovačem a sčítávkou napětí (proud). Jak bylo zmíněno v kapitole od OZ, tato sčítáčka obrací polaritu. Výstup jednocestného usměrňovače je v bodě  $u_2$ . Odtud jde signál skrze  $R_4$  do sčítáčky. Origo signál jde do sčítáčky skrze  $R_5$ . Rezistory  $R_4$  a  $R_5$  slouží k váhování vstupních signálů jdoucích do sčítáčky a pokud chceme docílit modrého průběhu ve grafu 5, musí platit, že  $R_5 = 2R_4$ . Díky tomu bude výstup jednocestného usměrňovače dvakrát větší zesílení oproti signálu jdoucí do  $R_5$ .

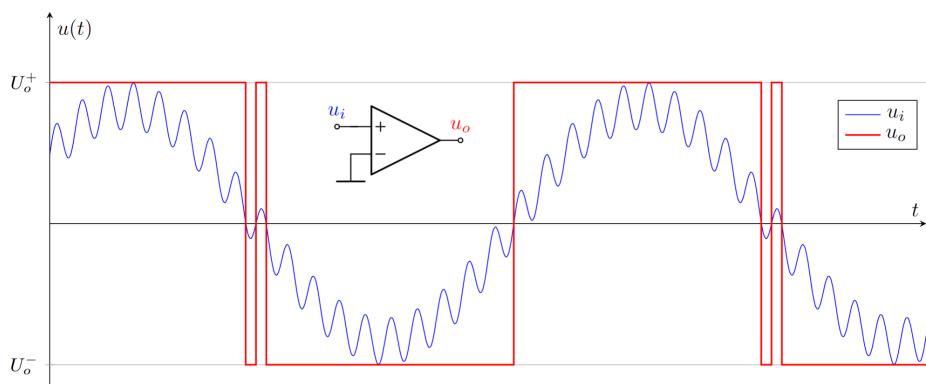
Z grafu je poté patrné, že sčítáčka takto sečte vstupní signály (hnědý a modrý) a vznikne signál oranžový.

**16 Nakreslete zapojení neinvertujícího a invertujícího komparátoru s hysterezí, uvedte jeho převodní charakteristiku a odvodte vztahy pro překlápací úrovně.**

BACHA! tady už neplatí mantra o OZ z kapitoly 8, že na vstupech si OZ hlídá stejné napětí. Toto není zapojení zesilovače se ZZV a nechováme se k chudákovi operákovi hezky.

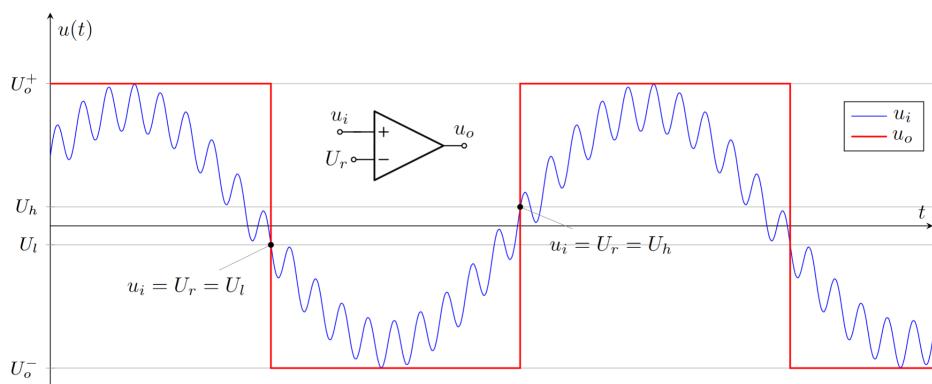
*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

**Motivace:** pokud máme např. pomalé průběhy, nebo zašumělý signál, může nastat situace, kdy komparátor sice detekuje dostatečně vysoké napětí a na výstup dá odpovídající hodnotu, ale šum může způsobit krátké oscilace, jak se zobrazeno na grafu 6.



Graf 6: Výstup komparátoru bez hystereze

Pokud zavedeme hysterezu, bude výstup komparátoru vypadat následovně:



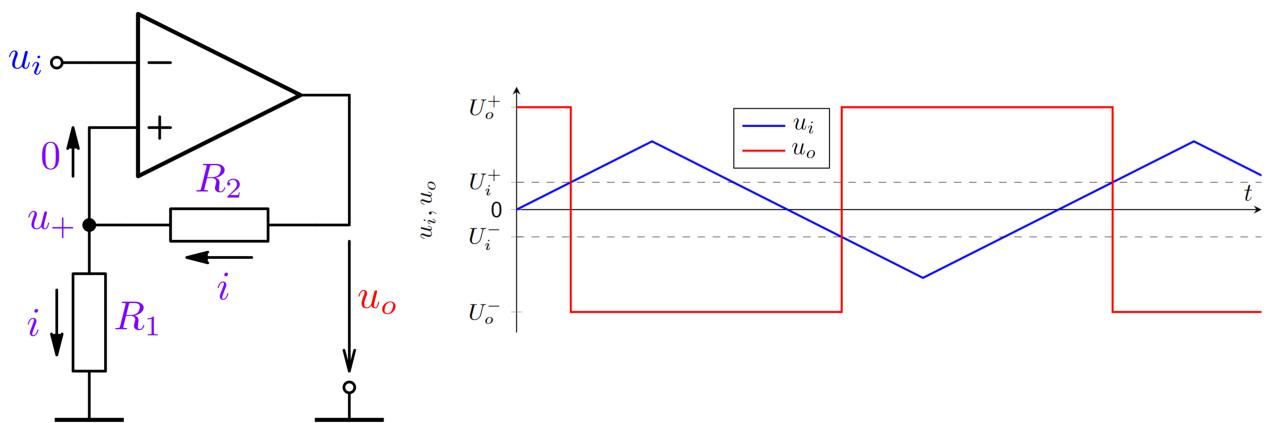
Graf 7: Výstup komparátoru s hysterezí

## Invertující komparátor s hysterezí

Všimněte si, že invertující komparátor na obr. 12 skoro vypadá jako neinvertující zesilovač, ale vstupy (+) a (-) jsou prohozené.

**Jak to funguje?** Operační zesilovač zesiluje rozdíl na svých vstupech. S tím, jak obrovské je zesílení samotného zesilovače ( $A = 10^6$ ), stačí, aby rozdíl mezi vstupy byl jen malinkatý a zesilovač jde hned do saturace - na výstup hodí svoje napájecí napětí  $U_o^+$  pro  $u_+ > u_-$  nebo  $U_o^-$  pro  $u_+ < u_-$ .

