

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

a

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

b

3 Uveďte, co musí splňovat přenosová funkce stabilního systému a proč demonstrejte na příkladu

d

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)

e

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

f

6 Nakreslete principiální zapojení zpětnovazební (ZV) struktury a odvoďte vztah pro výstupní signál. Uveďte základní dělení ZV obvodových struktur a vliv záporné ZV na vstupní a výstupní odpor zesilovače

6.1 Principiální zapojení + vztah

Pro výstup ze sumátoru u_1 platí

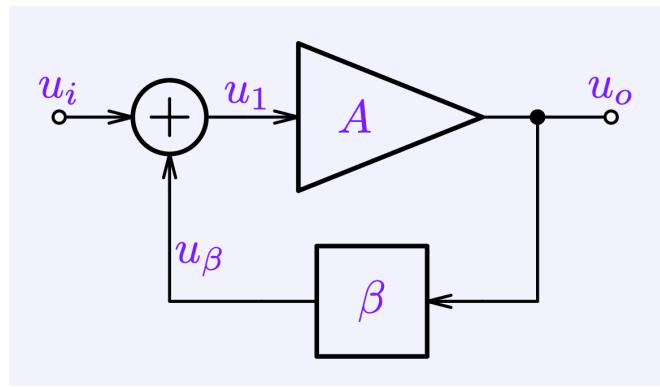
$$u_1 = u_i + u_\beta.$$

Pro vstup do sumátoru u_β resp pro výstup z bloku β platí

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

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

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



Obrázek 1: Principiální zapojení ZV systému

Zesílení soustavy je definováno poměrem výstupu a vstupu tedy:

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

kde činitel $F = 1 - \beta A$ je tzv. *vratným rozdílem* a činitel βA je *přenosem rozpojené ZV smyčky*.

6.2 Základní dělení zpětnovazebních obvodových struktur

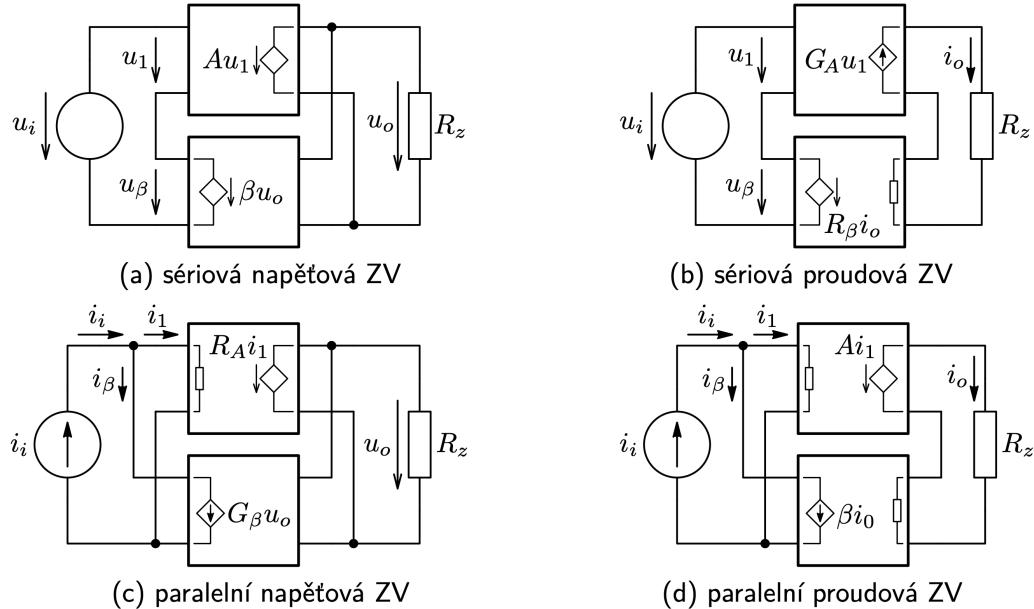


Schéma 1: Dělení ZV podle spojení signálů na vstupu a dle typu snímaného signálu na výstupu

Jestliže se jedná o *zápornou zpětnou vazbu*, tak buď bude β záporná, anebo si ji „sezáporní“ zesilovač (např. invertující vstup do operačního zesilovače). Pokud se budeme odkazovat na obrázek 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_β resp. $u_o\beta$. Z toho vychází vzoreček pro ZZV

Jelikož je zpětná vazba vedena do invertujícího vstupu, platí *Blackův vztah pro ZZV*:

$$\begin{aligned} u_o &= u_d \cdot A = (u_i - \beta u_o)A \\ A' &= \frac{u_o}{u_i} = \frac{A}{1 + \beta A} \end{aligned} \quad (2)$$

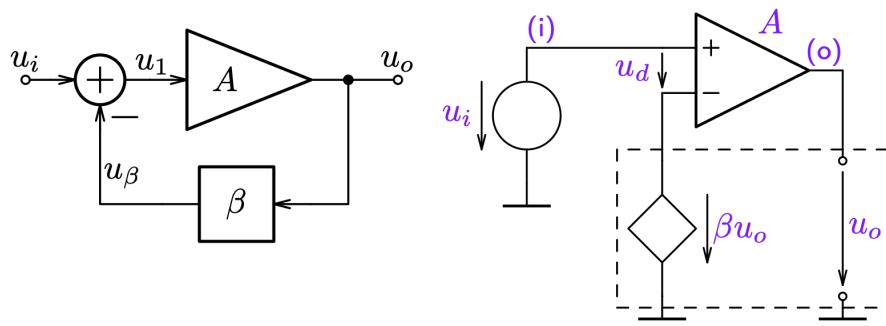


Schéma 2: Využití záporné zpětné vazby u zapojení s operačním zesilovačem

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

Pokud se podíváme na blokové schéma ZZV ve schématu 2 a porovnáme se zapojením ve sch. 3, 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 dělič napětí). AHA! takže už nemusíme myslet abstraktně a máme v ruce stavící blok - dělič napětí, který zavedeme do zpětné vazby.

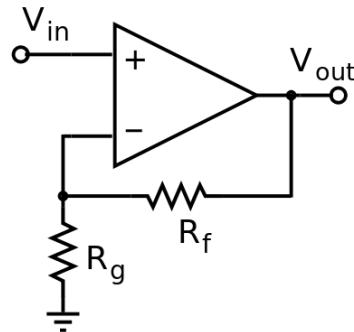


Schéma 3: Jedno ze dvou nejvíce basic zapojení s operákem - **neinvertující zesilovač**

Vnitřní zesílení A operáku (neplést s A') může být třeba 10^6 . Pokud vezmeme onen dělič napětí, který bude třína dvakrát zeslabovat (tedy $R_g = R_f$), tzn. $\beta = 0.5$, tak po dosazení do Blackova vztahu pro ZZV (2) dostaneme:

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

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

6.3 Vliv ZZV na vstupní a výstupní odpory

Dole je tabulka s výsledkama

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

¹jedničku ve jmenovateli pošleme v pizdu, protože vůči milionu je pidi midi

| | |
|-----------|------------------------------------|
| 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.

6.3.1 Vstupní odpor R_i sériové ZV

Pro sériovou ZV se budeme koukat na schéma 4.

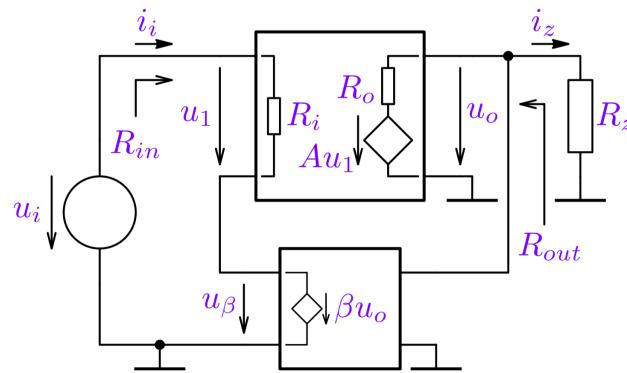


Schéma 4: Základní zapojení **sériové** ZV pro výpočet vstupního a výstupního odporu

Pár vztahu, které lze vyčíst ze schématu 4 (bereme výstupní odpor $R_o = 0$):

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

$$i_i = \frac{u_1}{R_i} \quad (3)$$

- Dále platí, že součet napětí u_1 a u_β musí dát u_i

$$u_i = u_1 + u_\beta \quad (4)$$

- Malý bloček s betou snímá zprava napětí na R_z resp. Au_1 . Toto napětí pak zesílí (zeslabí) beta krát a prdne se doleva jako u_β :

$$u_\beta = \beta u_o = \beta u_1 A \quad (5)$$

FAKT BACHA! my tu předpokládáme, že napětí na zátěži R_z je rovno zesílenému Au_1 . Tohle jde pouze za předpokladu, že výstupní odpor $R_o = 0$. Zesílk 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:

$$R_{in} = \frac{u_i}{i_i} = \text{viz rovnice (4) a (3)} = \frac{(u_1 + u_\beta)}{u_1} = \text{viz rce (5)} = \frac{u_1(1 + \beta A)R_i}{u_1} = \underline{\underline{R_i F}} \quad (6)$$

Fuuuuuh, 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.

