

ANALGOVÁ TECHNIKA

numerická cvičení

Garant předmětu:
Prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Autor textu:
Doc. Ing. Ivan Rampl, CSc.

Úvod

Vážení studenti,

tato numerická cvičení jsou určena k stručné ilustraci probírané látky v přednáškách kursu Analogová technika. Protože časový rozsah cvičení je velmi omezený, sedm dvojhodin za semestr, jsou zde uvedeny pouze typické postupy a řešení. Hlavní přínos tohoto souboru příkladů tedy spočívá na vašem samostatném aktivním prohlubování znalostí pomocí úloh uzavírajících každou kapitolu.

V první části o tranzistorech budou probírány jen takové obvody, které jsou částmi operačního zesilovače. V druhé části o operačních zesilovačích pak jsou uvedeny základní úlohy využití těchto zesilovačů. Smyslem příkladů je pochopit vzájemnou souhru dějů, probíhajících v uváděných elektronických obvodech, a pomocí jednoduchých postupů vytvořit si správnou představu. Tento pohled vám později pomůže kreativně rozvíjet nejen získané znalosti, ale i zamýšlet se a objevovat dříve netušené souvislosti.

Obsah

A. Obvody s bipolárními a unipolárními tranzistory

1. Tranzistory

1.1 Nastavení a stabilizace pracovního bodu bipolárního tranzistoru

1.1.1 Nastavení pracovního bodu proudem do báze

1.1.2 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné napěťové zpětné vazby

1.1.3 Nastavení pracovního bodu děličem napětí (pomocí kladné proudové zpětné vazby)

1.2 Nastavení a stabilizace pracovního bodu unipolárního tranzistoru

1.2.1 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné proudové zpětné vazby (automatické předpětí)

1.2.2 Nastavení pracovního bodu pro $U_{GS} = 0$

1.2.3 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné proudové zpětné vazby s děličem napětí

1.2.4 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné napěťové zpětné vazby u tranzistorů E FET

1.3 Metoda řešení složitých stejnosměrně vázaných tranzistorových obvodů

2. Zdroje proudu s tranzistory

2.1 Zjednodušený popis vlastností unipolárního a bipolárního tranzistoru

2.1.1 Náhradní zapojení bipolárního tranzistoru

2.1.2 Náhradní zapojení unipolárního tranzistoru

2.2 Zdroj konstantního proudu s bipolárním tranzistorem

2.3 Zdroj konstantního proudu s unipolárním tranzistorem

2.4 Řízení zdroje proudu napětím nebo proudem

3. Zesilovače střídavého signálu

3.1 Zesilovač napětí s bipolárním tranzistorem

3.2 Zesilovač napětí s unipolárním tranzistorem

3.3 Darlingtonovo zapojení

3.4 Diferenční zesilovač

3.5 Výkonový zesilovač s komplementárními bipolárními tranzistory

B. Obvody s operačními zesilovači (OZ)

- 4. Vlastnosti OZ a vlastnosti OZ s kmitočtově nezávislou zpětnou vazbou**
 - 4.1 Klasické schéma obvodů OZ
 - 4.2 Vstupní a výstupní odpor invertujícího OZ
 - 4.2.1 Vstupní odpor invertujícího OZ
 - 4.2.2 Výstupní odpor invertujícího OZ
 - 4.3 Vstupní a výstupní odpor neinvertujícího OZ
 - 4.3.1 Vstupní odpor neinvertujícího OZ
 - 4.3.2 Výstupní odpor neinvertujícího OZ
- 5. Obvody s OZ s kmitočtově nezávislou zpětnou vazbou**
 - 5.1 Stanovení optimální velikosti vazby invertujícího OZ
 - 5.2 OZ s rozdělenou zpětnou vazbou
 - 5.3 Zdroj proudu s OZ a tranzistory
 - 5.4 Zdroj proudu pouze s OZ
 - 5.4.1 Neuzemněná zátěž
 - 5.4.2 Uzemněná zátěž
- 6. OZ s kmitočtově závislou zpětnou vazbou**
 - 6.1 Aktivní filtry s OZ jako řízenými zdroji. Stavebnice selektivních RC obvodů
 - 6.2 Aktivní filtr s OZ s jednoduchou smyčkou zpětné vazby
 - 6.3 Aktivní filtr s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby
 - 6.4 Aktivní filtr se zesilovačem s konečným zesílením
- 6. OZ s nelineární zpětnou vazbou**
 - 7.1 Diodové tvarovače
 - 7.2 Logaritmické a exponenciální převodníky
 - 7.3 Jednocestný a dvoucestný usměrňovač
 - 7.4 Přesné tvarovací obvody

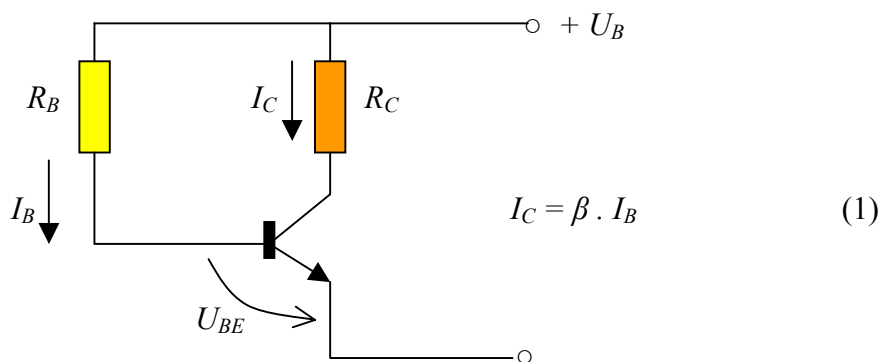
A. Obvody s bipolárními a unipolárními tranzistory

1. Tranzistory

1.1 Nastavení a stabilizace pracovního bodu bipolárního tranzistoru

1.1.1 Nastavení pracovního bodu proudem do báze

Typ tranzistoru: **NPN**

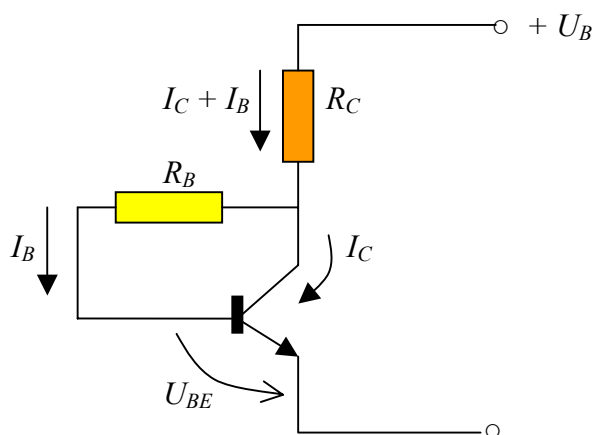


$$U_B = U_{BE} + I_B R_B \quad .$$

$$I_C = \beta \cdot \frac{U_B - U_{BE}}{R_B} \quad . \quad (2)$$

1.1.2 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné napěťové zpětné vazby

Typ tranzistoru: **NPN**



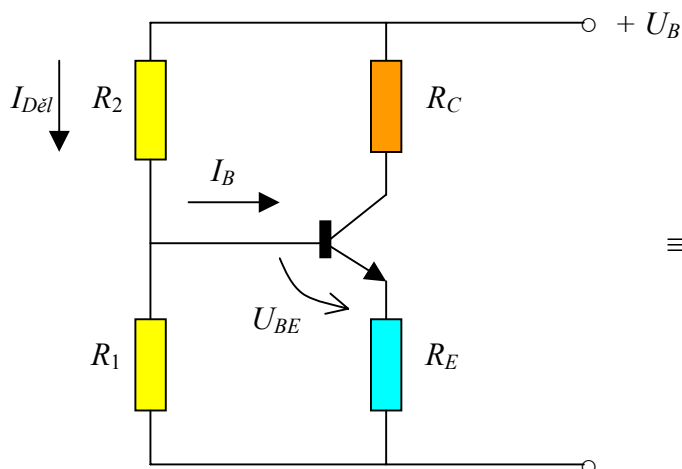
Předpokládejme: $I_C \gg I_B$ (3)

$$U_B = R_C I_C + R_B \cdot I_B + U_{BE} = I_C (R_C + R_B / \beta) + U_{BE} \quad ,$$

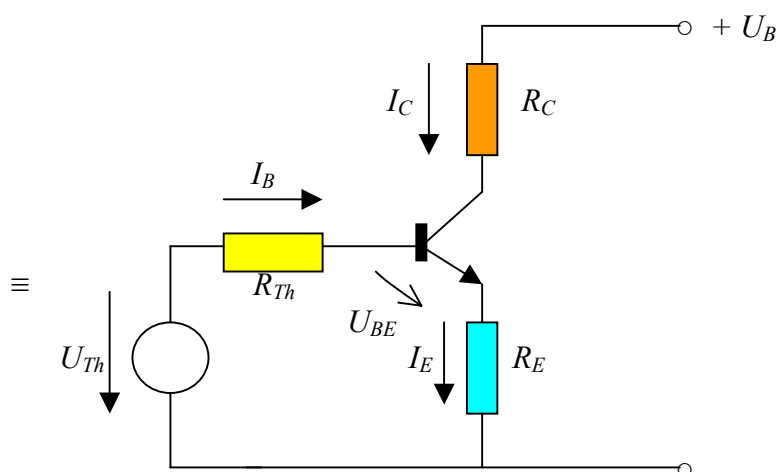
$$I_C = \frac{U_B - U_{BE}}{R_C + R_B / \beta} \quad . \quad (4)$$

1.1.3 Nastavení pracovního bodu děličem napětí (pomocí kladné proudové zpětné vazby)

Typ tranzistoru: **NPN**



Praktická volba: $I_{Del} \geq 10 I_B$



$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad , \quad U_{Th} = U_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

$$\text{Předpokládejme opět: } I_C \gg I_B \Rightarrow I_C \approx I_E \quad (6)$$

$$U_{Th} = R_{Th} I_B + U_{BE} + R_E I_C = R_{Th} \frac{I_C}{\beta} + U_{BE} + R_E I_C \quad ,$$

$$I_C = \frac{U_{Th} - U_{BE}}{R_E + \frac{R_{Th}}{\beta}} = \left(U_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{BE} \right) \frac{1}{R_E + \frac{R_{Th}}{\beta}} \quad (7)$$

Ve všech třech případech jsou výsledné výrazy (2), (4) a (7) formulací zatěžovacích přímek $I_C = f(U_{BE})$ v systému převodních charakteristik s parametrem β .

Příklad

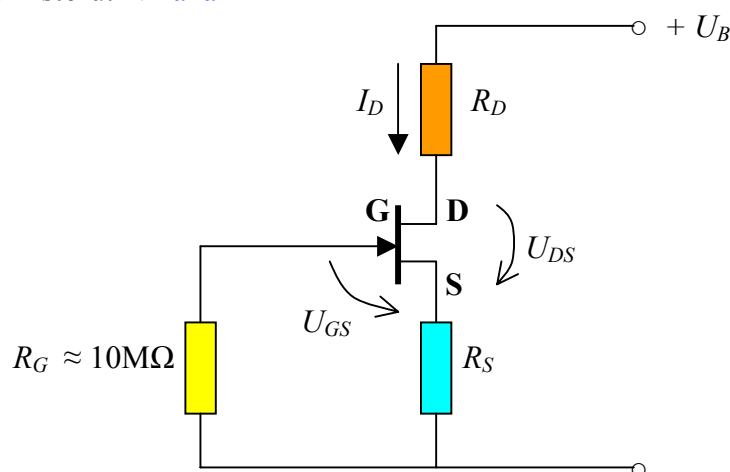
1. Posuďte vliv β na I_C pro všechny typy nastavení pracovního bodu tranzistoru. Předpokládejte, že změna $\Delta\beta = 10\%$ je vyvolána výměnou tranzistoru (nebo jeho oteplením). Výchozí pracovní bod tranzistoru je např. $U_{CE} = 5V$, $I_C = 1mA$, $\beta = 100$ při $U_B = 20V$ ($U_{BE} \approx 0.6V$, $R_E = 100\Omega$ a děličem napětí R_1, R_2 protéká proud $I_{D\bar{el}} \geq 10 I_B$).
2. Pokuste se graficky zakreslením zatěžovacích přímek do grafu převodních charakteristik (parametr β) zdůvodnit rozdílný vliv předchozích zapojení.