V momentě, kdy vstupní napětí  $u_i$  (shodné s  $u_-$ ) bude vyšší jak  $u_+$ , výstup se stáhne dolů ( $U_o^-$  pro  $u_+ < u_-$ ) a OZ dojde do saturace - na výstupu bude záporné napájecí napětí. Díky zavedenému děliče napětí se ale najednou na  $u_+$  objeví lehce záporné napětí. Pokud bychom chtěli překlopit výstup nahoru (aby tam bylo  $U_o^+$ ), musíme splnit, že  $u_+ > u_-$ . Na vstup  $u_+$  nám ale teď dělič napětí zavedl trochu záporné napětí. Aby byla splněna podmínka pro překlopení, musíme vstupní signál stáhnout ještě více do záporona, než je momentálně  $u_+$ .



Obrázek 12: Schéma a průběhy invertujícího komparátoru s hysterezí

Z toho nám vycházejí překlápací úrovně:

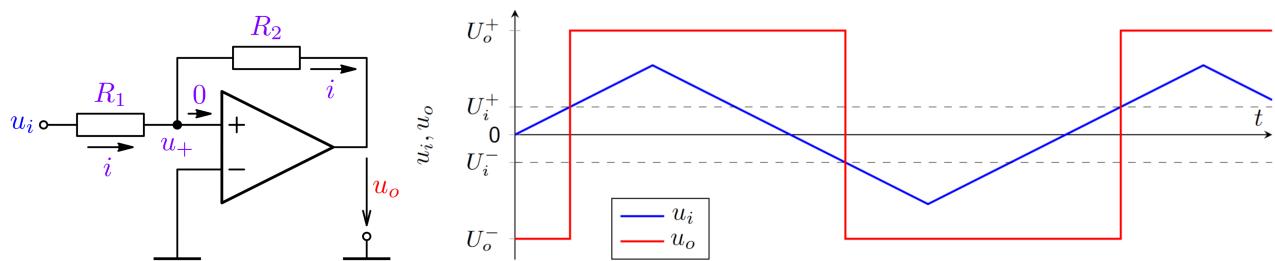
$$\begin{aligned} \underline{\underline{U_i^+ = U_o^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2}}} \\ \underline{\underline{U_i^- = U_o^- \frac{R_1}{R_1 + R_2}}} \end{aligned} \quad (27)$$

## Neinvertující komparátor s hysterezí

Všimněte si, že Neinvertující komparátor na obr. 13 skoro vypadá jako invertující zesilovač, ale vstupy (+) a (-) jsou prohozené.

Operační zesilovač porovnává napětí  $u_+$  vůči zemi. Pokud bude  $u_+ > 0$ , tak  $u_o = U_o^+$  (na výstupu bude kladné napájecí napětí). Pokud  $u_+ < 0$ , tak  $u_o = U_o^-$  (na výstupu bude záporné napájecí napětí).

Pokud bude na výstupu kladné napětí, tak sám operák si do svého vstupu přidává jistý proud. Čiže pokud se na vstupu komparátoru objeví dotečné napětí na překlopení, operák si na vstup  $u_+$  ještě přidá, aby se v tomto překlopeném stavu zafixoval. Pokud bychom chtěli komparátor překlopit dolů s zápornému napájecímu napětí, musíme na vstup komparátoru dát ještě o něco více záporný signál, abychom přebili to, co si tam pouští momentálně nahoru překlopený OZ.



Obrázek 13: Schéma a průběhy neinvertujícího komaparátoru s hysterezí

Pouze pro moment překlopení platí, že na vstupech je stejně napětí, tedy  $u_+ = 0$ . Překlápecí úrovně jsou poté:

$$\begin{aligned} \frac{U_i^+}{R_1} &= \frac{-U_o^-}{R_2} \rightarrow U_i^+ = -U_o^- \frac{R_1}{R_2} \\ \underline{\underline{\frac{U_i^-}{R_1}}} &= \underline{\underline{\frac{-U_o^+}{R_2}}} \rightarrow U_i^- = -U_o^+ \frac{R_1}{R_2} \end{aligned} \quad (28)$$

### Analogie ze života

Představte si, že jste v hospodě a nějaký vnitřní ukazatel vám zabliká, pokud se akorát tak dostanete na hladinu alkoholu, po které vám bude ráno blbě. Hystereze v tomto případě znamená, že do sebe ještě kopnete další tři panáky, abyste si pošéfovali, že jste tuto hladinu překročili dostatečně. Pokud se ale budete chtít vrátit zpět pod hladinku např. pitím vody, budete muset přepít ještě ty tři panáky. Stejně jako signál do komparátoru musí přebýt to, co si tam OZ sám pouští na uzel  $u_+$  skrze  $R_2$ .

## 17 Nakreslete principiální zapojení obvodu S&H (Sample and Hold) s OZ a popište jeho funkci, výhody/ nevýhody a použití.

*Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách*

**Motivace:** velice často využívaný obvod při A/D převodu. Pokud je spínač  $S$  sepnutý, napětí na kondenzátoru  $C$  odpovídá vstupnímu signálu. V momentě rozepnutí spínače zůstane uložena na kondenzátoru poslední hodnota napětí. Díky tomu můžeme „zmrazit“ napětí v daném čase, uložit a dále s ním pracovat - např. změřit.

Operační zesilovač je zde využit jako sledovač napětí viz schéma 13. Jak říká mantra - do vstupu OZ nic neteče. A tedy kondenzátor ve sch. 14 se nebude nijak vybíjet.<sup>5</sup>

V praxi se přidává ještě jeden sledovač napětí mezi spínač a kondenzátor, který řídí napětí na kondenzátoru. Díky tomu nezatěžujeme měřený signál, který by jinak musel nabíjet kondík. Ještě více v praxi se použije čip, kde je to všechno pohromadě.

<sup>5</sup>V praxi do vstupu OZ proud skutečně teče, ale jedná se řádově  $\mu\text{A}$  až  $\text{fA}$ .