6.3.2 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

$$i_z = \frac{A u_i}{R_o}$$

Dosadíme do sloganu pro výpočet výstupního odporu a máme

$$R_{out} = \frac{R_o u_i A}{u_i A (1 + \beta A)} = \dots = \underline{\underline{\frac{R_o}{F}}} \quad (7)$$

6.3.3 Vstupní odpor R_i paralelní ZV

Pro paralelní ZV se budeme koukat na schéma 5.

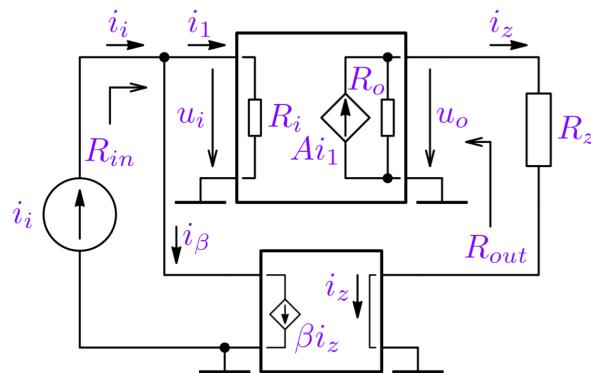


Schéma 5: Základní zapojení **paralelní** ZV pro výpočet vstupního a výstupního odporu

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:

$$u_i = u_1 R_i, \quad i_i = i_1 + i_\beta, \quad i_\beta = \beta i_z = \beta i_1 A \quad (8)$$

$$R_{in} = \frac{u_i}{i_i} = \dots = \underline{\underline{\frac{R_i}{F}}} \quad (9)$$

6.3.4 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:

$$u_o = A i_1 R_o = A i_i R_o$$

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 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

$$R_{out} = \frac{\text{napeti naprazdno}}{\text{proud nakrátko}} = \frac{u_o}{i_z} = \dots = \underline{\underline{R_o F}} \quad (10)$$

Suma sumárum máme tuhletu tabulkou:

| | Sériová ZV | Paralelní ZV |
|----------------|---------------------------|--------------------------|
| Vstupní odpor | $Z_{in} = Z_i F$ | $R_{in} = \frac{R_i}{F}$ |
| Výstupní odpor | $Y_{out} = \frac{R_o}{F}$ | $R_{out} = R_o F$ |

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

Pokud chceme být jooo cool lidi, tak můžeme začít házet slova jako impedance. 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?

7.1 Stabilita zpětnovazebné soustavy - co zajišťuje & podmínky

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

Kmitočtová charakteristika v grafu 1 ukazuje, že křivka musí procházet nad jedničkou v mezním případě procházek tak akorát skrz.

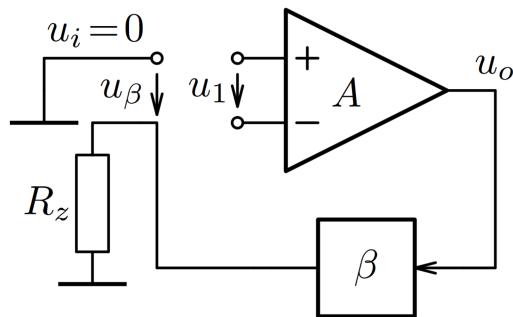
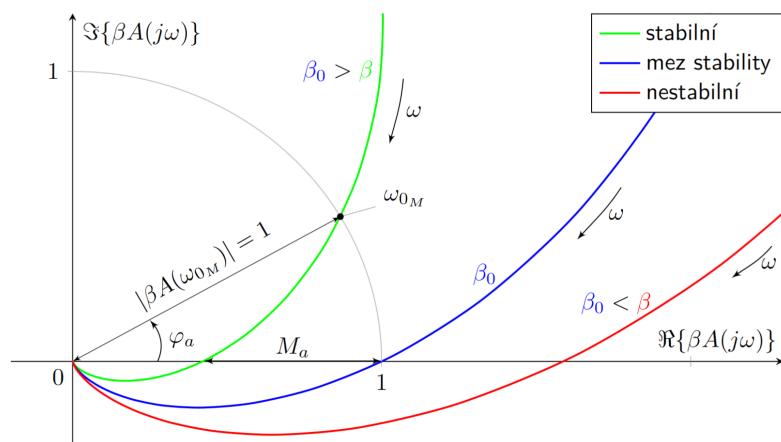


Schéma 6: Určení přenosu rozpojené ZV smyčky

Graf 1: Kmitočtové charakteristiky pro různé hodnoty β

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| $\beta A < 0 (F > 1)$ | 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 βA resp. vrazný rozdíl F

Fázová jistota a doplňkový zisk

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

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

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

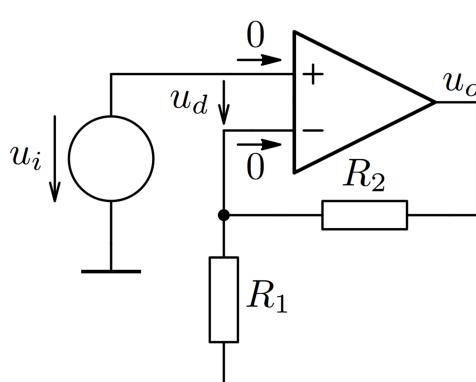
Kmitočtová kompenzace

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° , změní se původně záporná zpětná vazba na kladnou a OZ se rozkmitá. Proto se zavádí kmitočtová kompenzace.

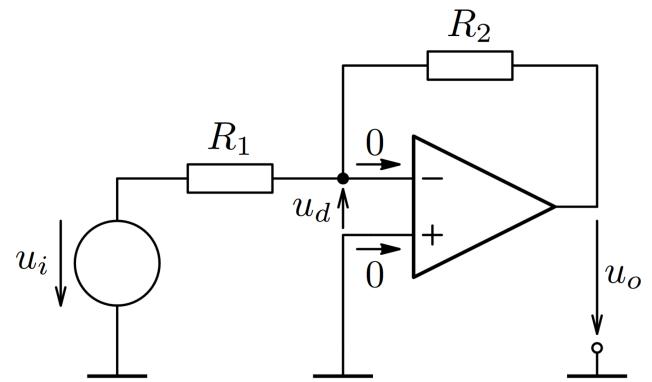
Jde o techniku **přidání dominantního pólu**, aby byla soustava stabilní i pro vysoké kmitočty, při kterých by jinak docházelo s obracení fáze rozpojené zpětnovazební smyčky.

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

Důležitá věc pro praxi, pls tohle je dobrý mít zmáknutý



(a) Neinvertující zesilovač



(b) Invertující zesilovač

Obrázek 2: Dvě úplně nějvíc basic zapojení zesilovačů s operákama

Odvození vztahu

Dvě MEGAMEGAMEGAMoc důležité mantry:

- Pokud se k operáku chováme hezky, tak si výstup řídí tak, aby na vstupu byla **stejná napětá**
- Do vstupů operáku **neteče žádný proud**

S tímto se můžeme vydat do světa odvozování. Začněme s neinvertujícím zesilovačem:

Na neinvertujícím (pluskovém) vstupu je napětí u_i . Mantra říká, že i na invertujícím (mínuskovém) vstupu bude u_i . Napětí u_i bude i na výstupu děliče napětí, tvořeného 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 (EKG).

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

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 (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 nulu, kterou 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:

$$u_{R2} = i_{R2} \cdot R_2 = i_i R_2 = \frac{u_i}{R_1} R_2 \quad (11)$$

Ted' je ale potřeba se zamyslet. Proud teče jedním směrem. Od zdroje u_i do vstupu operáku, který slouží jako proudová nora (já vím, je to vstup 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.²

²Představte 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.

Všimněte si, že ve schématu s invertujícím operákom 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 (11) 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 , jelikož je to jediný odpor, který vidí signál vidí vůči zemi. Byť je to v tomto případě zem virtuální.

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

9 Nakreslete zapojení invertujícího sumátoru s OZ a odvod'te vztahy pro výstupní napětí v případě ideálního OZ.

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

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

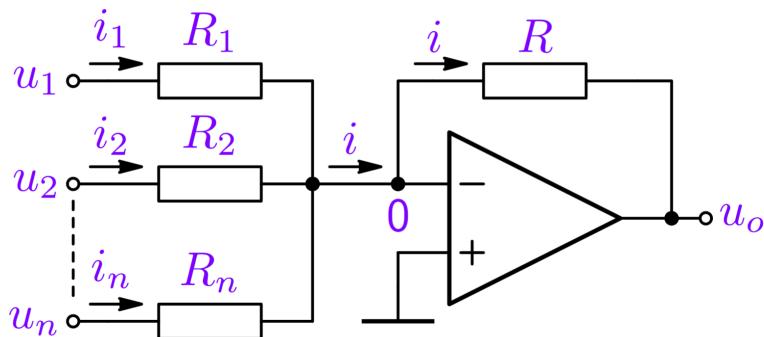


Schéma 7: Zapojení invertujícího sumátoru (proudové sčítačky)

Mantra říká, že do vstupu operáku nic neteče. Také říká, že na vstupech bude stejné 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 záporná. A jak moc do záporná?

$$u_o = -u_R = -i_{\Sigma}R = -R \sum_{k=1}^n i_k = -R \sum_{k=1}^n \frac{u_k}{R_k} \quad (12)$$

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

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?