1.2 Nastavení a stabilizace pracovního bodu unipolárního tranzistoru

1.2.1 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné proudové zpětné vazby (automatické předpětí)

Použití pouze pro záporné hodnoty U_{GS} u J FET (Junction Field Effect Transistor) a záporné i kladné hodnoty U_{GS} u D FET (Depletion FET).

Typ tranzistoru: N-kanál



$$U_B = R_D I_D + U_{DS} + R_S I_D ,$$

$$I_D = - \frac{1}{R_D + R_S} U_{DS} + \frac{U_B}{R_D + R_S} . \quad (8)$$

Vzhledem k zanedbatelnému proudu řídicí elektrody G lze také psát

$$U_{GS} = - U_{RS} = - I_D R_S ,$$

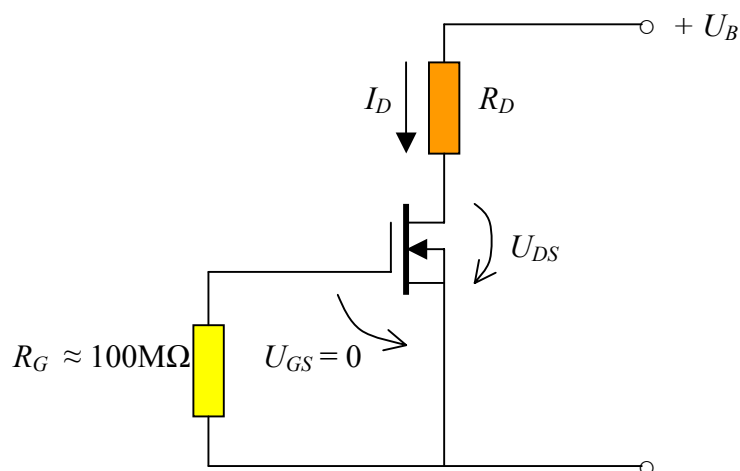
$$I_D = - \frac{1}{R_S} U_{GS} . \quad (9)$$

Výraz (8) je rovnicí zatěžovací přímky v soustavě výstupních charakteristik a (9) je rovnicí zatěžovací přímky v souřadném systému převodní charakteristiky unipolárního tranzistoru.

1.2.2 Nastavení pracovního bodu pro $U_{GS} = 0$

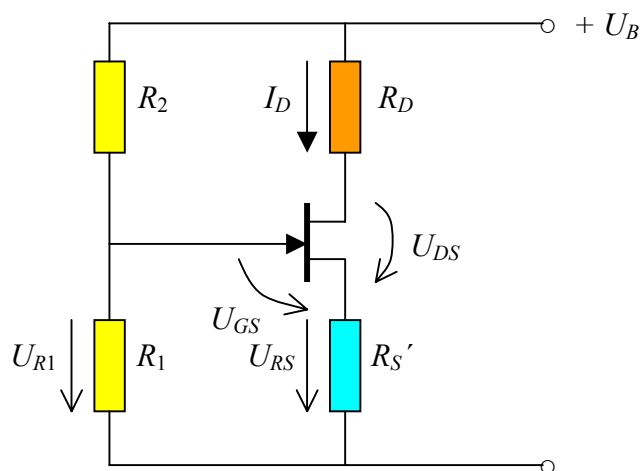
Použití většinou pro typ D FET.

Typ tranzistoru: N-kanál



1.2.3 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné proudové zpětné vazby s děličem napětí

Použití pro záporné hodnoty U_{GS} u J FET (Junction Field Effect Transistor) a záporné i kladné hodnoty U_{GS} u D FET (Depletion FET).



$$U_{R1} = U_{GS} + I_D R_{S'} \quad ,$$

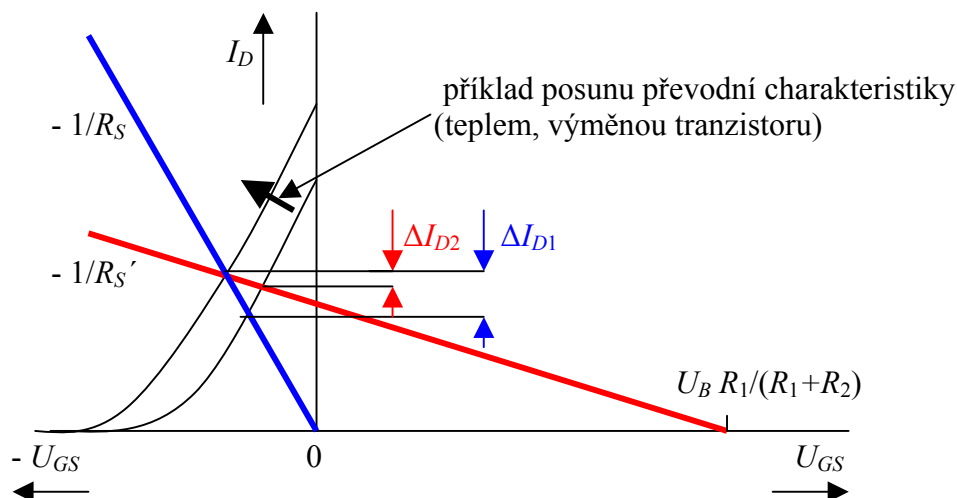
$$U_{R1} = U_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad ,$$

$$I_D R_{S'} = U_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{BS} \quad ,$$

$$I_D = - \frac{1}{R_S} U_{GS} + \frac{R_1}{R_S (R_1 + R_2)} U_B \quad . \quad (10)$$

Opět je nalezený výraz matematickým vyjádřením zatěžovací přímky v systému převodní charakteristiky.

Porovnání vlivu nastavení pracovního bodu podle 1.2.1 a 1.2.3 na stabilizaci funkce unipolárního tranzistoru při změně jeho vlastností.

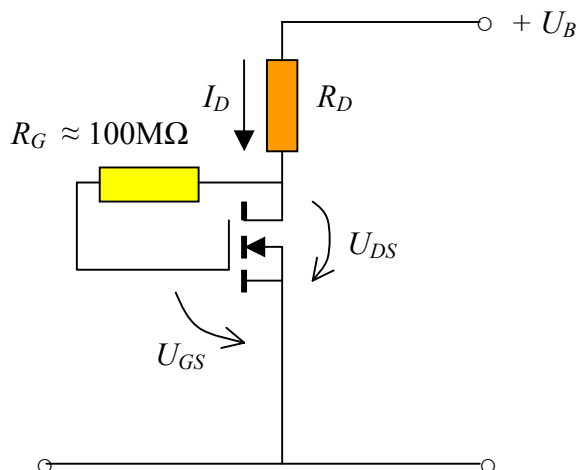


Z porovnání ΔI_{D1} a ΔI_{D2} vyplývá, že nastavení pracovního bodu způsobem 1.2.2 vykazuje menší změny I_D při změně vlastností unipolárního tranzistoru.

1.2.4 Nastavení pracovního bodu pomocí kladné napět'ové zpětné vazby u tranzistorů E FET (Enhancement FET)

Pouze pro kladné hodnoty U_{GS} .

Typ tranzistoru: N-kanál



$$U_B = I_D R_D + U_{GS} \quad , \quad U_{GS} = U_{DS} \quad .$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D} U_{GS} + \frac{U_B}{R_D} = -\frac{1}{R_D} U_{DS} + \frac{U_B}{R_D} \quad . \quad (11)$$

Výraz (11) je rovnicí zatěžovací přímky jak v souřadném systému převodní charakteristiky, tak i v systému výstupních charakteristik.

Přehled nastavení pracovního bodu unipolárních tranzistorů

typ nastavení pr.bodu	J FET	D FET	E FET
automatické	+	+	-
dělič napětí	+	+	-
v nule	-	+	-
zpětnou vazbu	-	-	+

1.3 Metoda řešení složitých stejnosměrně vázaných tranzistorových obvodů

Příklad

Nalezněte hodnoty odporu rezistorů R_1 až R_5 v zapojení např. zesilovače s bipolárními tranzistory podle schématu. Pracovní body tranzistorů: $U_{C1} = 3\text{V}$, $I_{C1} = 1\text{mA}$, $\beta = 100$,
 $U_{C2} = 5\text{V}$, $I_{C2} = 1\text{mA}$, $\beta = 100$,
 $U_{C3} = 8\text{V}$, $I_{C3} = 5\text{mA}$, $\beta = 100$.

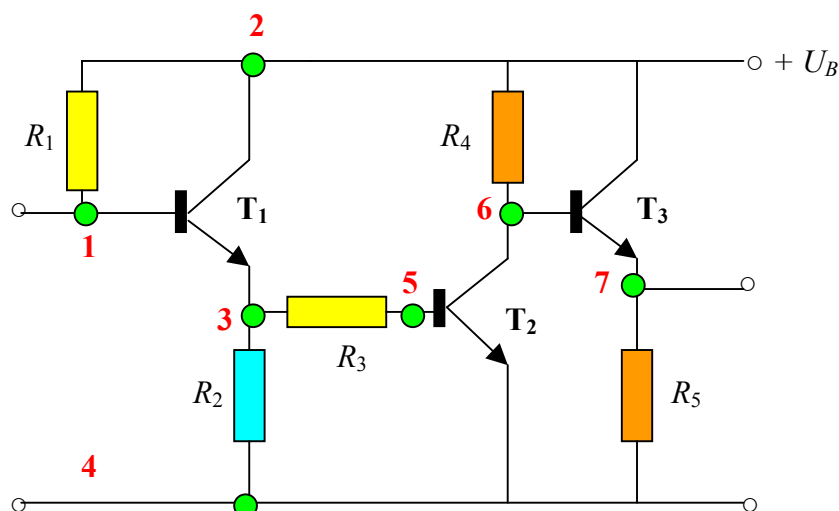
Napájecí napětí: $U_B = 20\text{V}$.

Metoda obsahuje několik kroků:

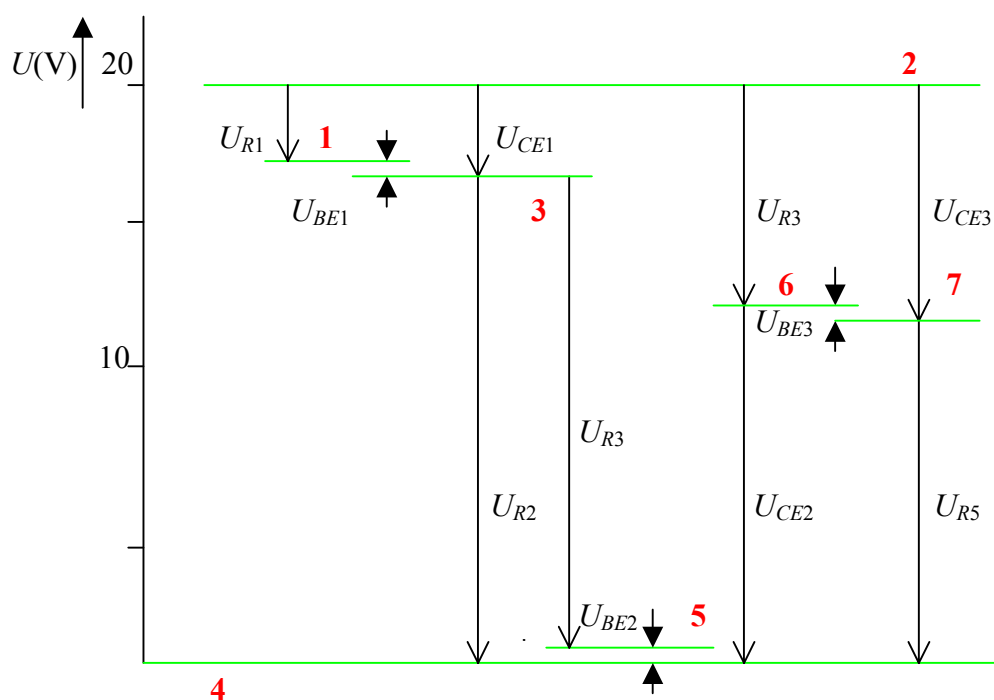
1. Označíme uzly rozdílného potenciálu analyzovaného obvodu,
2. tyto potenciály zakreslíme do grafu potenciálových úrovní,
3. z rozdílů potenciálů nalezneme jednotlivá napětí. Jsou-li dány proudy v jednotlivých větvích, určíme velikosti odporů

Poznámky: a) Předpokládáme jednotnou velikost napětí přechodu NP. Při vyšším napájecím napětí (pro $U_B > 10\text{V}$) zakreslíme $U_{BE} = 0.5\text{V}$,
b) až na výjimky (výkonové tranzistory apod.) zanedbáme proud I_B vůči I_C .