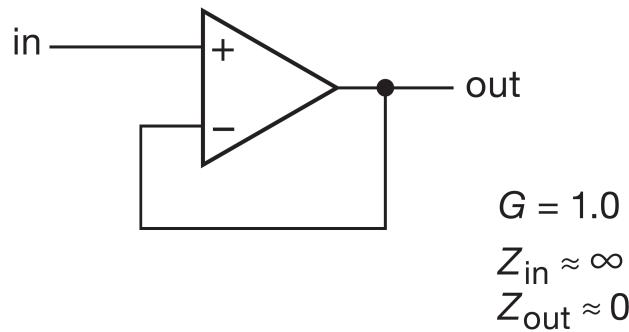


Schéma 13: Operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí

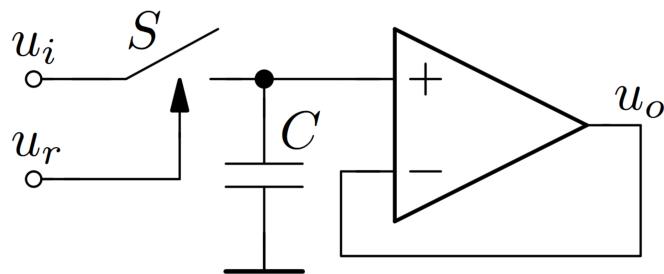


Schéma 14: Operační zesilovač zapojený jako Sample and Hold

- 18 Nakreslete principiální zapojení můstkového oscilátoru. Jaké typy článků (modulových charakteristik) jsou zapojeny v záporné nebo kladné ZV? Co musí být dodrženo, aby výstupní kmity byly harmonické?

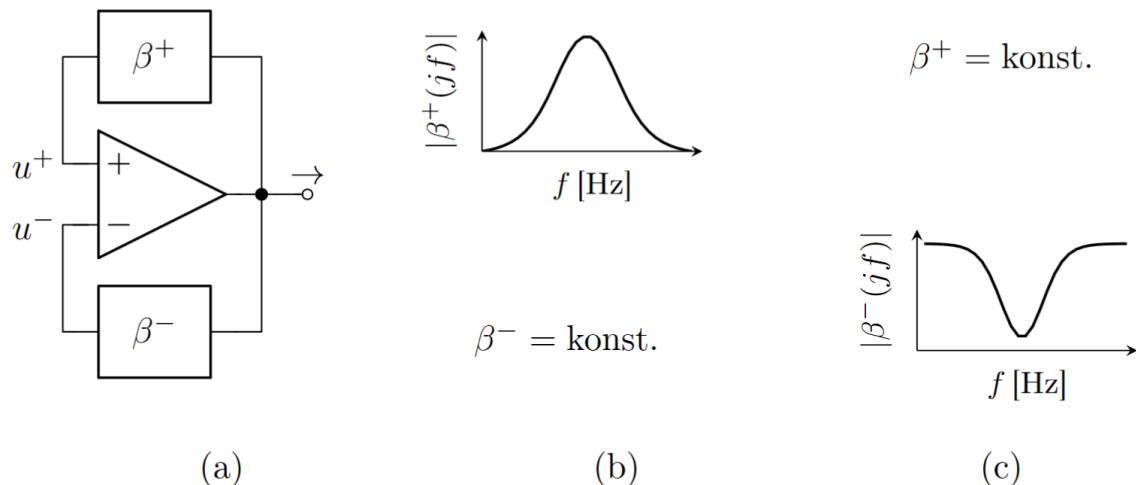
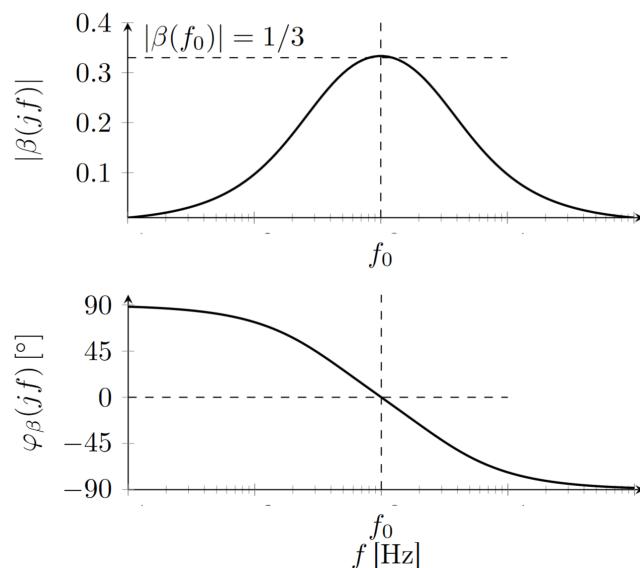


Schéma 15: Principiální blokové schéma můstkového oscilátoru (a) s kmitočtově závislým členem v kladné (b) nebo záporné (c) zpětné vazbě

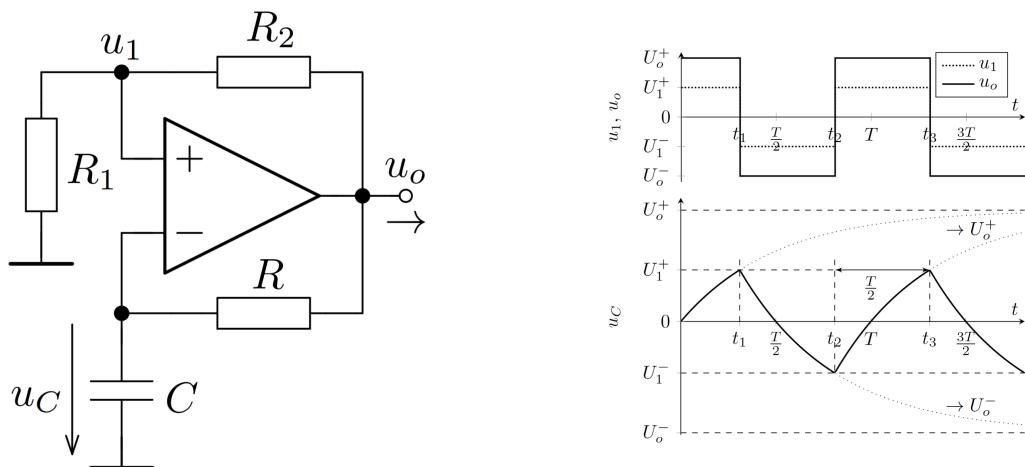
Ve zpětné vazbě je zapojena buď pásmová propust (b) nebo pásmová zádrž (c)



Graf 8: Modulová a fázová charakteristika zpětnovazebního článku

**19 Nakreslete zapojení astabilního klopného obvodu s komparátorem (OZ). Popište princip jeho činnosti a nakreslete časové průběhy důležitých veličin.**

**Motivace** příjemný a jednoduchý obvod na generování obdélníkového signálu. S trohou poladění lze využít i jako napětím řízený oscilátor (využití v syntetizátorech).