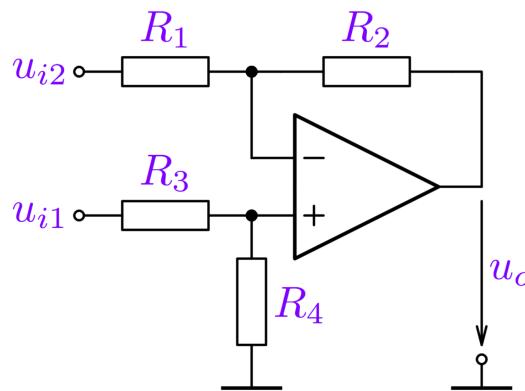


Schéma 8: Rozdílový zesilovač s OZ

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: **Vpravo** vidíme

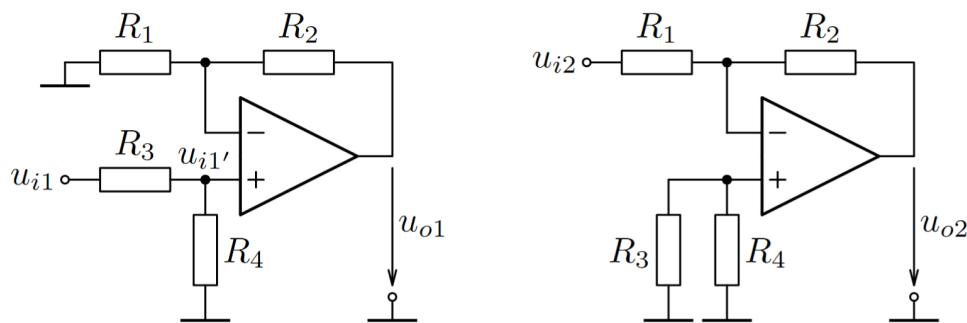


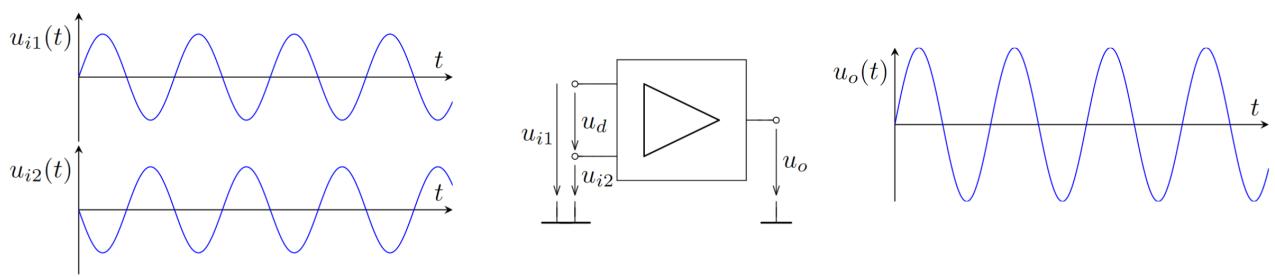
Schéma 9: Superpozice rozdílového zesilovače

(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

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

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

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



Obrázek 3: Oba vstupy vedou signál - s opačnou polaritou. Tedy souhlasná složka u_s bude nulová

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

$$u_o = u_{i1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - u_{i2} \frac{R_2}{R_1}. \quad (13)$$

Fuj, to je hnušnej 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

$$\underline{\underline{u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{i1} - u_{i2})}}. \quad (14)$$

Vstupní odpor pro rozdílový signál bude

$$\underline{\underline{R_{i_d} = R_1 + R_3}}. \quad (15)$$

Souhlasná a rozdílová složka + podmínka

Souhlasná složka je definována jako

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

Rozdílová poté jako

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

Podmínky, aby byla souhlasná složka rušení nulová:

- Symetrické užitečné napětí (signál na obou vstupech, ale s opačnou polaritou viz obr 3)
- Impedance vstupů musí být shodné

Co je to CMMR

Common Mode Rejection Ratio.

$$\text{CMMR} = \left| \frac{A_d}{A_s} \right| \quad (16)$$

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

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

Motivace: pokud posvítíme na fotodiodu, tak začne generovat proud úměrný intenzitě osvitu. Tento proud (řádově μA) ale potřebujeme převést na napětí, abychom ho mohli snímat např. mikrokontrolérem. Proto využijeme převodník proud → napětí. Proud tekoucí do uzlu na

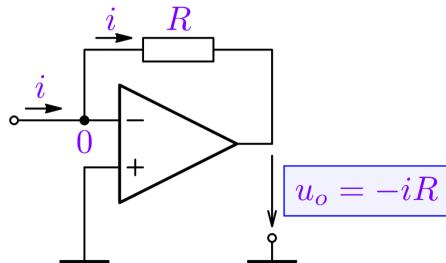


Schéma 10: Převodník proud - napětí

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

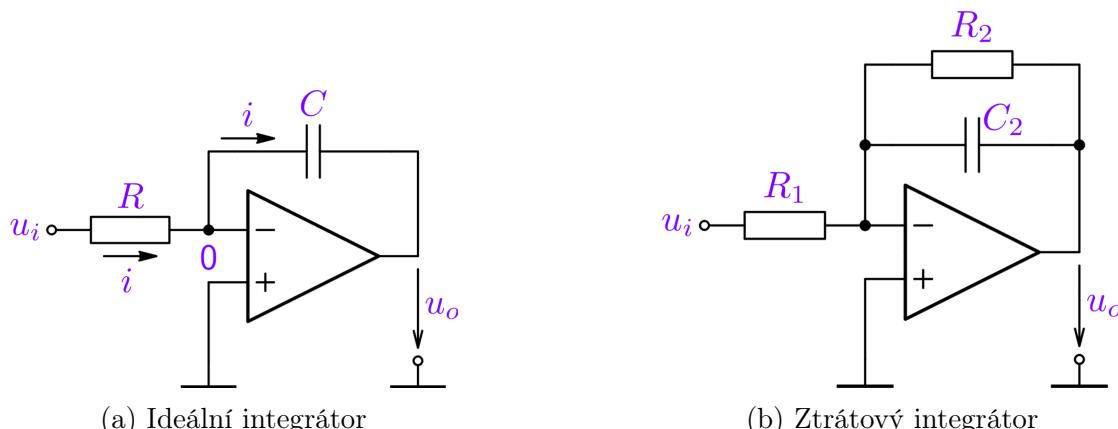
$$\underline{\underline{u_o = -i R}} \quad (17)$$

Výhody: s dobrým operačním zesilovačem lze dosáhnout veliké přesnosti³

Nevýhody: stejný proud, který snímáme, musí být operační zesilovač schopen odebrat na výstupu (current sink) - omezený rozsah.

- 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.

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



³Snažíme se minimalizovat proud, který poteče do vstupu operačního zesilovače. V datasheetu se tento parametr jmenuje input bias current a u obyč operátorů může mít řádově μA . U spešl operátorů se dostaneme až na jednotky fA. FEMPTOAMPÉRY!! Zde vyložene počítáte počet kuliček elektronů za sekundu

Ideální integrátor

Pro proud tekoucí kondenzátorem platí

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

Z toho si lze vyjádřit napětí jako

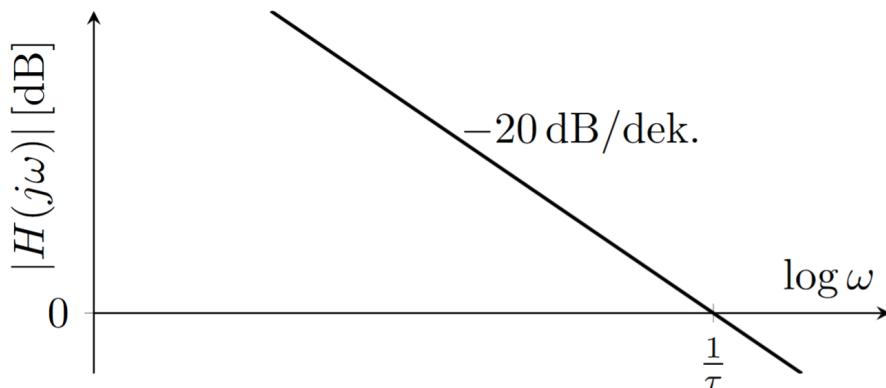
$$u(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(x) dx = //i = \frac{u_i}{R} // = u_c(0) + \frac{1}{RC} \int_0^t u(x) dx.$$

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

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{1}{s\tau}, \quad \tau = RC \quad (18)$$