1.



2.



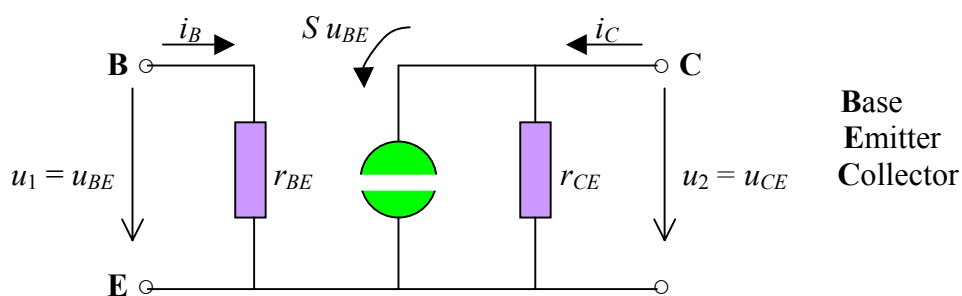
3.

Z odečtených hodnot napětí U_{R1} až U_{R5} a proudů I_{C1} , I_{C2} , I_{C3} , I_{B1} a I_{B2} určíme hodnoty R_1 až R_5 .

2. Zdroje proudu s tranzistory

2.1 Zjednodušený popis vlastností unipolárního a bipolárního tranzistoru

2.1.1 Náhradní zapojení bipolárního tranzistoru se společným emitorem

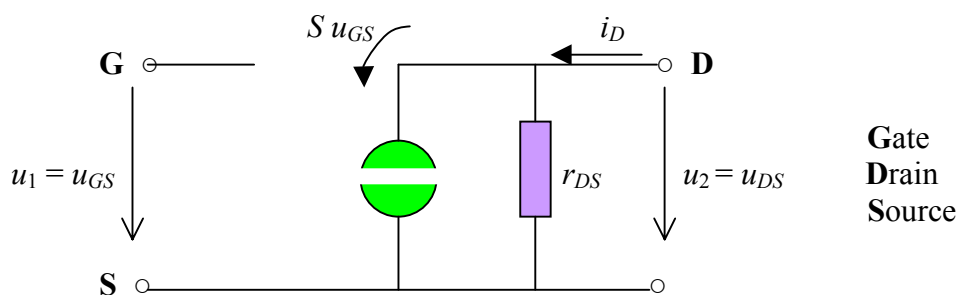


$$r_{BE} = \frac{du_{BE}}{di_B} \quad - \text{vstupní dynamický odpor} , \quad (12)$$

$$r_{CE} = \frac{du_{CE}}{di_C} \quad - \text{výstupní dynamický odpor} , \quad (13)$$

$$S = \frac{di_C}{du_{BE}} \quad - \text{strmost} . \quad (14)$$

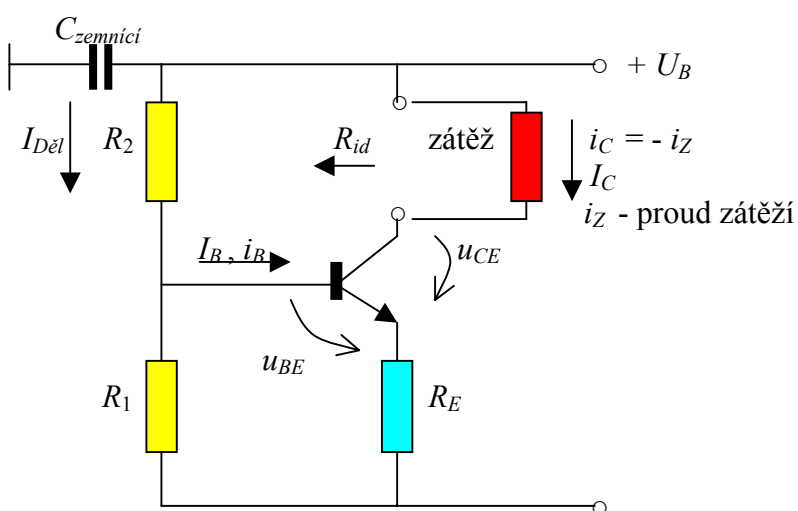
2.1.2 Náhradní zapojení unipolárního tranzistoru



$$r_{DS} = \frac{du_{DS}}{di_D} \quad - \text{výstupní dynamický odpor} , \quad (15)$$

$$S = \frac{di_D}{du_{GS}} \quad - \text{strmost} . \quad (16)$$

2.1 Zdroj konstantního proudu s bipolárním tranzistorem



Statický vnitřní odpor

$$R_i = \frac{U_{CE}}{I_C} . \quad (17)$$

Vnitřní dynamický odpor

$$R_{id} = \frac{du_{CE}}{di_C} = - \frac{du_{CE}}{di_Z} . \quad (18)$$

Vnitřní dynamický odpor při použití náhradního zapojení bipolárního tranzistoru podle 2.1.1

$$R_{id} = r_{CE} \left(1 + \frac{SR_E}{1 + \frac{R_1 // R_2 + R_E}{r_{BE}}} \right) = r_{CE} \left(1 + \frac{SR_E r_{BE}}{r_{BE} + R_1 // R_2 + R_E} \right) . \quad (19)$$

Příklad

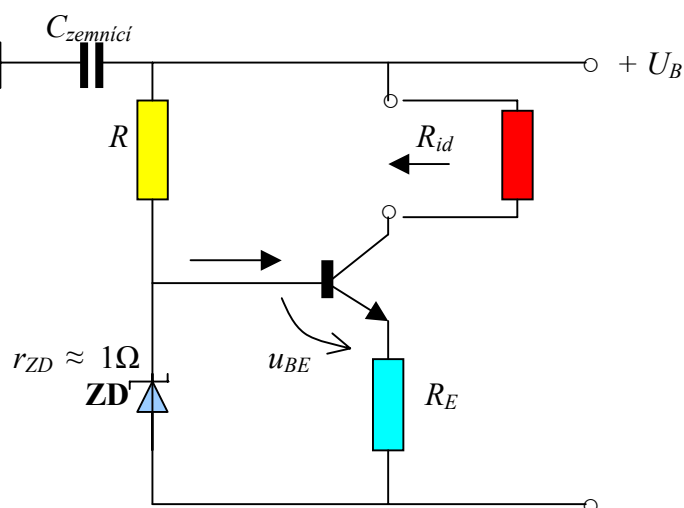
1. Vypočtěte R_{id} předešlého zapojení zdroje proudu, známe-li: $U_B = 30\text{V}$, $I_C = 1\text{mA}$, $\beta = 300$, $r_{CE} = 35\text{k}\Omega$, $\beta_{dyn} \approx \beta$, $R_E = 4.7\text{k}\Omega$. Zvolte proud děličem napětí R_1 , R_2 $I_{D\bar{el}} \geq 10 I_B$.

Poznámka:

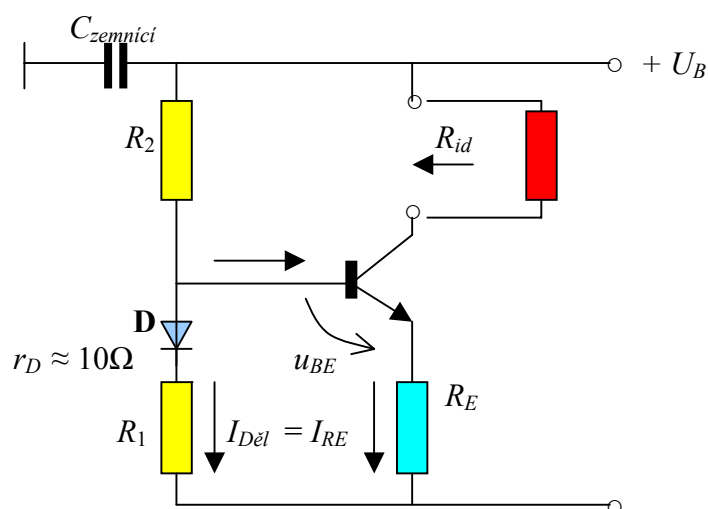
$$\begin{aligned} \text{a) } \beta &= \frac{I_C}{I_B} \quad - \text{ viz (1) } , \\ \text{b) } \beta_{dyn} &= \frac{di_C}{di_B} = \frac{di_C}{du_{BE}} \cdot \frac{du_{BE}}{di_B} = S \cdot r_{BE} . \end{aligned} \quad (20)$$

2. Nalezněte R_{id} podobného zapojení, ve kterém není zdrojem napájení báze tranzistoru napěťový dělič R_1 , R_2 , ale

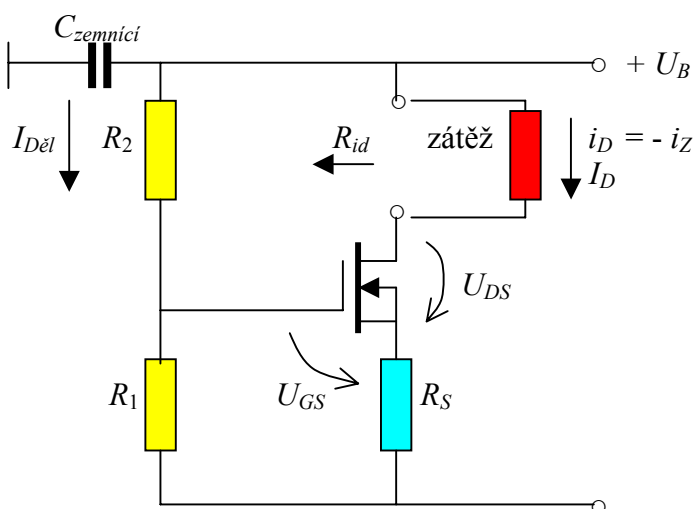
- a) stabilizátor napětí se stabilizační diodou