(a) Zapojení s operačním zesilovačem a zapojeným jako invertující komparátor

(b) Průběhy napětí na výstupu OZ a na kondenzátoru

Obrázek 14: Astabilní klopný obvod

**A jak to teda funguje?** OZ jde vždy do saturace - tedy na výstupu je buď kladné napájecí napětí  $U_o^+$  nebo záporné napájecí napětí  $U_o^-$ . Kladné napájecí napětí se na výstup dostane, pokud je na neinvertujícím (+) vstupu vyšší napětí než na invertujícím (-) vstupu:

$$U_o^+ \text{ pro } u_+ > u_- \text{ nebo } U_o^- \text{ pro } u_+ < u_-.$$

Než začneme, všiměme si děliče napětí tvořeného rezistory  $R_1$  a  $R_2$ . Výstupní napětí tohoto děliče  $u_1 = U_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  nám bude udávat komparační úroveň pro napětí na kondenzátoru.

Začneme s výstupem, na němž je kladné napájecí napěí a vybitým kondenzátorem.

1. na  $u_o$  je kladné napájecí napětí, na neinvertujícím (+) vstupu je výstupní napětí z děliče  $R_1, R_2$ .
2. Kondenzátor se začne skrze rezistor  $R$  nabíjet a jeho rostoucí napětí je vidět na spodním průběhu v grafu 14b.
3. V momentě, kdy se napětí na kondenzátoru dostane na stejnou hodnotu, jako je napětí na děliči nahoře, obvod se překlopí. To proto, že na invertujícím vstupu je vyšší napětí jak na neinvertujícím a tedy výstup operáku jde dolů na hodnotu záporného napájecího napětí.
4. Na výstupu je záporné napájecí napětí a díky děliči vedoucí na neinvertující vstup se záporné napětí objeví i tam.
5. Kondenzátor se začne vybíjet skrze  $R$ , jak je dále vidět v dolním průběhu ve grafu 14b.
6. V momentě, kdy se kondenzátor vybije tak moc do záporna, že napětí na něm spadne pod výstup děliče, najednou máme na invertujícím vstupu menší napětí jak na neinvertujícím a operák se překlopí a na výstupu OZ se objeví kladné napájecí napětí.

Toto je jedna perioda kmitu, nyní se kondenzátor začne nabíjet a budeme čekat, než napětí na něm přelete hodnotu napětí z děliče.

## 20 Nakreslete zapojení generátoru funkcí trojúhelníkového a obdélníkového průběhu. Popište princip jeho činnosti a nakreslete časové průběhy důležitých veličin.

**Motivace:** další užitečné schéma. A nejen to, dokonce je tvořen z bloků, které jsme již probírali. Vše se krásně spojuje dohromady!

**Popis bloků** - činnost krok za krokem bude následovat níže

V levé části je zapojení integrátoru s OZ (viz kapitola 12). Proud protékající skrze rezistor  $R$  musí protékat také skrze kondik  $C$ . Výstup levého OZ se bude korigovat tak, aby tato podmínka byla zajištěna. Pouze tak dosáhne OZ stejného napětí na svých vstupech - v našem případě 0 V. Při konstantním proudu skrze kondenzátor bude napětí na něm lineárně stoupat/klesat. Zde se rodí trojúhelníkový průběh.

Pozor! Pokud bude téct rezistorem  $R$  proud doprava, musí OZ tento proud také odčerpávat. To zajistí tím, že bude výstup tahat do záporna. Tedy je to invertující integrátor.

Operační zesilovač vpravo se chová jako neinvertující komparátor (viz kapitola 16). V momentě, kdy napětí na výstupu levého OZ překročí komparační úroveň, hodí se na výstup OZ odpovídající napětí.

**A jak to tedy funguje?** Dejme tomu, že na výstupu komparátoru (pravý OZ) bude kladné napájecí napětí:

1. Kladné napětí se objeví i před rezistorem  $R$  a proud poteče doprava. Aby mohl téct proud dále skrz kondenzátor, musí jít výstup levého OZ do záporna (jak je vidět v grafu 14b)
2. Díky hysterezi zavedené rezistory  $R_1$  a  $R_2$  musí jít výstup levého OZ ještě o něco více do záporna, aby se vykompenzovalo to, že výstup komparátoru skrze  $R_2$  tahá svůj neinvertující (+) vstup nahoru. (Analogie z hospody zmíněná dříve.)

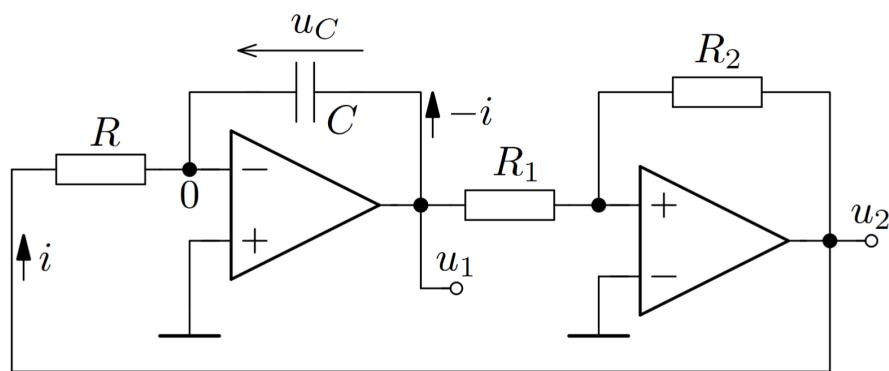
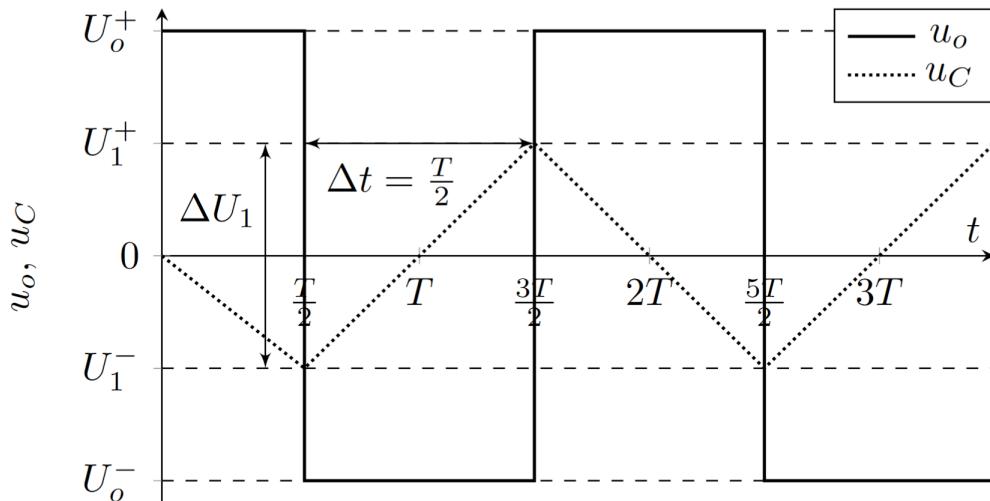


Schéma 16: Generátor funkcí s operačním zesilovačem

3. V momentě, kdy bude napětí dost záporné se komparátor překlopí a na výstup hodí záporné napájecí napětí. Toto napětí se objeví i na rezistoru  $R$  a začne téct proud doleva. Tento proud začne zvyšovat napětí na kondenzátoru a výstup levého OZ se začne zvyšovat.
4. Zvyšovat do té doby, než se dostane na komparační úroveň pravého komparátoru. V ten moment se výstup komparátoru překlopí a vše začne odznova.