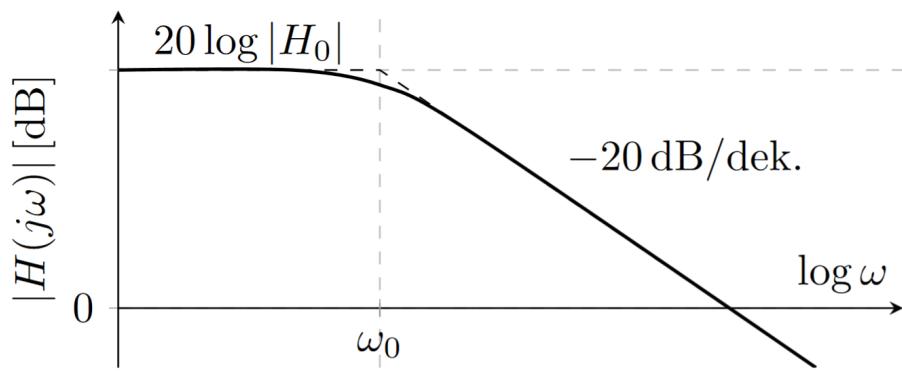
Graf 2: Přenos ideálního integrátoru

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“.

$$H(s) = -\frac{Z_2}{R_1} = \frac{\frac{R_2}{1+sC_2R_2}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1-sC_2R_2} = \frac{H_0}{1+s\tau}, \quad (19)$$

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

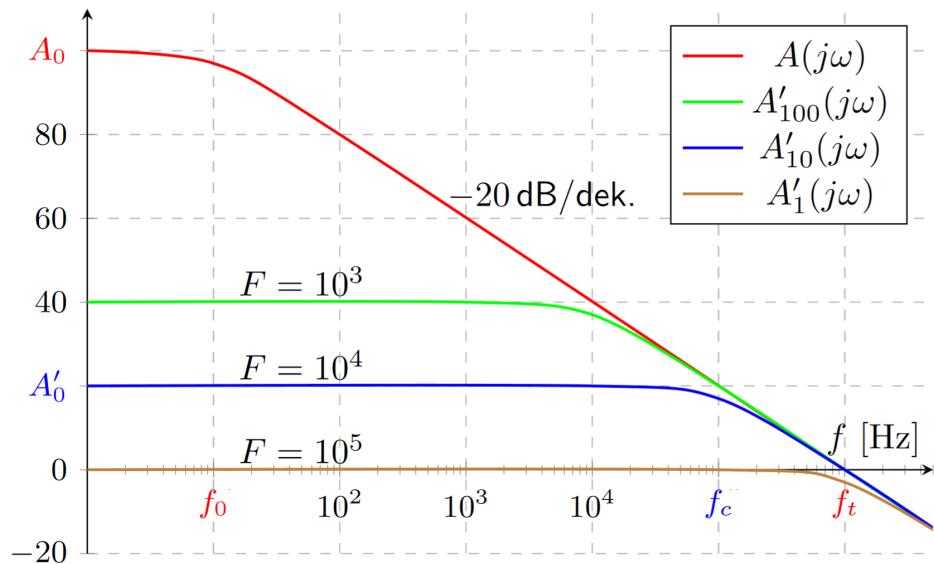


Graf 3: Přenos ztrátového integrátoru

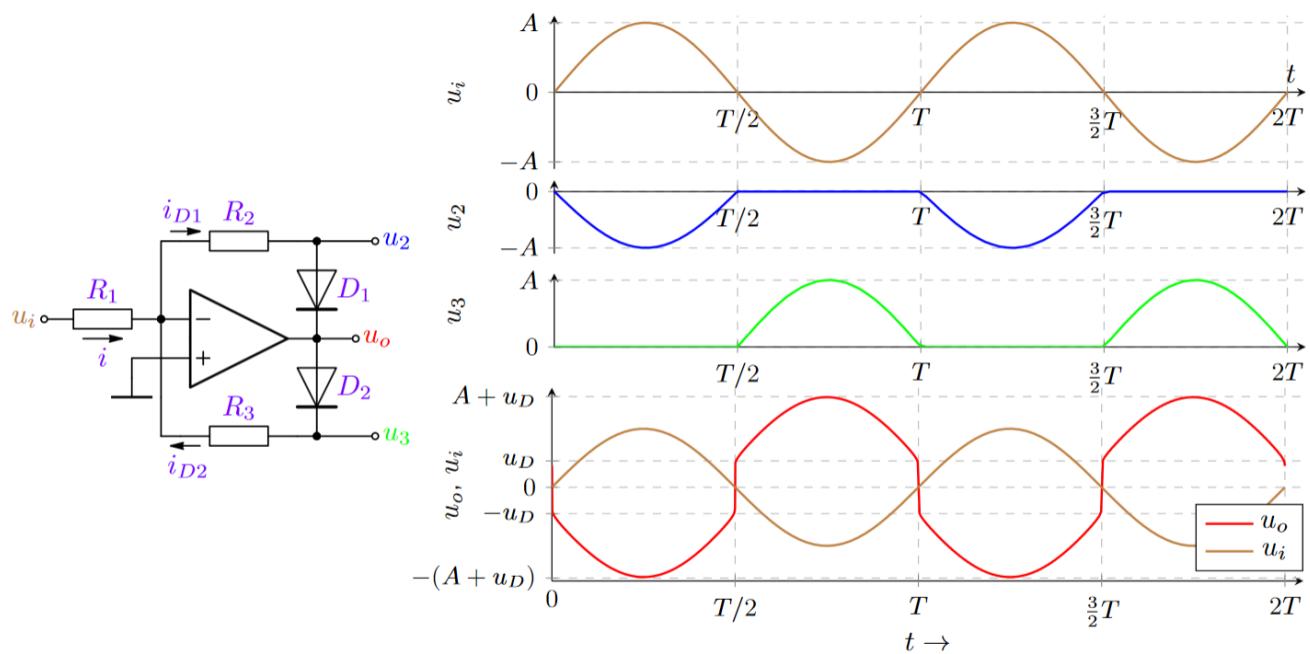
Pozn: chová se to jako lowpass, což není náhoda u systémů, co integrují vstupní signál. Pokud půjdeme s frekvencí nízko, tak kondenzátor se bude chovat jako rozpojené svorky a tedy se uplatní pouze rezistory rvořící invertující zesilovač. Naopak při vysokých frekvencích se bude kondenzátor chovat jako zkrat a paralelní kombinace $R_2 \parallel C_2$ bude mít minimální odpor. Zesílení zesilovače je dáno jako $A_u = -\frac{R_2 \parallel C_2}{R_1}$. 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 $OZ f_t = 1 \text{ MHz}$

Modulová charakteristika resp. přenos v závislosti na frekvenci je zobrazen v grafu 4. Zesílení jsou v rámečku napsaná a tranzitní kmitočet f_t je tam, kde to jde prostě všechno do kopru.



Graf 4: Modulové charakteristiky operačního zesilovače



Obrázek 5: Jednocestný invertující usměrňovač

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

Motivace: reálná dioda se začne otevřívat 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 usměrňovat 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. Jak je vidět na dolním grafu z obrázku 5.

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

Motivace stejná jako u jednocestného, ale máme zápornou složku vstupu hozenou na výstup jako kladnou.

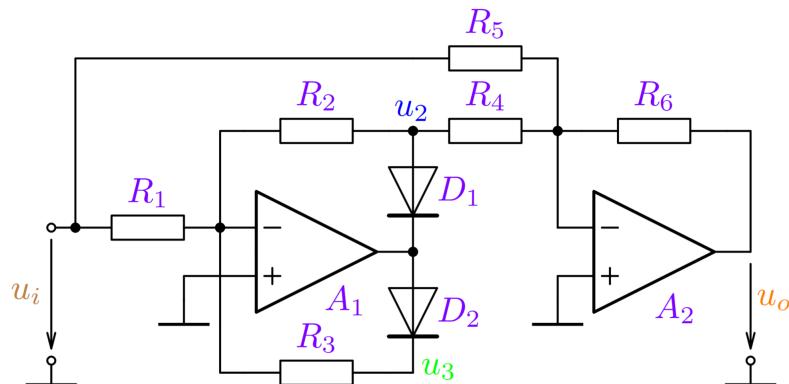
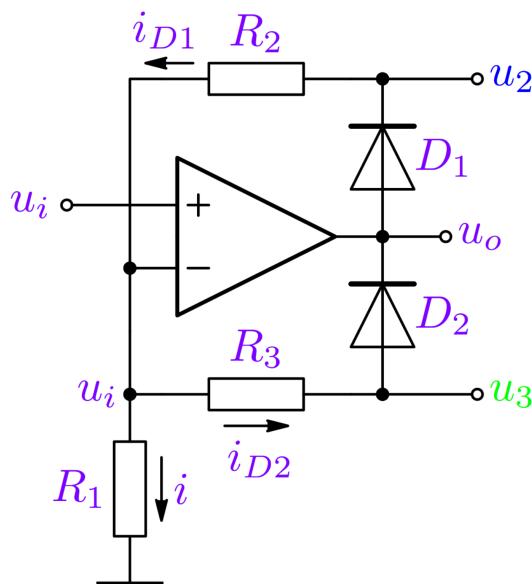
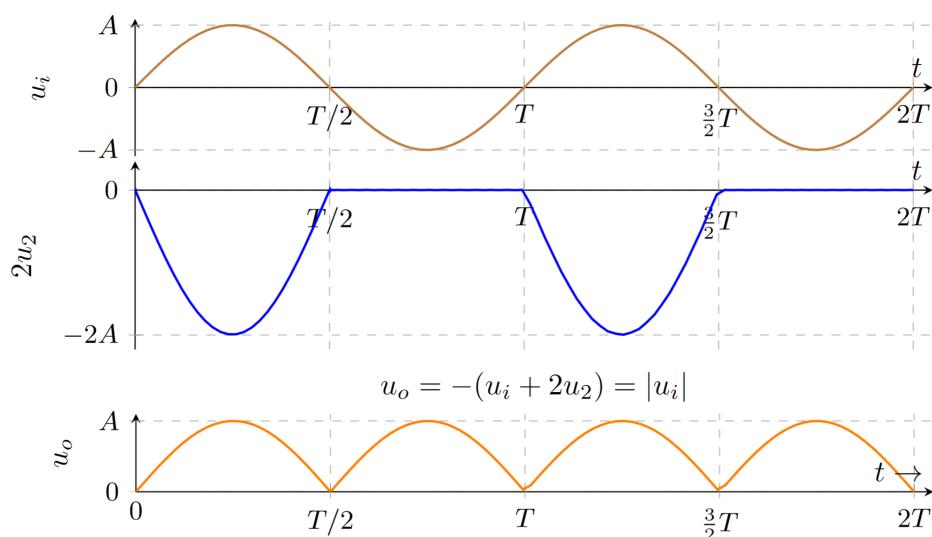