- b) stabilizátor napětí s běžnou diodou



2.3 Zdroj konstantního proudu s unipolárním tranzistorem

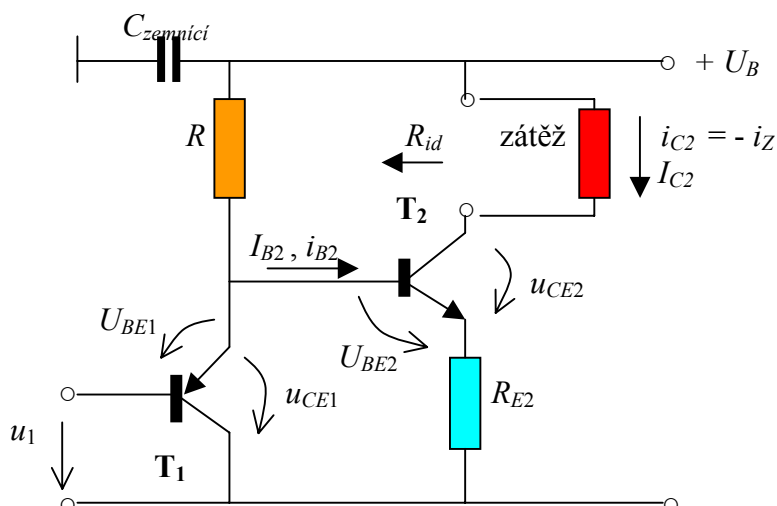


Vnitřní dynamický odpor při použití náhradního zapojení unipolárního tranzistoru podle 2.1.2

$$R_{id} = r_{DS} (1 + S R_E) . \quad (21)$$

2.4 Řízení zdroje proudu napětím nebo proudem

2.4.1 Řízení zdroje proudu napětím



$$I_{C2} = I_{E2} - I_{B2} = I_{E2} - \frac{I_{C2}}{\beta} .$$

$$I_{C2} = \frac{I_E}{1 + 1/\beta} .$$

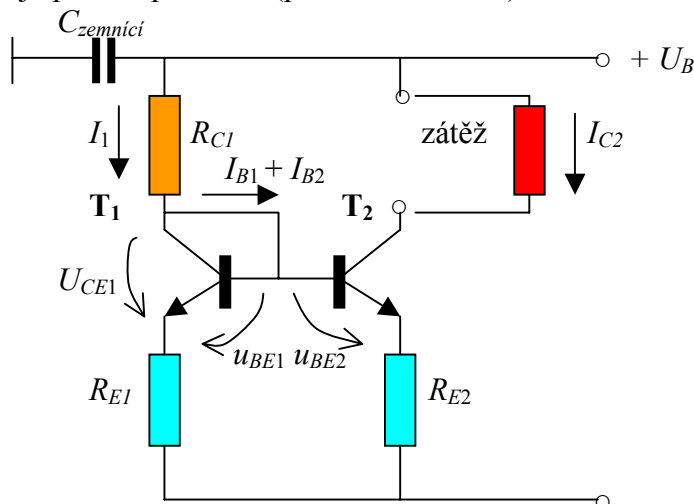
Předpokládejme $U_{BE1} \approx U_{BE2}$. Potom

$$i_Z = i_{C2} \approx I_{C2} = \frac{u_1}{R_{E2}} \cdot \frac{\beta}{1 + \beta} . \quad (22)$$

Uvažujeme-li $\beta \gg 1$, bude

$$i_Z \approx \frac{u_1}{R_{E2}} \quad (23)$$

2.4.2 Řízení zdroje proudu proudem (proudové zrcadlo)



Předpokládejme: $U_{CE1} = U_{BE1} > U_{CE1sat}$, $I_{C1} = I_{C2} \approx I_C$, $I_{B1} = I_{B2} \approx I_B$,

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_C + 2I_B \approx \beta I_B + 2I_B , \quad I_{C2} = \beta I_B ,$$

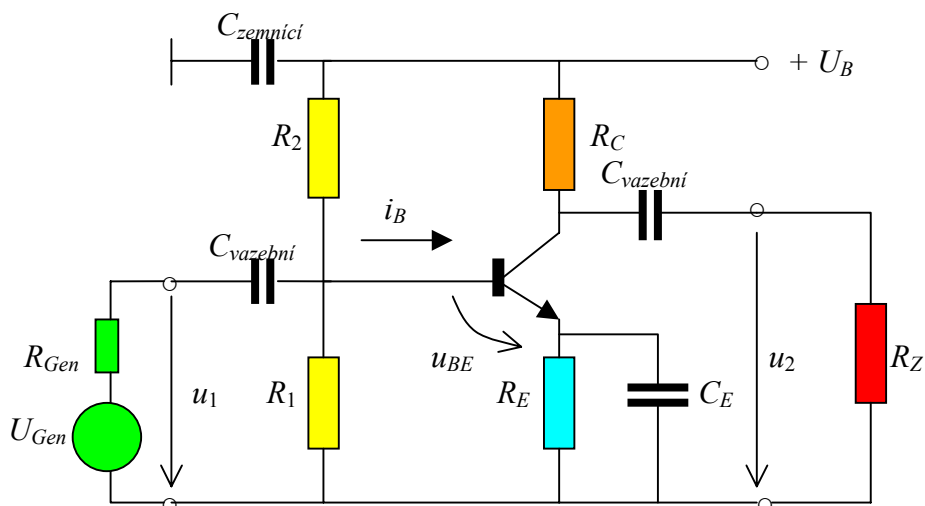
Proudový přenos

$$k = \frac{I_{C2}}{I_1} = \frac{\beta I_B}{\beta I_B + 2I_B} = \frac{\beta}{\beta + 2} \quad (24)$$

Pro $\beta = 300$ je $k = 0.993$. Tedy pro velké proudové zesilovací činitele bude $k \rightarrow 1$.

3. Zesilovače střídavého signálu

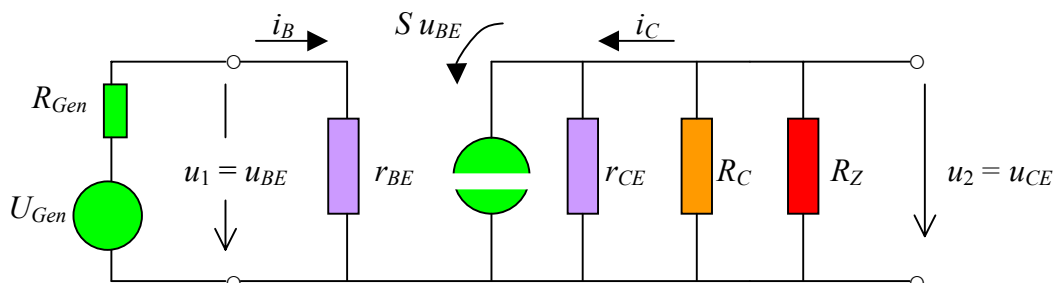
3.1 Zesilovač napětí s bipolárním tranzistorem se společným E (skutečné zapojení)



Náhradní zapojení předchozího zesilovače

Předpokládáme, že:

- a) reaktance vazebních kondenzátorů $X_{Cv} \rightarrow 0$,
- b) impedance obvodu v emitoru tranzistoru $Z_{RE,CE} \rightarrow 0$,
- c) $R_1 \parallel R_2 > r_{BE}$.



Zesílení zesilovače

$$du_1 = du_{BE} ,$$

$$u_2 = - S du_{BE} \cdot r_{CE} \parallel R_C \parallel R_Z ,$$

$$A_u = \frac{du_2}{du_1} = - S \cdot r_{CE} \parallel R_C \parallel R_Z . \quad (25)$$

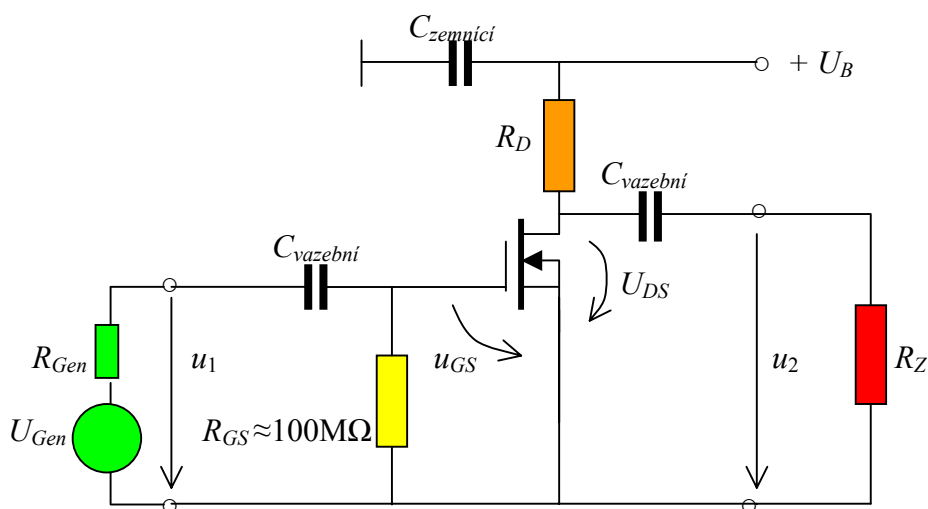
Vstupní odpor zesilovače

$$R_{vst} \approx r_{BE} . \quad (26)$$

Výstupní odpor zesilovače

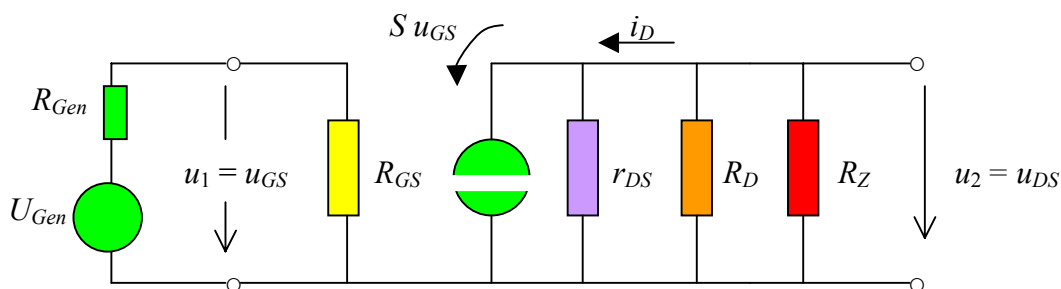
$$R_{výst} \approx r_{CE} \parallel R_C . \quad (27)$$

3.2 Zesilovač napětí s unipolárním tranzistorem se společným S



Náhradní zapojení předchozího zesilovače

Předpokládáme, že reaktance vazebních kondenzátorů $X_{Cv} \rightarrow 0$.



Zesílení zesilovače

$$du_1 = du_{GS} \text{ , } u_2 = -S du_{GS} \cdot r_{DS} \parallel R_D \parallel R_Z \text{ ,}$$

$$A_u = \frac{du_2}{du_1} = -S \cdot r_{DS} \parallel R_D \parallel R_Z \text{ .} \quad (28)$$