Graf 9: Průběhy na výstupech operačních zesilovačů

- 21 Nakreslete blokové schéma fázového závěsu, popište princip jeho činnosti a vysvětlete pojmy pásmo zachycení a pásmo zadržení. Dále nakreslete blokové schéma kmitočtové syntézy s fázovým závěsem a odvod'te vztah pro kmitočet výstupního signálu.

**Motivace:** násobení frekvencí. Mluvil o tom Záhlava, tak to asi bude docela v praxi využitelné.

Fázový závěs je tvořen třemi bloky:

- **Fázový detektor**, který porovnává fázi vstupního signálu a zpětnovazebního signálu
- **Dolní propust** - prostě filtru
- **Napětím řízený oscilátor** - oscilátor, jehož frekvence se nastavuje napětím.

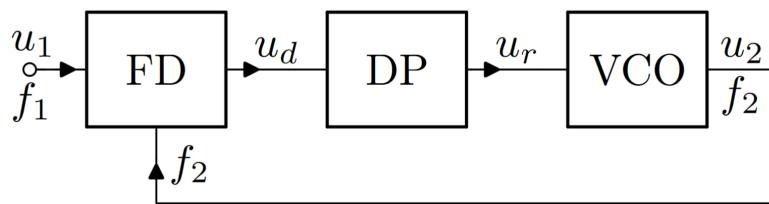
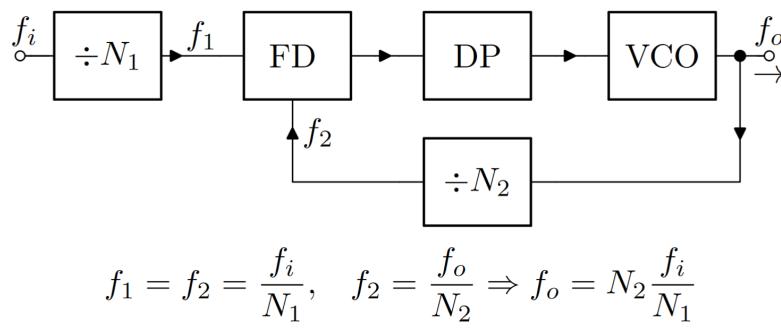


Schéma 17: Blokové schéma fázového závěsu

Napětí  $u_d$  je dáno rozdílem fází vstupního a zpětnovazebního signálu. Tím se mění frekvence VCO tak, aby byla shodná se vstupním signálem.

Hodně cool věc je, že můžeme jednoduše dělit frekvenci ve zpětné vazbě. Díky tomu ošálíme fázový detektor a ten bude oscilátoru přikazovat, aby dělal násobně vyšší frekvenci, aby byla ta vydělená shodná s frekvencí vstupního signálu.



Graf 10: Blokové schéma kmitočtové syntézy resp. násobičky frekvence

Cool, co?

### Pásмо zadřzení

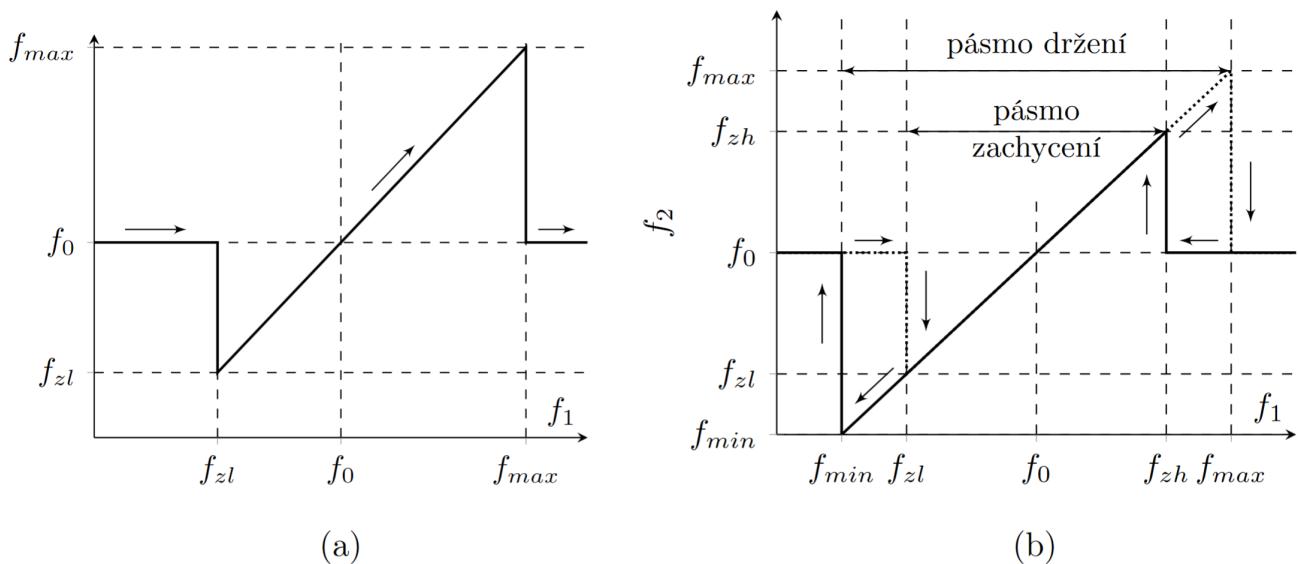
Tomu nerozumím, ale hospodka má dva pěkný grafíky, tak třeba pomůžou a něco z nich vykoukáte:

Snad to nebude ve zkoušce...