Schéma 11: Dvoucestný usměrňovač s proudovou sčítací



Obrázek 6: Jednocestný neinvertující zesilovač



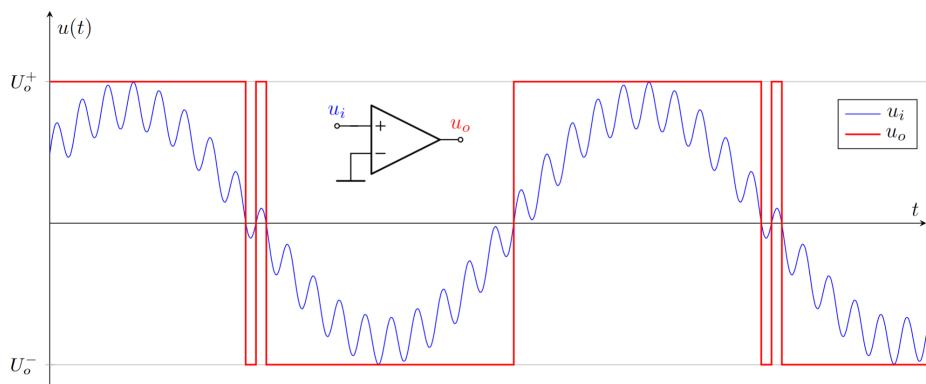
Graf 5: Časové průběhy v obvodu s dvoucestným usměrňovačem

Schéma 11 je tvořeno dvěma bloky. Jednocestným usměrňovačem a sčítačkou napětí (proud). Výstup jednocestného usměrňovače je v bodě u_2 . Odtud jde signál skrze R_4 do sčítačky. Origo signál jde do sčítačky skrze R_5 . Rezistory R_4 a R_5 slouží k váhování vstupních signálů 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 sčítačka takto sečte vstupní signály (hnědý a modrý) a vznikne signál oranžový.

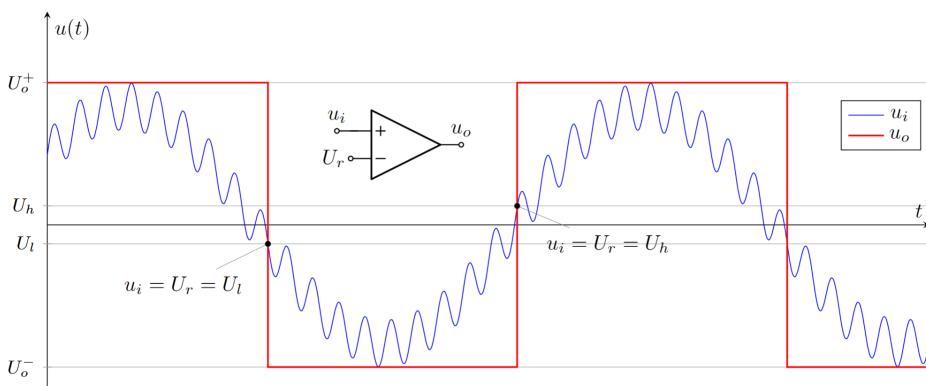
16 Nakreslete zapojení neinvertujícího a invertujícího komparátoru s hysterezí, uveďte jeho převodní charakteristiku a odvodte vztahy pro překlápací úrovně.

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 hysterezi, bude výstup komparátoru vypadat následovně:



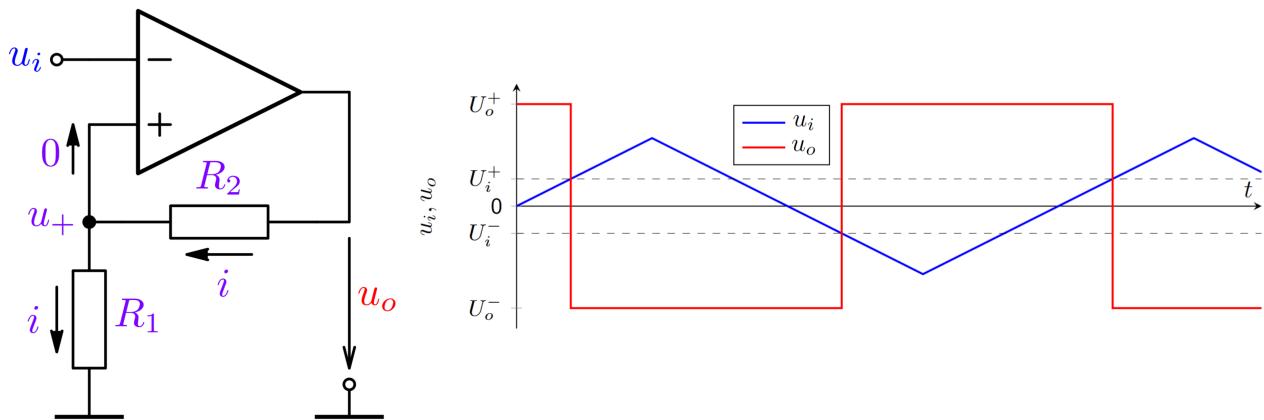
Graf 7: Výstup komparátoru s hysterezí

Invertující komparátor s hysterezí

Všimněte si, že to 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 děliči napětí se ale najednou na u_+ objeví lehce záporné napětí. Pokud bychom chtěli překlopit výstup nahoru (na výstupu bude 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 víc do záporna, než je momentálně u_+ . Z toho nám vycházejí překlápací



Obrázek 7: Schéma a průběhy invertujícího komparátoru s hysterezí

úrovně:

$$U_i^+ = U_o^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$U_i^- = U_o^- \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Neinvertující komparátor s hysterezí

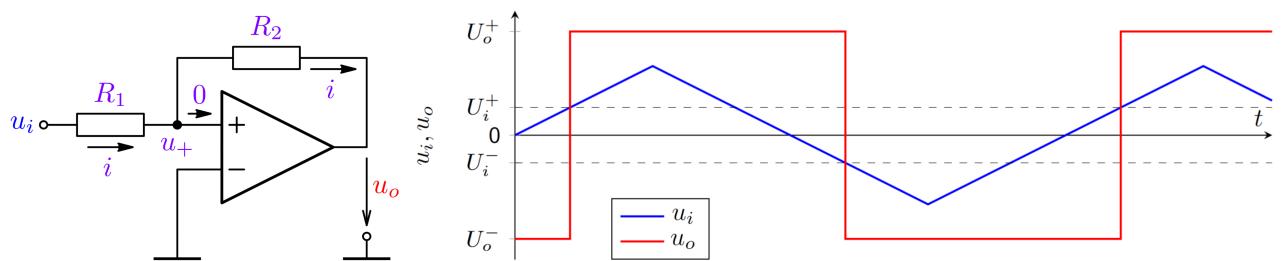
Všimněte si, že to skoro vypadá jako invertující zesilovač, ale vstupy (+) a (-) jsou prohozené.

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. Číže pokud se na vstupu komparátoru objeví dotaceňné 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 víc záporný signál, abychom přebili to, co si tam pouští momentálně nahoru překlopený OZ.

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 pošefovali, že jste tuto hladinu překročili



Obrázek 8: Schéma a průběhy neinvertujícího komaparátoru s hysterezí

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 přebít 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.