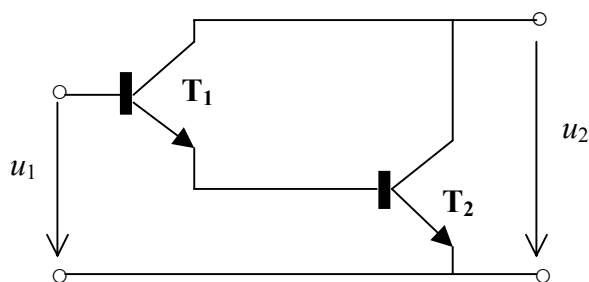
Vstupní odpor zesilovače

$$R_{vst} \approx R_{GS} \text{ .} \quad (29)$$

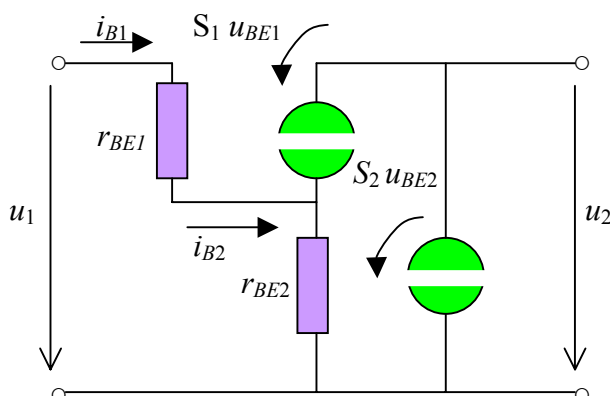
Výstupní odpor zesilovače

$$R_{v'_{st}} \approx r_{DS} \parallel R_D \text{ .} \quad (30)$$

3.3 Darlingtonovo zapojení bipolárních tranzistorů typu NPN



Náhradní zapojení tohoto obvodu (předpokládáme r_{CE1} a $r_{CE2} \gg R_Z$)



$$u_1 = u_{BE1} + u_{BE2} , \quad du_{BE1} = di_{B1} r_{BE1} , \quad du_{BE2} = (S u_{BE1} + i_{B1}) r_{BE2} ,$$

$$u_1 = i_{B1} r_{BE1} + S u_{BE1} r_{BE2} + i_{B1} r_{BE2} ,$$

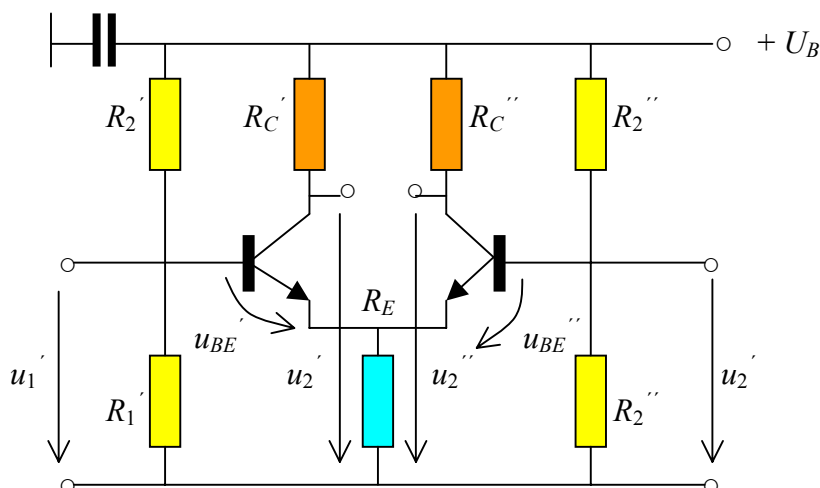
Vstupní odpor Darlingtonova zapojení

$$R_{ust} = \frac{u_1}{i_{B1}} = r_{BE1} + r_{BE2} + S r_{BE1} r_{BE2} . \quad (31)$$

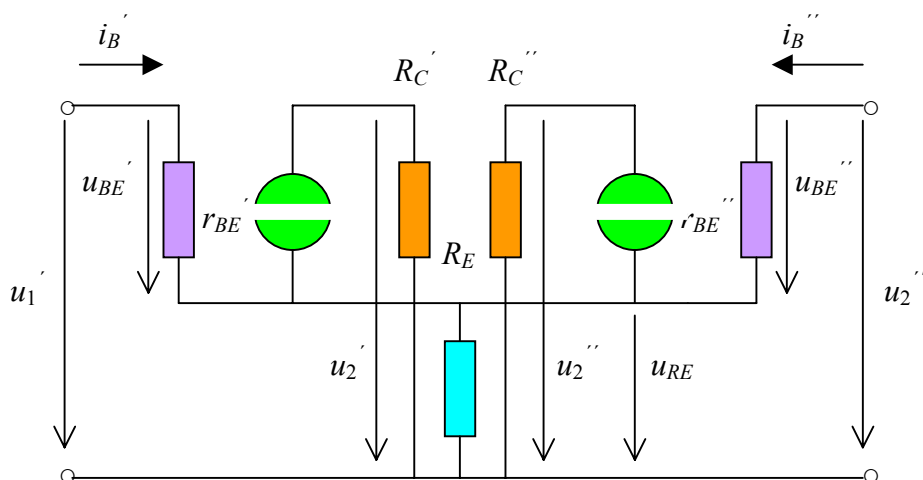
Příklad

Podobným způsobem nalezněte pro Darlingtonovo zapojení A_U a $R_{výst}$.

3.4 Diferenční zesilovač



Předpokládáme-li $R_1' \parallel R_2' \gg r_{BE}'$, $R_1'' \parallel R_2'' \gg r_{BE}''$, $r_{BE}' = r_{BE}'' = r_{BE}$, $S' = S'' = S$, $R_C' = R_C'' = R_C$, bude výsledné náhradní schéma mít tvar



Použijeme-li výše uvedených zjednodušujících předpokladů, můžeme psát

$$\begin{aligned} u_1' &= u_{BE}' + u_{RE} , \\ u_1'' &= u_{BE}'' + u_{RE} , \\ u_{RE} &= R_E (i_B' + S u_{BE}' + i_B'' + S u_{BE}'') = \\ &= R_E (i_B' (1 + S r_{BE}) + i_B'' (1 + S r_{BE})) . \end{aligned}$$

Úpravou těchto vztahů dostaneme:

a) Rozdílové (diferenční) výstupní napětí

$$U_d = u_2' - u_2'' = -S R_C (u_1' - u_1'') . \quad (32)$$

b) Součtové (sumační) výstupní napětí

$$U_\Sigma = \frac{u_2' + u_2''}{2} = - \frac{S R_C r_{BE}}{2[r_{BE} + 2R_E(1 + S r_{BE})]} (u_1' + u_1'') . \quad (33)$$

Zisk zesilovače pro rozdílové napětí

$$A_u = \frac{u_2' - u_2''}{u_1' - u_1''} = S R_C . \quad (34)$$

Zisk zesilovače pro součtové napětí

$$A_{\Sigma u} = \frac{u_2' + u_2''}{2(u_1' + u_1'')} = - \frac{S R_C r_{BE}}{2[r_{BE} + 2R_E(1 + S r_{BE})]} . \quad (35)$$

Činitel potlačení souhlasného signálu, angl. Common Mode Rejection Ratio - CMRR

$$\text{CMRR} = \frac{A_u}{A_{\Sigma u}} = \frac{-S R_C}{\frac{-R_C S r_{BE}}{2[r_{BE} + 2R_E(1 + S r_{BE})]}} . \quad (36)$$

Činitel potlačení v logaritmické formě

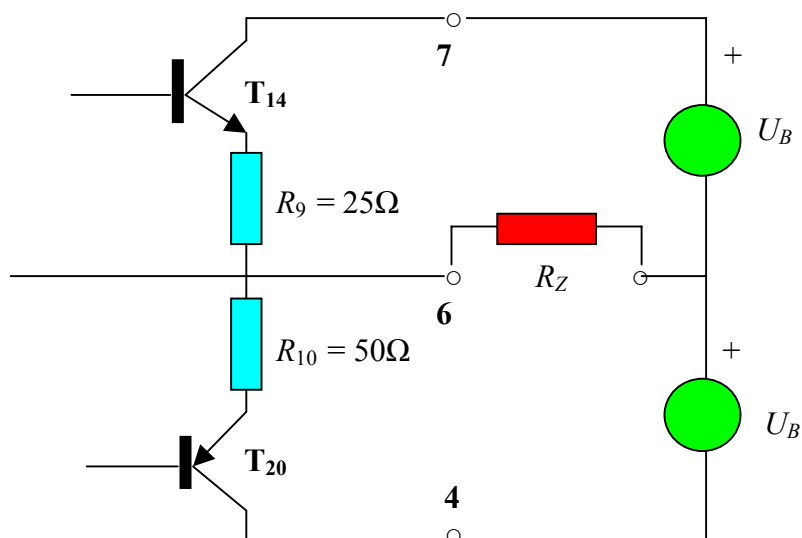
$$\text{CMRR (dB)} = 20 \log \left(\frac{2[r_{BE} + 2R_E(1 + S r_{BE})]}{r_{BE}} \right) . \quad (37)$$

Příklad

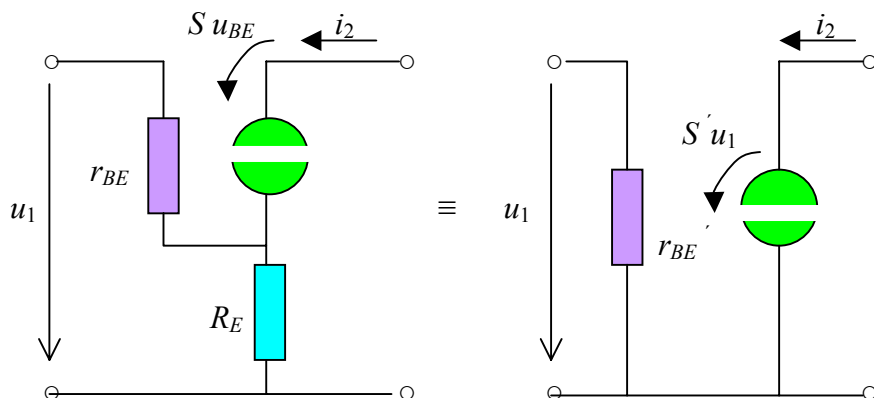
1. Vypočtete CMRR diferenčního zesilovače, známe-li: $r_{BE} = 2.5\text{k}\Omega$, $\beta_{dyn} = 100$, $R_E = 500\Omega$.
2. Vypočtete totéž pro zesilovač, který bude mít emitorový rezistor nahrazen zdrojem proudu s $R_{id} = 500\text{k}\Omega$.

3.5 Výkonový zesilovač s komplementárními bipolárními tranzistory

Koncový stupeň na obrázku je částí operačního zesilovače MAA 741 s identickým označením součástí a výstupních kontaktů.



Náhradní zapojení společného obvodu T_{14} a R_9 (T_{20} a R_{10}).



Náhrada je možná, jsou-li vstupní a výstupní veličiny totožné. Tedy

$$i_2 = S u_{BE} ,$$

$$i_2 = S' u_1 ,$$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{BE} + S u_{BE} R_E = \\ &= u_{BE} (1 + S R_E) . \end{aligned} \quad (38)$$

Po dosazení

$$i_2 = S' u_{BE} (1 + S R_E) = S u_{BE}$$

$$S' = \frac{S}{1 + S R_E} . \quad (39)$$

Výstupní odpor koncového stupně (porovnejte se vztahem pro $R_{výst}$ emitorového sledovače)

$$R_{výst} = \frac{1}{S_{14}'} \parallel \frac{1}{S_{20}'}$$

Zisk koncového stupně

a) Funkce zesilovače bez zatížení. Při chodu naprázdno je zátěží každého emitorového sledovače výstup druhého sledovače.

Při paralelním spojení emitorových sledovačů je zesílení

$$A_{u celkové} = A_{u 14} + A_{u 20} \quad , \quad A_{u emitorového sledovače} = \frac{SR_E}{1 + SR_E} \quad ,$$

kde

$$A_{u 14} = \frac{S_{14}' \frac{1}{S_{20}'}}{1 + S_{14}' \frac{1}{S_{20}'}} \quad , \quad (40)$$

$$A_{u 20} = \frac{S_{20}' \frac{1}{S_{14}'}}{1 + S_{20}' \frac{1}{S_{14}'}} \quad . \quad (41)$$

b) Funkce zesilovače se zatížením

$$A_{u celkové} = \frac{S_{14}' \frac{1}{S_{20}' + 1/R_Z}}{1 + S_{14}' \frac{1}{S_{20}' + 1/R_Z}} + \frac{S_{20}' \frac{1}{S_{14}' + 1/R_Z}}{1 + S_{20}' \frac{1}{S_{14}' + 1/R_Z}} \quad . \quad (42)$$

Příklad

1. Nalezněte hodnotu $R_{výst}$ koncového stupně, je-li společný proud kolektorů obou tranzistorů T_{14} a T_{20} $i_C = 250\mu A$. Hodnoty emitorových rezistorů podle schématu ($S \approx 40 i_C / 1V$).
2. Zjistěte $A_{u celkové}$ koncového stupně bez a se zátěží $R_Z = 2k\Omega$.