- 22 Nakreslete základní zapojení s bipolárním/unipolárním tranzistorem jako spínačem pro buzení uzemněné/neuzemněné LED, resp. odporové/indukční zátěže. Určete vztah pro výpočet a volbu uvedených komponent pro známý proud zátěží  $I_z$  v ustáleném stavu a dané úrovni řídícího napětí**

**Motivace:** můžeme si ukazovat stovky typů zesilovačů, ale stejně je ve výsledku tranzistor nejvíce využíván jako spínač.

Spínání se dělí na *low-side*, kde tranzistorem dovolujeme, aby odtekly proudy do země a na *high-side*, kde pomocí tranzistoru přivádíme napájecí napětí do zátěže.



Graf 11: Závislost výstupního kmitočtu  $f_2$  na vstupním kmitočtu  $f_1$  při přeladování  $f_1$  zdola (a) a shora (b)

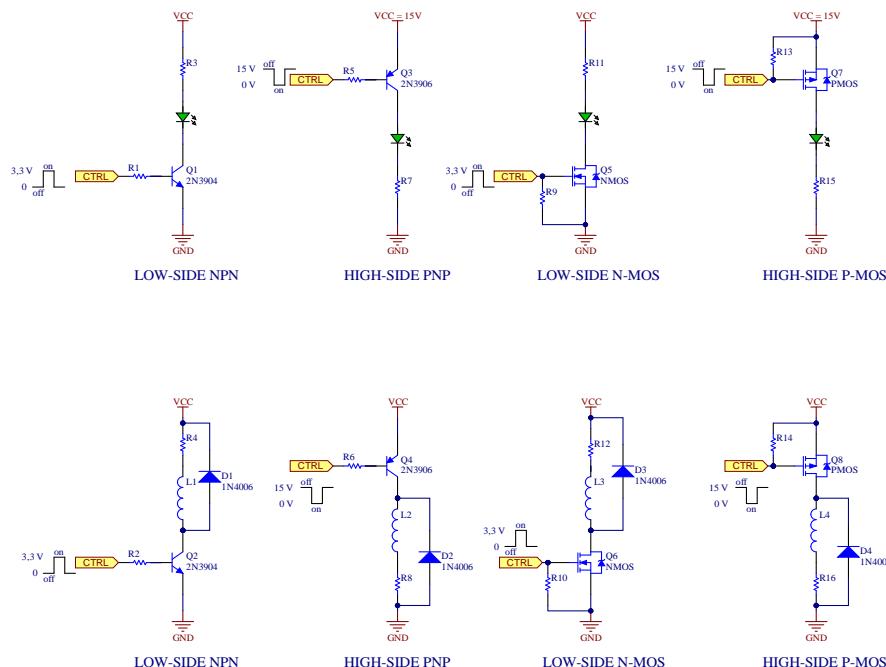


Schéma 18: Základní zapojení tranzistorů jako spínače ke spínání odporové a induktivní zátěže

U NPN tranzistorů a N-kanálových MOSFETů není moc co řešit - přivedeme napětí na bázový rezistor, bází začne protékat proud a tranzistor se sepne. Docela trapná situace nastává u PNP tranzistorů a P-kanálových mosfetů. I zde je otevření tranzistoru řízeno napětím  $U_{BE}$  resp.  $U_{GS}$ . Jelikož máme ale emitor resp. source připojen na napájecí napětí, abyhom tranzistor „vypnuli“, musíme i na bázi přivést napájecí napětí. Nejen, že se nám invertovaly úrovně zapnutí ledky. To se ještě dá přežít. Abyhom vyplí ledku, musíme přivést na bázi resp. gate napětí, které odpovídá  $VCC$ . Pokud je napájecí napětí např. 15 V a  $CTRL$  signál jde z nějakého mikrokontroléru, nemáme šanci tranzistor vypnout. Potřebovali bychom skutečně výstup z mikrokontroléru, co má 15 V. Tak jak na to?

Nezoufejte! Řešení je blízko, je elegantní a je na schématu 19. Místo přímého spínání si zavedeme ještě jeden transistor NPN, který bude spínat koncový PNP resp. P-MOSFET. Jestliže bude na

$CTRL$  vstupu 0 V, NPN tranzistor zůstane vypnutý a na bázi PNP tranzistoru bude  $U_{VCC} = 15$  V. To proto, že nepoteče žádný proud skrze  $R_2$  a nebude na něm žádný úbytek napětí. Tedy PNP tranzistor bude také vypnutý a ledka nebude svítit.

V momentě, kdy přivedem na vstup např. 3.3 V, mezi bází a emitorem NPN tranzistoru se vyrobí úbytek cca 0.6 V, čímž se sepne. Jak se sepne, stáhne se napětí na kolektoru NPN tranzistoru skoro na nulu a tedy bude moct protékat proud rezistorem  $R_3$  ( $R_3$  nás teď nezajímá). Díky tomu poteče proud i bází PNP transistoru a PNP tranzistor se otevře.

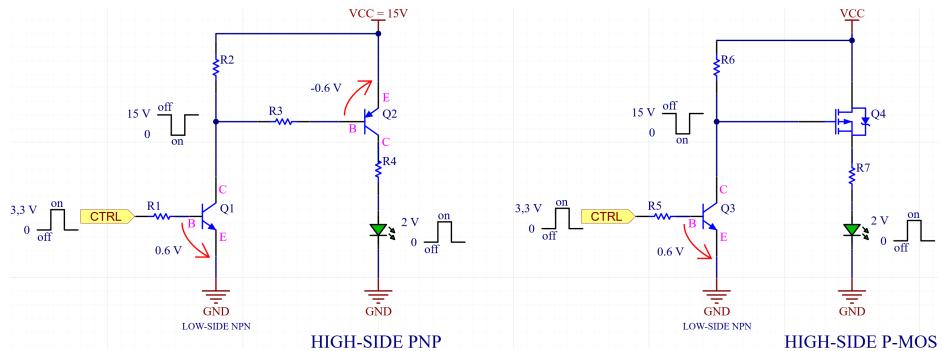


Schéma 19: High-side spínání pomocí omezeného rozsahu napětí řídící logiky

Zkuste si schovat výše uvedená schémata a nakreslete si tato zapojení. Rozhodně si je zapamatujete víc, než pouhým koukáním.