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 12. Jak říká mantra - do vstupu OZ nic neteče. A tedy kondenzátor se nebude nijak vybíjet.⁴

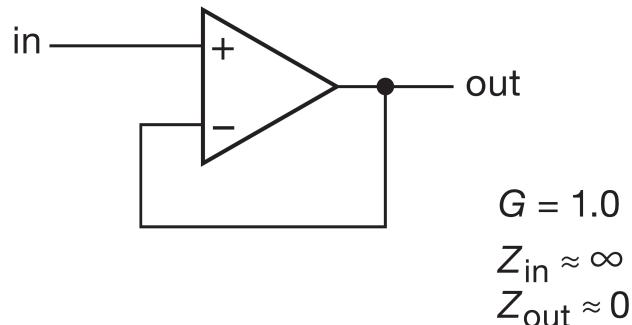


Schéma 12: Operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí

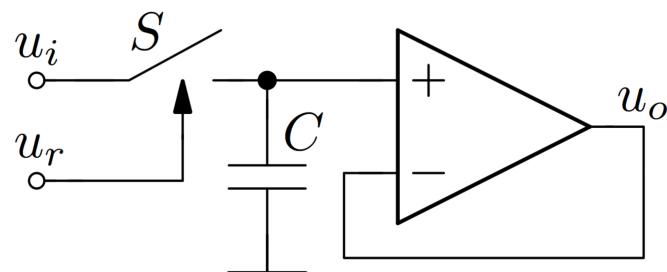
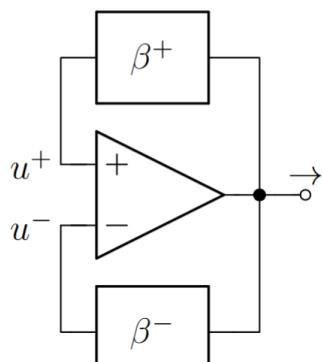


Schéma 13: Operační zesilovač zapojený jako Sample and Hold

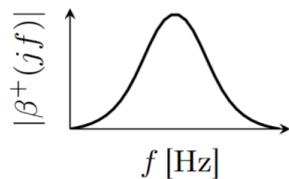
⁴V praxi do vstupu OZ proud skutečně teče, ale jedná se řádově μA až fA .

V praxi se například přidává ještě jeden sledovač napětí, který nabíjí kondenzátor. Díky tomu nezatežujeme měřený signál.

- 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?

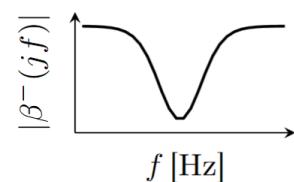


(a)



$$\beta^+ = \text{konst.}$$

$$\beta^- = \text{konst.}$$

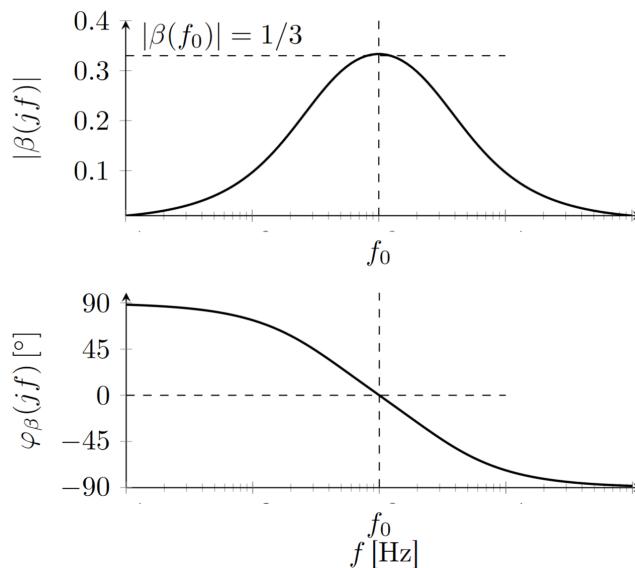


(c)

(b)

Schéma 14: Principiální blokové schéma můstkového oscilátoru (a) s kmitočtově závislým členem v kladné (b) nebo záporné (c) zpětné vazbě

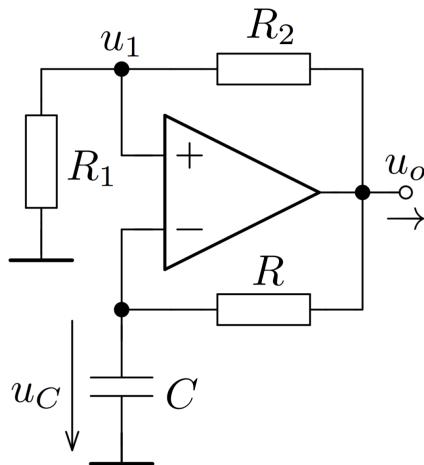
Ve zpětné vazbě je zapojena buď pásmová propust (b) nebo pásmová zádrž (c)



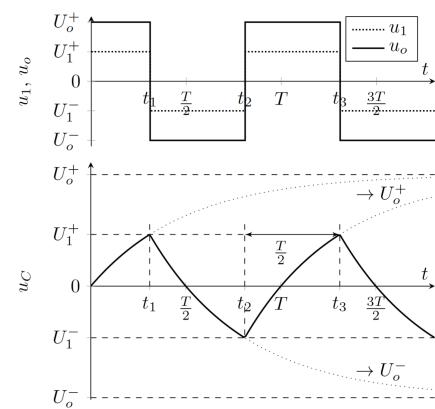
Graf 8: Modulová a fázová charakteristika zpětnovazebního článku

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 a trojúhelníkového signálu. S trochou poladění lze využít i jako napětím řízený oscilátor (využití v syntetizátorech)



(a) Zapojení s operačním zesilovačem



(b) Průběhy napětí na výstupu OZ a na kondenzátoru

Obrázek 9: 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 pluskovém vstupu vyšší napětí než na mínuskovém 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 napětí 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 dole v grafu 9b.
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 9b.
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 přeleze 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 probíraly. Vše se krásně spojuje dohromady!

Popis bloků - krok za krokem bude následovat níže

V levé části je zapojení integrátoru s OZ. Proud protékající skrz rezistor R musí protékat také skrz kondenzátor C . Výstup levého OZ se bude korigovat tak, aby tato podílka byla zajištěna. Pouze tak dosáhne OZ stejného napětí na svých vstupech - v našem případě 0 V. Při konstantním proudění skrz 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. V momentě, kdy napětí na výstupu levého OZ překročí komparační úroveň, hodí se na výstup OZ odpovídající napětí.

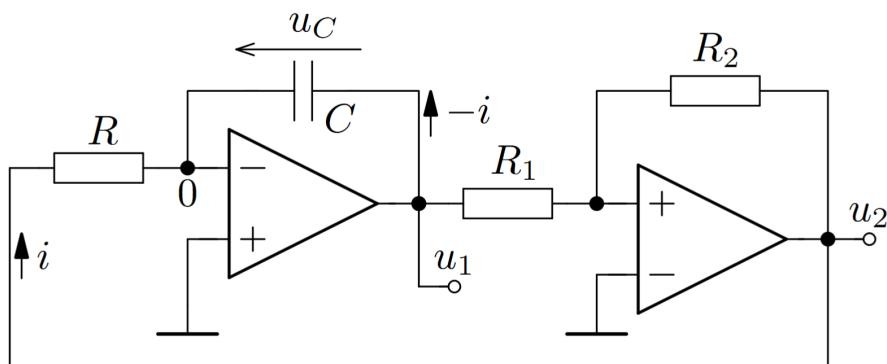
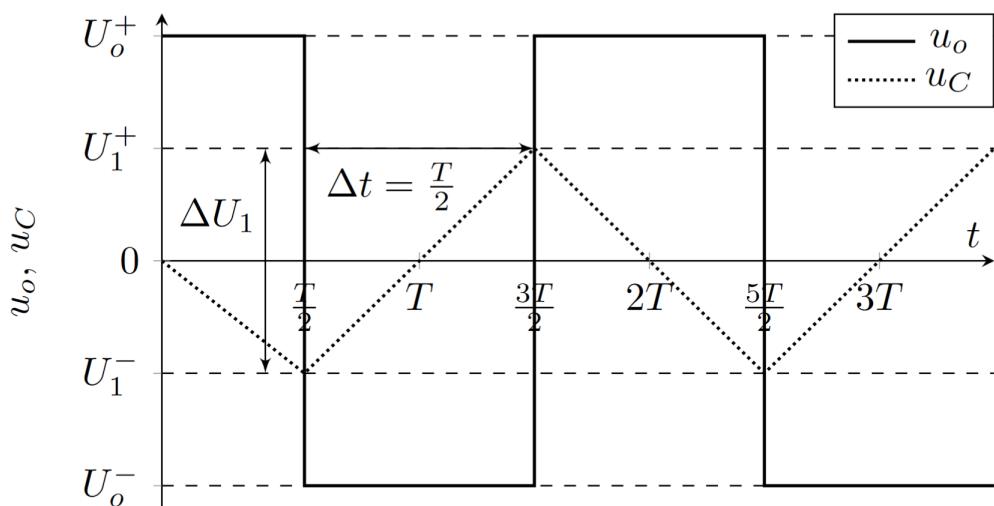


Schéma 15: Generátor funkcí s operačním zesilovačem

A jak to tedy funguje? Dejme tomu, že na výstupu komparátoru (pravý OZ) bude kladné 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 záporná (jak je vidět v grafu 9b)
2. Díky hysterezi zavedené rezistory R_1 a R_2 musí jít výstup levého OZ ještě o něco víc do záporná, aby se vykompenzovalo to, že výstup komparátoru skrze R_2 tahá svůj neinvertující (+) vstup nahoru.
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 odvoděte vztah pro kmitočet výstupního signálu.