B. Obvody s operačními zesilovači (OZ)

4. Vlastnosti OZ a vlastnosti OZ s kmitočtově nezávislou zpětnou vazbou

4.1 Klasické schéma obvodů OZ

Příklad

Postup práce při analýze diferenčního stupně OZ

Oskenovat vnitřní strukturu operačního zesilovače MAA 741

1. $i_{C1} + i_{C2}$ se přivádí na vstup zrcadla T_8, T_9 ,
2. výstupní proud tohoto zrcadla $-i_{C9} \approx i_{C1} + i_{C2}$,
3. proud $i_{C10} \approx i_{C1} + i_{C2}$ je konstantní,
4. proud do bází T_3 a T_4 $i_{B3} + i_{B4} = -i_{C9} - i_{C10}$
5. vypočít velikost proudu i_{C10} , jsou-li dány hodnoty: $U_B = 15V$, $R_5 = 39k\Omega$ a uvažujeme $U_{BE} = 0.6V$ pro všechny tranzistory
6. proud rezistorem R_5

$$i_{R5} = \frac{2U_B - 2u_{BE}}{R_5} = \frac{30 - 1.2}{39 \cdot 10^3} = 738 \mu A,$$

$$i_{R5} = i_{C11} = I_0 \cdot \exp \frac{u_{BE11}}{U_T},$$

$$u_{BE10} = u_{BE11} - R_4 i_{E10} = u_{BE11} - R_4 i_{C10}, \quad (i_{C10} \gg i_{B10}),$$

Tedy

$$i_{C10} = I_0 \cdot \exp \frac{u_{BE10}}{U_T} = I_0 \cdot \exp \frac{u_{BE11} - R_4 i_{C10}}{U_T} = I_0 \cdot \exp \frac{u_{BE11}}{U_T} \cdot \exp \frac{-R_4 i_{C10}}{U_T} = i_{R5} \exp \frac{-R_4 i_{C10}}{U_T}$$

Z toho

$$i_{R5} \exp \frac{-R_4 i_{C10}}{U_T} - i_{C10} = 0. \quad (43)$$

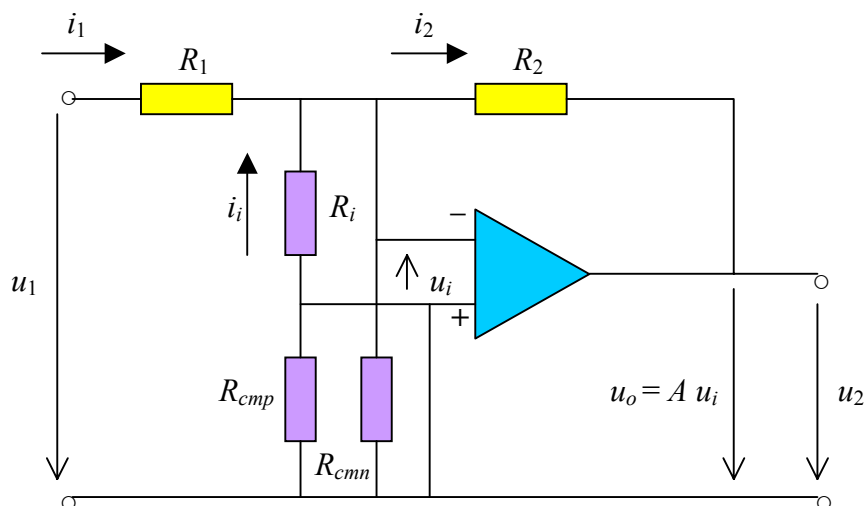
Dosazením hodnot i_{R5} , R_4 a U_T dostaneme $i_{C10} = 19 \mu A$.

4.2 Vstupní a výstupní odpor invertujícího OZ

4.2.1 Vstupní odpor

Jako příklad použijeme již klasický OZ MAA 741 s parametry:

- a) diferenční zesílení $A = 150000$,
- b) diferenční vstupní odpor (mezi vstupy + a -) $R_i = 3\text{M}\Omega$,
- c) odpory samostatných vstupů $R_{cmp} = R_{cmn} \approx 0,5\text{G}\Omega$,
- d) výstupní odpor $R_{vyst} = 60\Omega$.



$$\text{Vstupní smyčka} \quad u_1 + u_i - i_1 R_1 = 0 \quad . \quad (44)$$

$$\text{Diferenční napětí} \quad u_i = \frac{u_o}{A} \quad ,$$

Zesílení invertujícího OZ

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

Z toho

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1 = A u_i \quad ,$$

$$u_i = -\frac{u_1 R_2}{A R_1} \quad ,$$

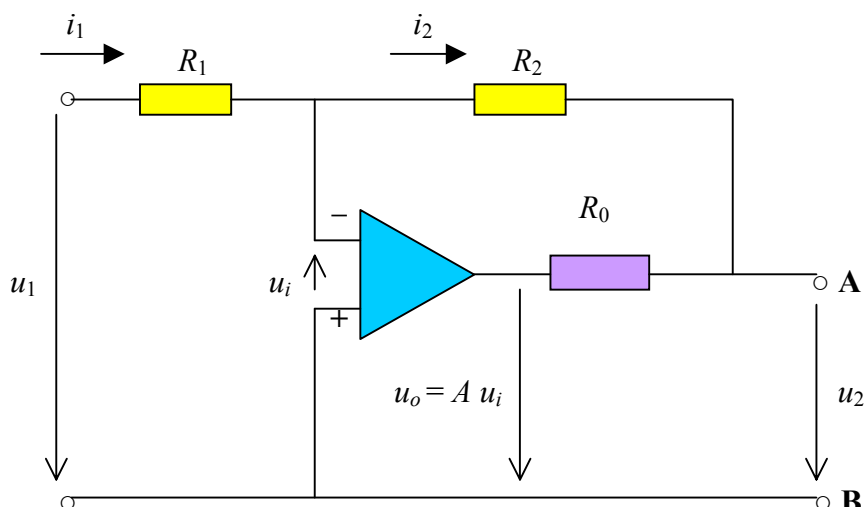
Je-li $R_1 = R_2$ pak

$$u_i = -\frac{u_1}{1,5 \cdot 10^5} \quad . \quad (45)$$

Uvažováním $R_1 = R_2$ a dosazením do (44) dostaneme

$$i_1 = \frac{u_1 + u_i}{R_1} = \frac{u_1 - \frac{u_1 R_2}{R_1 A}}{R_1} \approx \frac{u_1}{R_1} \Rightarrow R_{vst} \approx R_1 \quad . \quad (46)$$

4.2.2 Výstupní odpor



Výstupní odpor invertujícího OZ je definován

$$R_{výst} = \frac{u_{20}}{i_K} \quad , \quad (47)$$

kde u_{20} - napětí na prázdnou mezi svorkami **A B** ,
 i_K - proud nakrátko po zkratování svorek **A B** .

a) Napětí naprázdno

$$u_{20} = u_0 \frac{R_2}{R_2 + R_0} \quad ,$$

$$u_i = \frac{u_0}{A} = \frac{u_{20}(R_2 + R_0)}{AR_2} = \frac{u_{20}}{k} \quad ,$$

a z toho

$$u_{20} = -u_1 \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + (R_1 + R_2)/R_1 k} = -u_1 \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{kR_1}} \quad . \quad (48)$$

b) Proud nakrátko

$$i_K = i_1 + i_2 = \frac{u_1}{R_1 + R_2} + \frac{u_0}{R_0} = \frac{u_1}{R_1 + R_2} + \frac{Au_i}{R_0} \quad ,$$

$$i_K \approx -\frac{u_1 AR_2}{(R_1 + R_2)R_0} \quad . \quad (49)$$

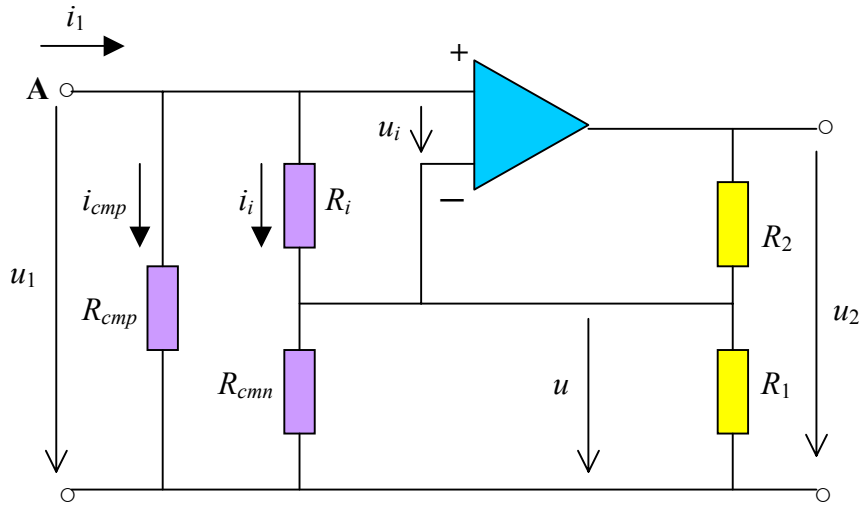
Dosadíme-li do (47), dostaneme

$$R_{výst} = \frac{u_{20}}{i_K} = \frac{R_0}{KA + 1} ,$$

kde $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} .$ (50)

4.3 Vstupní a výstupní odpor neinvertujícího OZ

4.3.1 Vstupní odpor neinvertujícího OZ



Napětí na děliči R_1, R_2

$$u = u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \beta u_2 , \text{ kde } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} .$$

Pro vstupní smyčku platí

$$u_i = u_1 - u = u_1 - \beta u_2 = u_1 - \beta A u_i ,$$

$$u_i = \frac{u_1}{1 + \beta A} \approx \frac{u_1}{\beta A} .$$

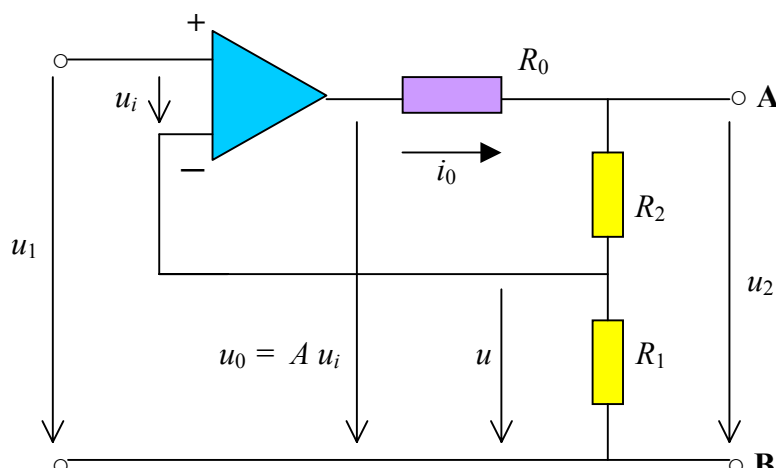
Pro uzel **A** nalezneme

$$i_1 = i_{cmp} + i_i = \frac{u_1}{R_{cmp}} + \frac{u_i}{R_i} = u_1 \left(\frac{1}{R_{cmp}} + \frac{1}{\beta A R_i} \right) ,$$

a úpravou předchozího vztahu nalezneme výraz pro vstupní odpor

$$R_{vst} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{cmp}} + \frac{1}{\beta A R_i}} = R_{cmp} \parallel \beta A R_i .$$
 (51)

4.3.2 Výstupní odpor neinvertujícího OZ



Výstupní odpor je dán vztahem (47) . Určíme proto u_{20} a i_K .