### Výpočet bázového rezistoru a předřadného rezistoru pro LEDku

$$I_{LED} = 15 \text{ mA}, U_{LED} = 2 \text{ V}, U_{VCC} = 15 \text{ V}, U_{CTRL} = 3.3 \text{ V}$$

Následující řádky jsou s ohledem na schéma 18. Proud, který je bipolární tranzistor ochoten pustit z kolektoru do emitoru je  $\beta$ -násobek proudu do báze.

$$I_C = \beta I_B, \quad I_B = \frac{U_{CTRL} - U_{BE}}{R_B} = \frac{U_{CTRL} - 0.6 \text{ V}}{R_B}$$

Tento proud, který je tranzistor ochoten pustit, musí být větší, než proud, který chceme, aby tekl zátěží. Aby byl proud limitován pouze rezistorem v sérii se zátěží a nebyl limitován tranzistorem. Dejme tomu, že zvolíme proud, který je tranzistor ochoten pustit desetinásobný oproti proudu LEDkou:

$$I_B = 10 \cdot \frac{I_C = 15 \text{ mA}}{\beta = 300} = 10 \cdot 0.05 \text{ mA} = 0.5 \text{ mA}$$

Proud tedy známe a napětí na bázovém rezistoru také - to je  $U_{CTRL} - U_{BE}$ . Odpor spočteme jako:

$$R = \frac{U_{RB}}{I_B} = \frac{3.3 - 0.6 \text{ V}}{0.5 \text{ mA}} = 5.4 \text{ k}\Omega.$$

A jak zjistit předřadný odpor k LEDce? Napájení máme 15 V. Na ledce chceme úbytek 2 V a proud ledkou 15 mA. Na předřadném rezistoru tedy musí být úbytek.

$$U_R = U_{VCC} - U_{LED} = 15 - 2 \text{ V} = 13 \text{ V}$$

Proud rezistorem je také 15 mA, takže použijeme ohmův vztah:

$$R_{LED} = \frac{U_{R_{LED}}}{I_{LED}} = \frac{13}{15 \cdot 10^{-3}} = 866 \Omega$$

U unipolárního tranzistoru MOSFET musíme dávat pozor, aby proud, který je tranzistor ochoten pustit:

$$I_D = \frac{1}{2} k_p \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

byl větší, než proud, který požadujeme, aby tekl zátěží. Tady si bud' můžete vyjádřit  $U_{GS}$  anebo nemusíte. Na Gate mosfetu můžete klidně dát rovnou napětí 3.3 V. On tam do gatu stejně žádný proud neteče, takže se nebude nic zatěžovat. Narozdíl od bipolárního tranzistoru, kde naopak chceme co nejmenší proud do báze, abychom zbytečně neuzatězovali řídicí pin mikrokontroléru.

Rezistory u Gatu MOSFETů jsou pulldown/pullup rezistory, které zajistí, že se na Gatu nenaindukuje náboj, který by otevřel přechod (to se děje velice často a pokud tam nedáte pulldown/pullup, tak si poserete život).

Pokud jde o spínání induktivní zátěže, tak je nutné přidat diodu v závěrném směru. Pokud se rychle změní proud cívkou, naindukuje se na ní napětí v opačném směru. Tato špička může prorazit tranzistor a je potřeba paralelní dioda, která tuto špičku pohltí.

### 23 Nakreslete zapojení jednostupňového zesilovače s BJT NPN/PNP v zapojení SE/SB/SC a podle náhradního linearizovaného schématu odvoďte vztah pro jeho vstupní odporník $R_i$ a napěťové zesílení $A_u$ .

**Motivace:** zesilovače aaaaaA!

#### Pár důležitých vztahů na začátek

$$I_C = \beta I_B$$

$$g_m = 40I_C$$

$$g_\pi = \frac{1}{r_\pi} = \frac{g_m}{\beta}$$

$$g_e = \frac{1}{r_e} = \frac{g_m}{\alpha} = \frac{\beta}{r_\pi \alpha} = \frac{\beta + 1}{r_\pi}$$

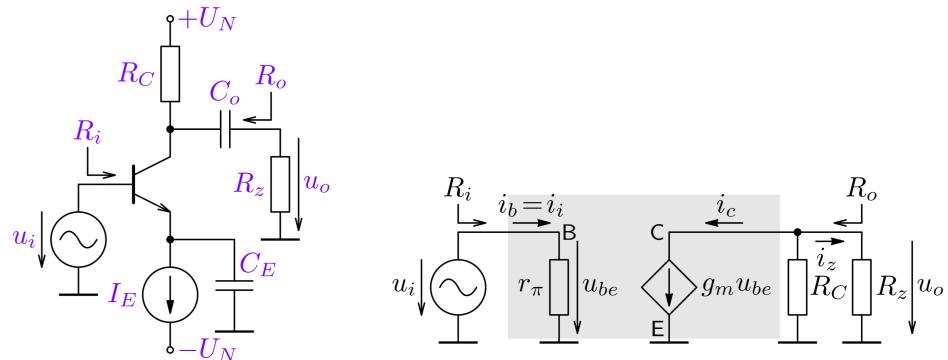
$$r_o = \frac{U_A}{I_C}, \text{ kde } U_A = 80 \text{ V je Earlyho napětí}$$

$$r_\pi = (1 + \beta)r_e$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

## Společný Emitor

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



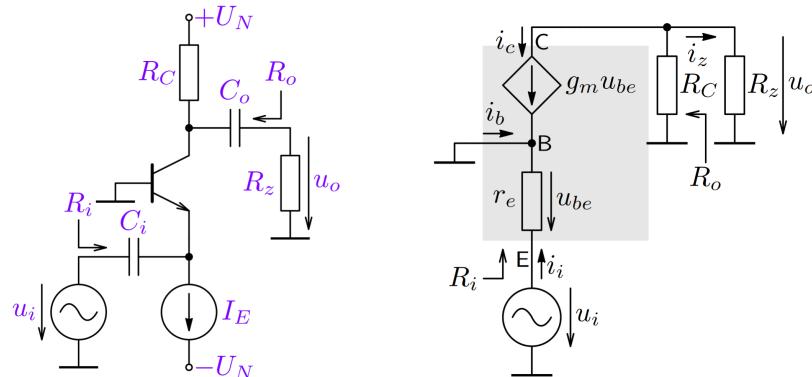
Obrázek 15: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným emitorem  
 $u_{be} = u_i, \quad i_c = g_m u_{be}, \quad u_o = -i_c(R_C || R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R_C}{u_{be}} = \frac{R_C}{u_{be}} = \underline{\underline{g_m R_C}} \quad (29)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{r_\pi}} \quad (30)$$