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

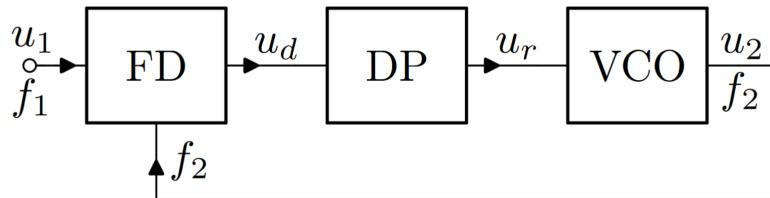


Schéma 16: Blokové schéma fázového závěsu

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.

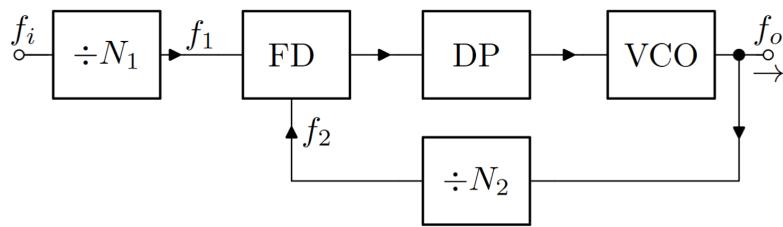
Napětí u_d je dán rozdílem fází vstupního a zpětnovazebního signálu. Tím se mění frekvence VCO tak, aby byla shodná se vstupním signálem.

Hodně cool věc je, že můžeme jednoduše dělit frekvenci ve zlepšné 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.

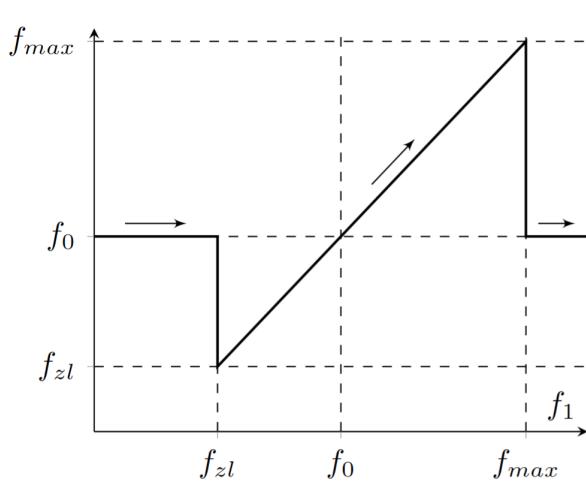
Cool, co?

Pásmo zadržení

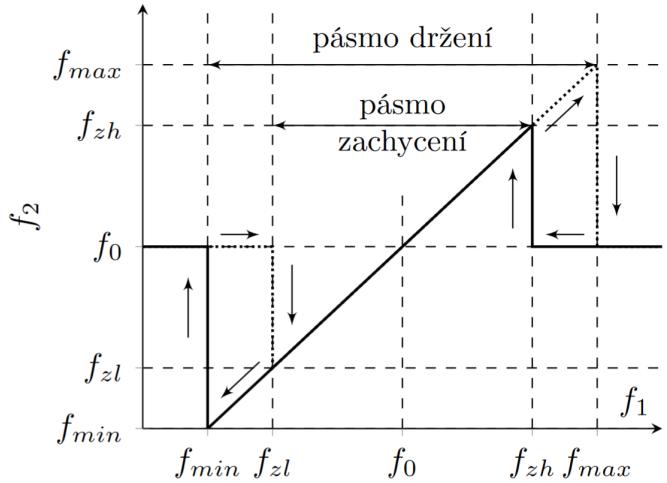
Tomu nerozumím, ale hospodka má dva pěkné grafiky, tak třeba pomůžou a něco z nich vykoukáte:



$$f_1 = f_2 = \frac{f_i}{N_1}, \quad f_2 = \frac{f_o}{N_2} \Rightarrow f_o = N_2 \frac{f_i}{N_1}$$



(a)



(b)

Graf 10: Závislost výstuoního kmitočtu f_2 na vstupním kmitočtu f_1 při přeladování f_1 zdola (a) a shora (b)

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 odteklo proud do země. Další typ je *high-side*, kde pomocí tranzistoru přivádíme napájecí napětí do zátěže.

Je důležité si uvědomit, že pokud přivedeme napětí na bázi NPN (šipka ven) resp. gate N-kanálového tranzistoru, tak se sepne. ALE! U PNP a P-kanálových tranzistorů je to naopak. Pokud přivedeme napětí VCC skrze rezistor na bázi, tak se tranzistor uzavře a nebude vodit. To proto, že nebude žádný úbytek napětí mezi emitorem (to se šipkou dovnitř) a bází. Abychom sepli tranzistor, musíme hodit CTRL vstup na zem. Obdobně pro P-kanálový tranzistor (úplně vpravo). Tento spínač má v sobě tedy ještě zabudovanou negaci a spíná při přivedení 0 V.

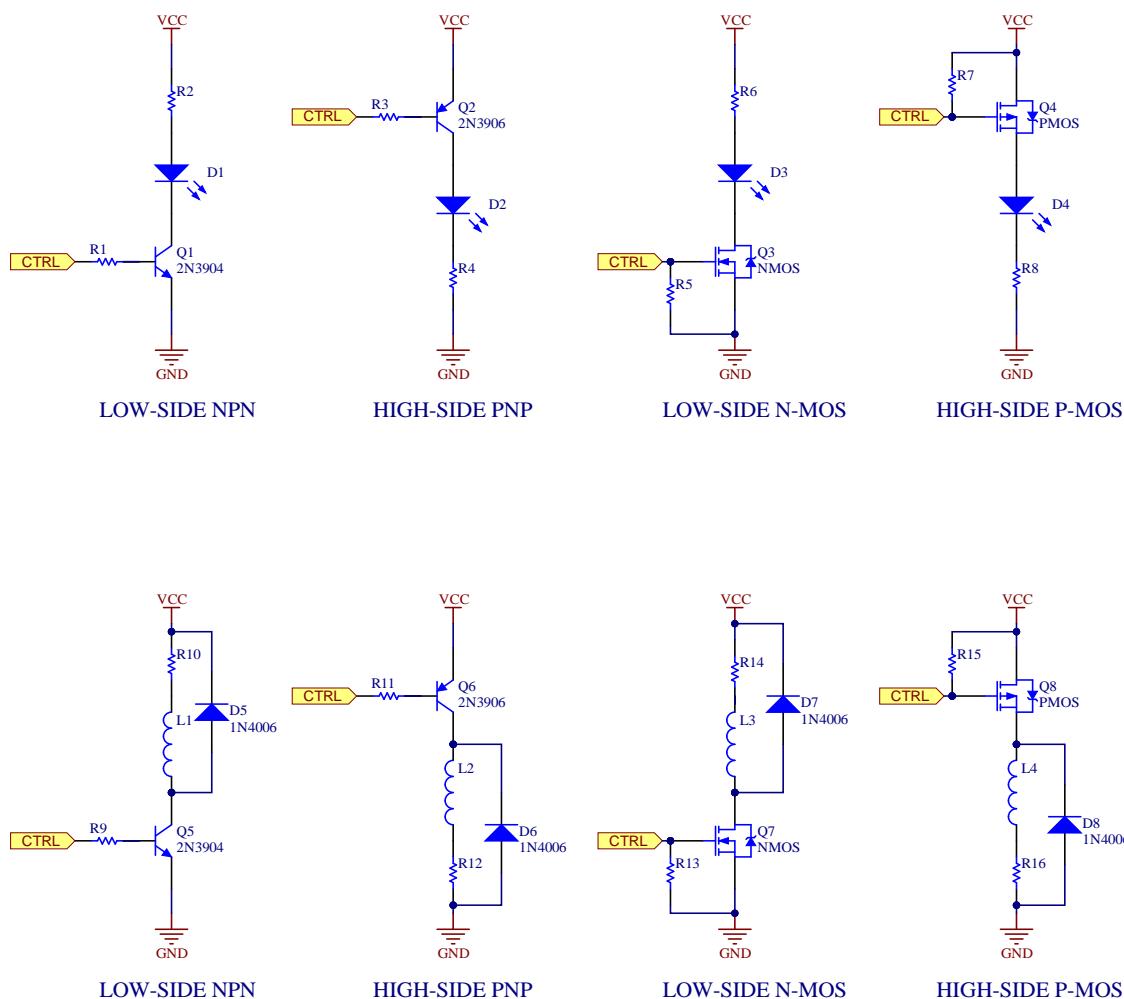


Schéma 17: Základní zapojení tranzistorů jako spínačů ke spínání odporové a induktivní zátěže

Proud, který je bipolární tranzistor ochoten pustit z kolektoru do emitoru je β -násobek proudu do báze.

$$I_C = \beta I_B, \quad I_B = \frac{V_{CTRL} - V_{BE}}{R_B} = \frac{U_{CTRL} - 0.7 \text{ V}}{R_B}$$

Tento proud, který je tranzistor ochoten pustit musí být větší, než proud, který musí téct zátěží. Aby byl proud limitován pouze rezistorem v sérii se zátěží a nebyl limitován tranzistorem.