$$u = \frac{u_{20} R_1}{R_1 + R_2} ,$$

a) Napětí naprázdno

$$u_{20} = \frac{u_1}{\beta + \frac{1}{A} \left(\frac{R_0}{R_1 + R_2} + 1 \right)} = \frac{A u_1}{\beta A + \frac{R_0}{R_1 + R_2} + 1} \approx \frac{A u_1}{A \beta + 1} . \quad (52)$$

b) Proud nakrátko

$$i_K = \frac{u_0}{R_0} = \frac{A u_i}{R_0} = \frac{A u_1}{R_0} .$$

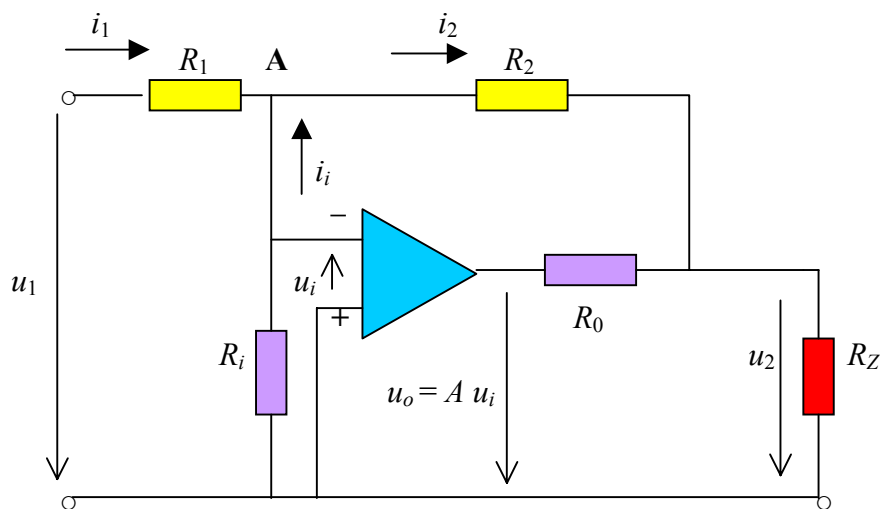
Výstupní odpor

$$R_{vyst} = \frac{u_{20}}{i_K} \approx \frac{\frac{A u_1}{A \beta + 1}}{\frac{A u_1}{R_0}} = \frac{R_0}{A \beta + 1} . \quad (53)$$

5. Obvody s OZ s kmitočtově nezávislou zpětnou vazbou

5.1 Stanovení optimální velikosti vazby invertujícího zesilovače

Vlastnosti invertujícího zesilovače s OZ jsou dány vnitřními parametry OZ, zatížením vstupu a výstupu obvodu a zpětnou vazbou. Vnitřní parametry, v našem případě vyjádřené vstupním odporem R_i a výstupním R_o , vstupní odpor $R_{vst} \approx R_1$ a zátěž R_Z , jsou v neměnné nebo určeny zadáním a nalézt optimální velikost zpětné vazby, tj. maximální zisk zesilovače A_u , závisí tedy pouze na nalezení velikosti odporu rezistoru R_2 .



Pro uzel A můžeme psát

$$i_1 + i_i = i_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{u_1 + u_i}{R_1} + \frac{u_i}{R_i} = -\frac{u_2 + u_i}{R_2} ,$$

Pro vstupní smyčku dostaneme

$$u_1 + u_i - R_1 i_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad i_1 = \frac{u_1 + u_i}{R_1} , \quad (54)$$

$$u_2 = u_0 \frac{R_z // R_2}{R_0 + R_z // R_2} = u_0 \frac{R^*}{R_0 + R^*} \Rightarrow u_0 = u_2 \frac{R_0 + R^*}{R^*} ,$$

kde $R^* = R_z // R_2$.

Pro výstupní smyčku získáme

$$u_2 + u_i + i_1 R_2 = 0 \quad , \quad \text{přičemž předpokládáme, že } i_1 \approx i_2 . \quad (55)$$

Po dosazení (54) do (55) obdržíme

$$\begin{aligned} u_2 + \frac{u_0}{A} + \frac{R_2}{R_1} \left(u_1 + \frac{u_0}{A} \right) &= 0 , \\ u_2 + \frac{u_2}{A} \frac{R_0 + R^*}{R^*} + \frac{R_2}{R_1} u_1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{u_2}{A} \frac{R_0 + R^*}{R^*} &= 0 \\ u_2 \left(1 + \frac{R_0 + R^*}{AR^*} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_0 + R^*}{AR^*} \right) &= -\frac{R_2}{R_1} u_1 . \end{aligned} \quad (56)$$

Zesílení zesilovače pak získáme úpravou (56)

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_0 + R^*}{AR^*} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_0 + R^*}{AR^*}} \quad (57)$$

Pro získání největšího zesílení je zřejmě nutné snížit hodnotu jmenovatele výrazu (57) na minimum. Položíme-li derivaci jmenovatele podle R_2 rovnu nule, získáme vztah pro nalezení hledané velikosti odporu vazebního rezistoru.

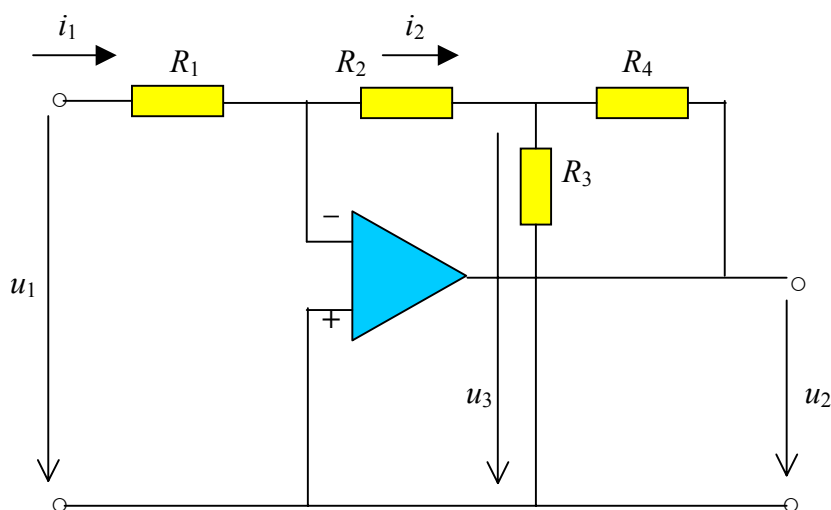
Sem napsat výraz pro R_2 .

5.2 Zesilovač s rozdělenou zpětnou vazbou

Tento typ zpětné vazby se používá v případě, když je zapotřebí velkého zesílení A_u u invertujícího zesilovače s velkým vstupním odporem R_{vst} .

$$A_u = -250 \quad R_{vst} \geq 100 \text{ k}\Omega$$

Zesilovač s rozdělenou zpětnou vazbou – T článkem



Pro dělič napětí na výstupní straně platí

$$u_{R3} = u_2 \frac{-R_2 // R_3}{R_4 + R_2 // R_3} \Rightarrow u \quad ,$$

$$u_{R3} \approx u_{R1} \quad , \quad i_1 \approx i_2 \quad ,$$

Potom

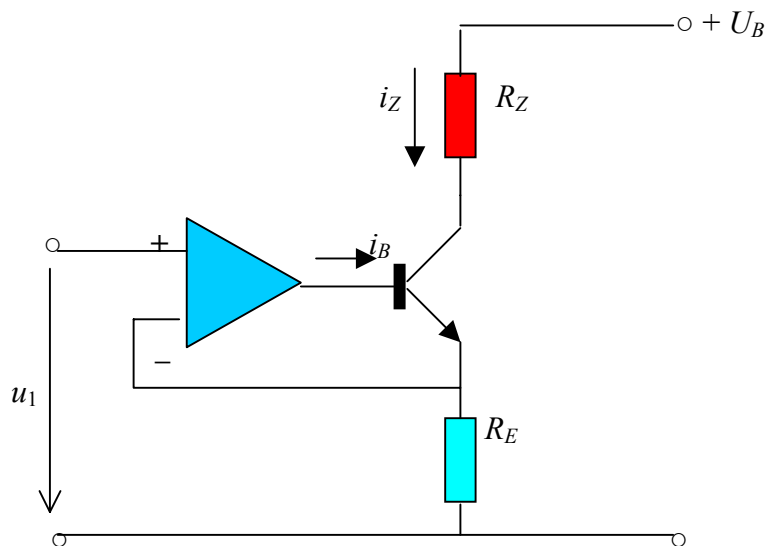
$$\frac{u_1}{R_1} = -\frac{u_{R1}}{R_2} = -\frac{u_2}{R_2} \frac{R_2 // R_3}{R_4 + R_2 // R_3} \quad ,$$

Výsledné zesílení

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{R_4 + R_2 // R_3}{R_2 // R_3} . \quad (58)$$

5.3 Zdroj proudu s OZ a tranzistory

5.3.1 Neuzemněná zátěž

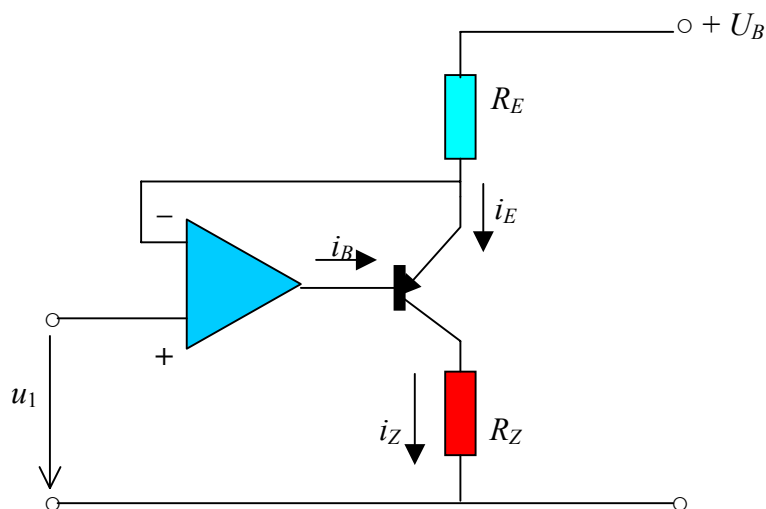


$$u_1 = u_{RE} = I_Z R_E .$$

Výsledný proud zátěži

$$I_Z = \frac{u_1}{R_E} . \quad (59)$$

5.3.2 Uzemněná zátěž



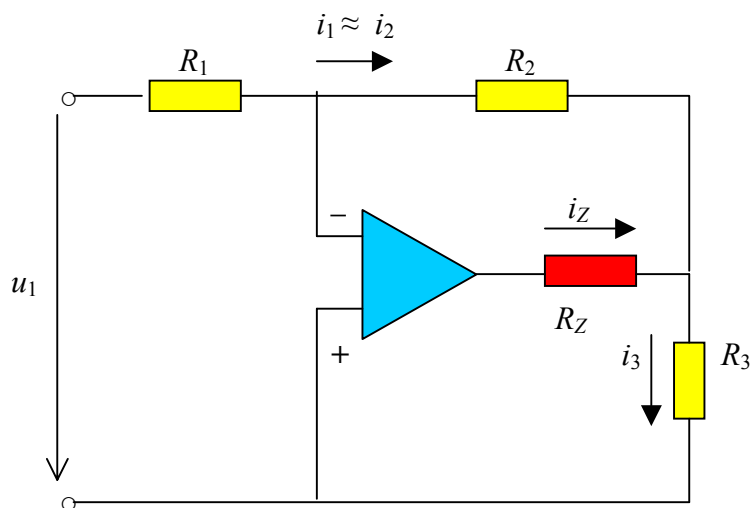
$$U_B = I_Z R_E + u_1 \quad ,$$

Výsledný proud zátěží

$$I_Z = 1/R_E (U_B - u_1) \quad . \quad (60)$$

5.4 Zdroj proudu pouze s OZ

5.4.1 Neuzemněná zátěž

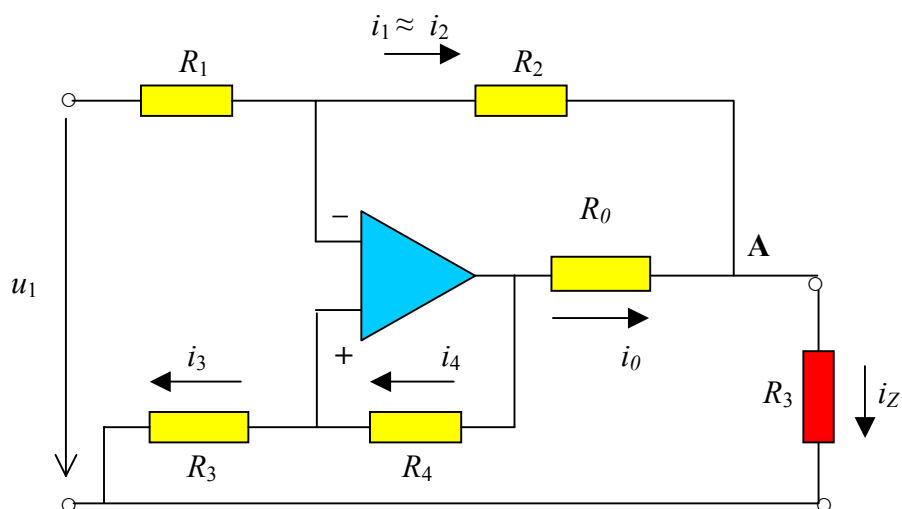


$$i_Z = i_3 - i_1 \quad , \quad R_2 i_1 = i_3 R_3 \quad , \quad i_3 = -\frac{R_1}{R_3} i_1 \quad , \quad i_1 = \frac{u_1}{R_1} \quad .$$