## Společná Báze

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



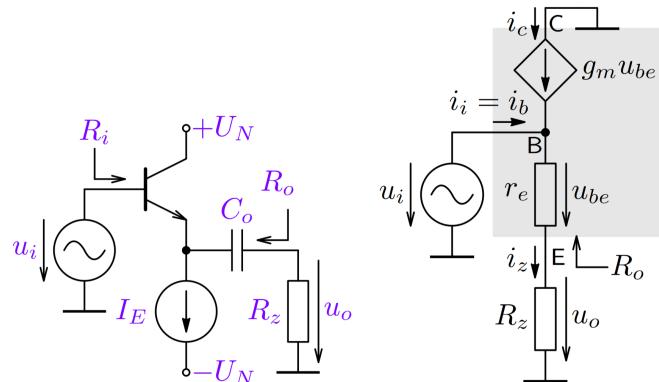
Obrázek 16: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společnou bází  
 $u_{be} = -u_i, \quad i_c = -g_m u_i, \quad u_o = -i_c(R_C || R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_C}{u_{be}} = \underline{\underline{g_m R_c}} \quad (31)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = r_e = \frac{r_\pi}{\underline{\underline{\beta + 1}}} \quad (32)$$

## Společný Kolektor (SC)

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



Obrázek 17: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným kolektorem

$$u_i = u_{be} + u_o, \quad i_i = i_b$$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_z}{r_e + R_z} \approx \underline{\underline{1}} \quad (33)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\beta R_z}} \quad (34)$$

$$(35)$$

Napěťové zesílení 1, ale proudové zesílení vysoké. Jedná se o tzv. *napěťový sledovač*. Vstupní odpor (odpor, co vidí signál, když jde do báze) je veliký.

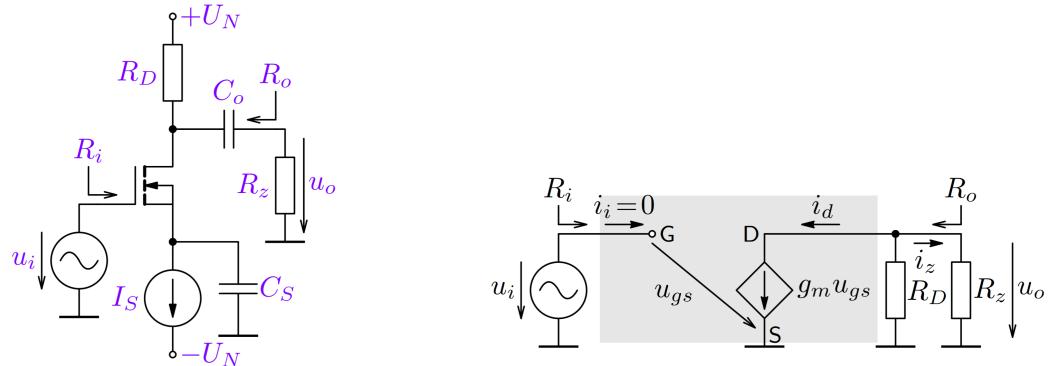
- 24 Nakreslete zapojení jednostupňového zesilovače s MOSFET s indukovaným kanálem typu N/P v zapojení SS/SG/SD a podle náhradního linearizovaného schématu odvoďte vztah pro jeho vstupní odpor a napěťové zesílení.

Pár důležitých vztahů na začátek

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{1}{2} K_p \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TO})^2 \\ g_m &= K_p \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TO}) \\ g_o &= \frac{1}{r_o} = I_D |\lambda| \end{aligned}$$

## Společný Source

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



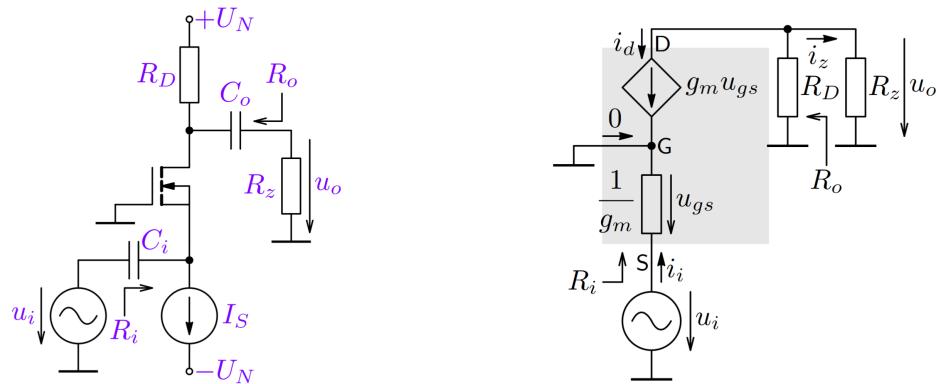
Obrázek 18: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným sourcem  
 $u_{gs} = u_i, \quad i_d = g_m u_{gs}, \quad u_o = -i_d(R_C || R_z)$ . Jelikož se jedná o MOSFET, tak do gatu nic neteče, tedy  $i_i = 0$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_d R_D}{u_{gs}} = \frac{-g_m u_{gs} R_D}{u_{gs}} = \underline{\underline{g_m R_D}} \quad (36)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\infty}} \text{ protože do gatu tranzistoru nic neteče.} \quad (37)$$

## Společný Gate

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



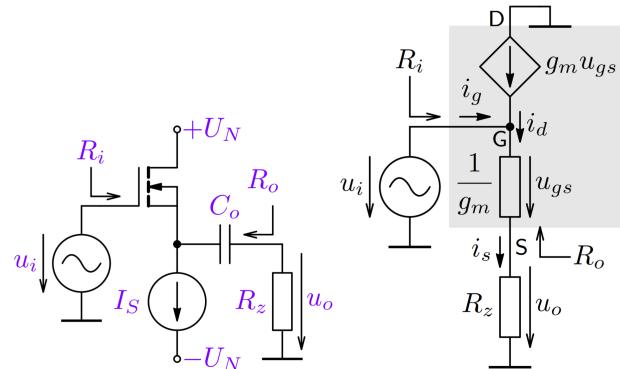
Obrázek 19: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným gatem  
 $u_{gs} = -u_i, \quad i_d = g_m u_{gs} = i_s = -i_i, \quad u_o = -i_d(R_C || R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_d R_D}{-u_{gs}} = \frac{g_m u_{gs} R_D}{u_{gs}} = \underline{\underline{g_m R_D}} \quad (38)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{g_m} \quad (39)$$

## Společný Drain

Odkaz na odpovídající kapitolu v Hospodkových skriptách



Obrázek 20: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným drainem

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_z}{1/g_m + R_z} \approx 1 \quad (40)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\infty}} \text{ protože do gatu tranzistoru nic neteče.} \quad (41)$$

Další napěťový sledovač!