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

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

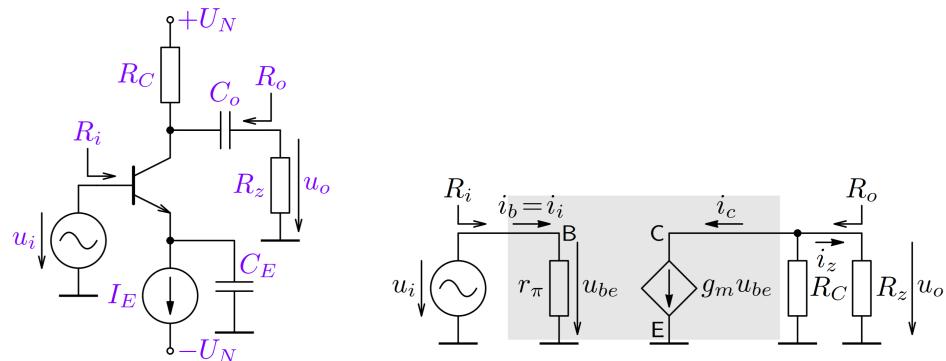
byl větší, než proud, který požadujeme, aby tekl zátěží.

Rezistory u Gatu MOSFETu 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).

- 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 .

Motivace: zesilovače aaaaaaaaaaaaaaa!

Společný Emitor

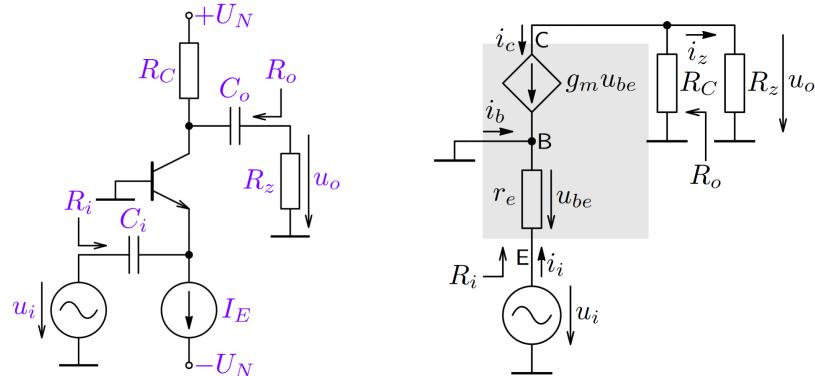


Obrázek 10: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným emitorem
 $u_{be} = u_i, \quad i_c = g_m u_{be}, \quad u_o = -i_c (R_C \parallel R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R_C}{u_{be}} = \frac{R_C}{u_{be}} = \underline{\underline{g_m R_C}} \quad (20)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{r_\pi}} \quad (21)$$

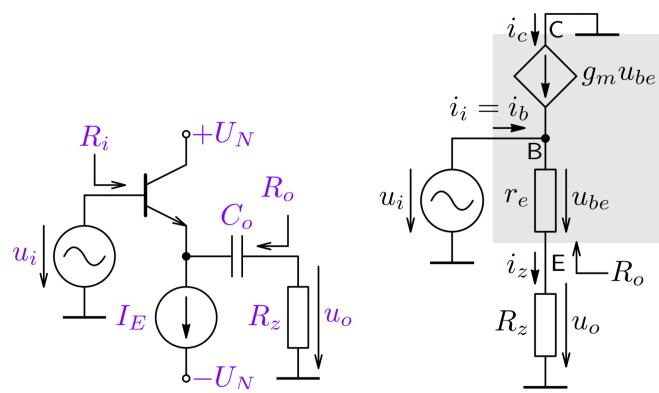
Společná Báze



Obrázek 11: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společnou bází
 $u_{be} = -u_i, \quad i_c = -g_m u_i, \quad u_o = -i_c (R_C \parallel R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_C}{u_{be}} = \underline{\underline{g_m R_c}} \quad (22)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = r_e = \underline{\underline{\frac{r_\pi}{\beta + 1}}} \quad (23)$$



Obrázek 12: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným kolektorem

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

Společný Kolektor (SC)

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_z}{r_e + R_z} \approx \underline{\underline{1}} \quad (24)$$

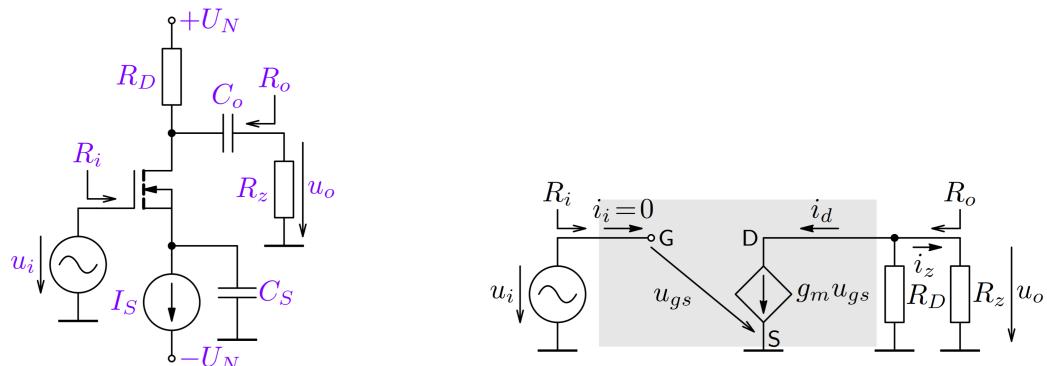
$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\beta R_z}} \quad (25)$$

$$(26)$$

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 odvod'te vztah pro jeho vstupní odpor a napěťové zesílení.

Společný Source



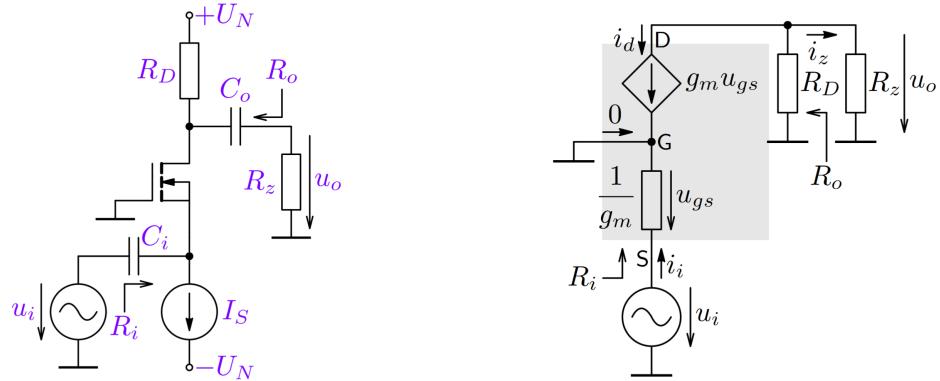
Obrázek 13: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným sourcem

$u_{gs} = u_i, \quad i_d = g_m u_{gs}, \quad u_o = -i_d(R_C || R_z)$. Jelikož se jedná o MOSFET, tak do gatu nic neteče, tedy $i_i = 0$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_d R_D}{u_{gs}} = \frac{-g_m u_{gs} R_D}{u_{gs}} = \underline{\underline{g_m R_D}} \quad (27)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\infty}} \text{ protože do gatu tranzistoru nic neteče.} \quad (28)$$

Společný Gate

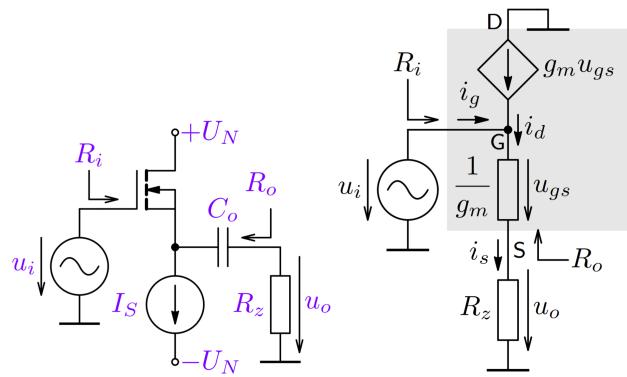


Obrázek 14: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným gatem
 $u_{gs} = -u_i, \quad i_d = g_m u_{gs} = i_s = -i_i, \quad u_o = -i_d(R_C \| R_z)$

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_d R_D}{-u_{gs}} = \frac{g_m u_{gs} R_D}{u_{gs}} = \underline{\underline{g_m R_D}} \quad (29)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{g_m} \quad (30)$$

Společný Drain



Obrázek 15: Schéma a náhradní lin. obvod pro zesilovač se společným drainem

$$A_u \equiv \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_z}{1/g_m + R_z} \approx 1 \quad (31)$$

$$R_i \equiv \frac{u_i}{i_i} = \underline{\underline{\infty}} \text{ protože do gatu tranzistoru nic neteče.} \quad (32)$$

Další napěťový sledovač!