Výsledný proud zátěží

$$i_Z = -\frac{R_1}{R_3} i_1 - i_1 = -i_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_3} \right) = -\frac{u_1}{R_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_3} \right) \quad . \quad (61)$$

5.4.2 Uzemněná zátěž



Pro vstupní smyčku můžeme psát

$$u_1 = R_1 i_1 + R_3 i_3 \quad ,$$

druhá smyčka je popsána vztahem

$$i_1 R_2 - i_0 R_0 + R_4 i_3 = 0 \quad . \quad (62)$$

Pro uzel **A** platí

$$i_Z = i_0 + i_1 \quad ,$$

a z (60) vyplývá

$$i_0 = \frac{i_1 R_2 + R_4 i_3}{R_0}$$

Pak

$$i_Z = \frac{i_1 R_2 + i_3 R_4}{R_0} + i_1 = i_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_0} \right) + i_3 \frac{R_4}{R_0} \quad , \quad i_3 = \frac{u_1 - R_1 i_1}{R_3} \quad .$$

Pak pro proud zátěží dostaneme

$$i_Z = i_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_0} \right) + \frac{R_4}{R_0 R_3} (u_1 - R_1 i_1) = u_1 \frac{R_4}{R_0 R_3} + i_1 \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_0} - \frac{R_1 R_4}{R_0 R_3} \right)}_{\text{musí být } = 0} \quad . \quad (63)$$

Proto

$$1 + \frac{R_2}{R_0} - \frac{R_1 R_4}{R_0 R_3} = 0 \quad .$$

Volíme-li $k R_1 = R_2 = R_4$, pak

$$R_0 R_3 + k R_1 R_3 = R_1 k R_1 \Rightarrow R_3 (R_0 + k R_1) = k R_1 R_1 \quad , \text{ a je-li } k R_1 \gg R_0 \text{ a } R_1 = R_3 \quad ,$$

Potom výsledný proud zátěží je dán vztahem

$$i_Z = u_1 \frac{k R_1}{R_0 R_1} = k \frac{u_1}{R_0} \quad . \quad (64)$$

6. OZ s kmitočtově závislou zpětnou vazbou

6.1 Aktivní filtry s OZ jako řízenými zdroji

Budeme zde probírat jen filtry s řízenými zdroji..

- a) Pasivní část jeden blok
aktivní část druhý blok } obtížné nastavování, stálost parametrů,
- b) řada dílčích jednoduchých filtrů s pasivní i aktivní částí. Lze technologicky lépe zvládnout – standardizovat.

Přenosová funkce filtru

$$K(p) = \frac{G(p)}{H(p)}, \quad (65)$$

obvykle se aproximuje podle Butterwortha, Čebyševa, Bessela – lze je realizovat $K(p)$ se rozloží (technicky nejjednodušší) do kaskády:

$$F(p) = \prod_{n=1}^N F_n(p), \quad (66)$$

Kde $F_n(p)$ - jsou dílčí přenosové funkce (obvykle max. 2. řádu).

Rozklad polynomů $G(p)$ a $H(p)$

$$F(p) = h \frac{\prod_{r=1}^R (p - n_r)}{\prod_{s=1}^S (p - p_s)}, \quad (67)$$

souřadnice nul
souřadnice pólů

kde S je řád filtru.

Komplexní čísla n_r, p_s jsou souřadnice nul, pólů, které leží buď na reálné ose (reálná čísla), nebo symetricky rozloženy vůči reálné ose (komplexně sdružená čísla).

Dílčí přenosové funkce nejpoužívanějších filtrů:

a) DP1 - dolní propust prvního řádu

$$F_n(p) = \frac{h_n}{p - \sigma_{p_n}} = \frac{a_0}{p + b_0} = \frac{\frac{1}{\tau}}{p + \frac{1}{\tau}}. \quad (68)$$

b) HP1 - horní propust prvního řádu

$$F_n(p) = \frac{h_n p}{p - \sigma_{p_n}} = \frac{a_1 p}{p + b_0} = \frac{p}{p + \frac{1}{\tau}} \quad . \quad (69)$$

c) DP2 - dolní propust druhého řádu

$$F_n(p) = \frac{h_n}{(p - p_n)(p - p_n^*)} = \frac{h_n}{p^2 + \frac{\omega_{0_n}}{Q_n} p + \omega_{0_n}^2} = \frac{a_0}{p^2 + b_1 p + b_0} \quad . \quad (70)$$

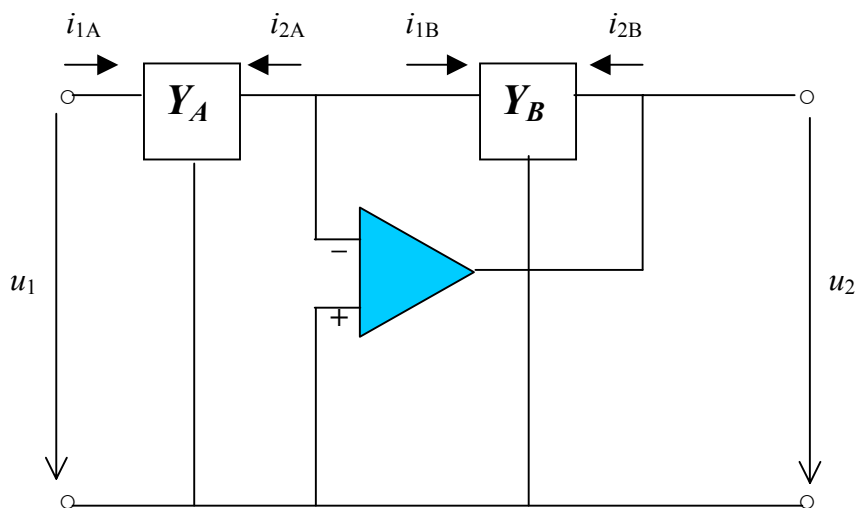
d) HP2 - horní propust druhého řádu

$$F_n(p) = \frac{h_n p^2}{(p - p_n)(p - p_n^*)} = \frac{h_n p^2}{p^2 + \frac{\omega_{0_n}}{Q_n} p + \omega_{0_n}^2} = \frac{a_2 p^2}{p^2 + b_1 p + b_0} \quad . \quad (71)$$

e) PP2 – pásmová propust druhého řádu

$$F_n(p) = \frac{h_n p}{(p - p_n)(p - p_n^*)} = \frac{h_n p}{p^2 + \frac{\omega_{0_n}}{Q_n} p + \omega_{0_n}^2} = \frac{a_1 p}{p^2 + b_1 p + b_0} \quad . \quad (72)$$

6.2 Aktivní filtr s OZ s jednoduchou smyčkou zpětné vazby



Systém rovnic prvního admitančního dvojbranu

$$\begin{aligned} i_{1_A} &= y_{11_A} u_{1_A} + y_{12_A} u_{2_A} \quad , \\ i_{2_A} &= y_{21_A} u_{1_A} + y_{22_A} u_{2_A} \quad . \end{aligned}$$

Z předchozích rovnic a při uvažování vlivu zapojeného OZ získáme

$$i_{2A} = y_{21A} u_{1A} \quad . \quad (73)$$

Druhý dvojbran je popsán rovnicemi

$$\begin{aligned} i_{1B} &= y_{1B} u_{1B} + y_{12B} u_{2B} \quad , \\ i_{2B} &= y_{21B} u_{1B} + y_{22B} u_{2B} \quad . \end{aligned}$$

Z tohoto systému rovnic vyplývá

$$i_{1B} = y_{12B} u_{2B} \quad . \quad (74)$$

Z rovnosti proudů $i_{2A} = i_{1B}$ vyplývá hledaný vztah pro přenosovou funkci tohoto obvodu

$$K(p) = - y_{21A} / y_{12B} \quad . \quad (75)$$

Typy použitých čtyřpólů:

1.

obrázek

$$\begin{aligned} y_{12} &= -\frac{1}{R} \\ y_{21} &= -\frac{1}{R} \end{aligned}$$

2.

obrázek

$$y_{12} = y_{21} = -Cp$$

3.

obrázek

$$y_{21} = y_{12} = -\frac{Cp}{1 + CRp}$$

4.

obrázek

$$y_{21} = y_{12} = -\frac{1}{R} - Cp$$

5.

obrázek

$$y_{21} = y_{12} = \frac{1}{R_1 + R_2} \frac{1}{1 + C \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} p}$$

6.

obrázek

$$y_{21} = -\frac{p^2 C_1 C_2 R}{1 + p(C_1 + C_2)R}$$

7.

obrázek

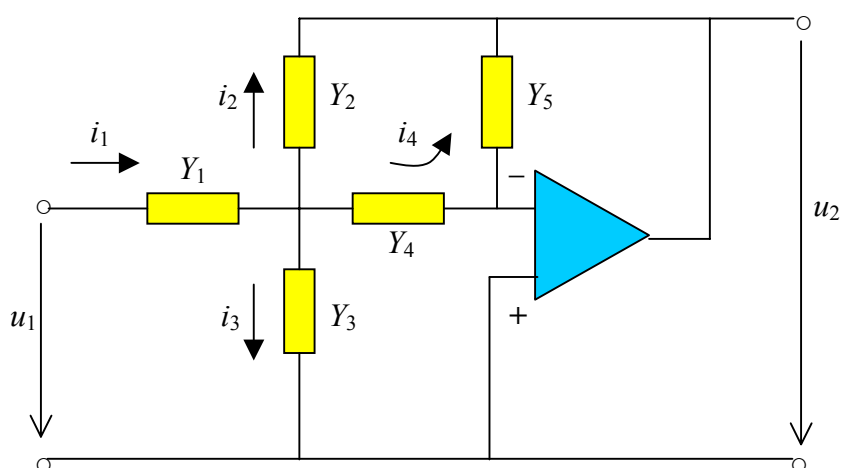
$$y_{21} = -\frac{1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + pC_0(R_1 + R_2) + p^2 C_0 C R_1 R_2}{1 + pC R_1 R_2 / (R_1 + R_2)}$$

8.

obrázek

$$y_{21} = -\frac{1}{R_0} \cdot \frac{1 + p(C_1 + C_2)R + p^2 C_1 C_2 R_0 R}{1 + p(C_1 + C_2)R}$$

6.3 Aktivní filtr s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby



Přenosová funkce tohoto typu filtru

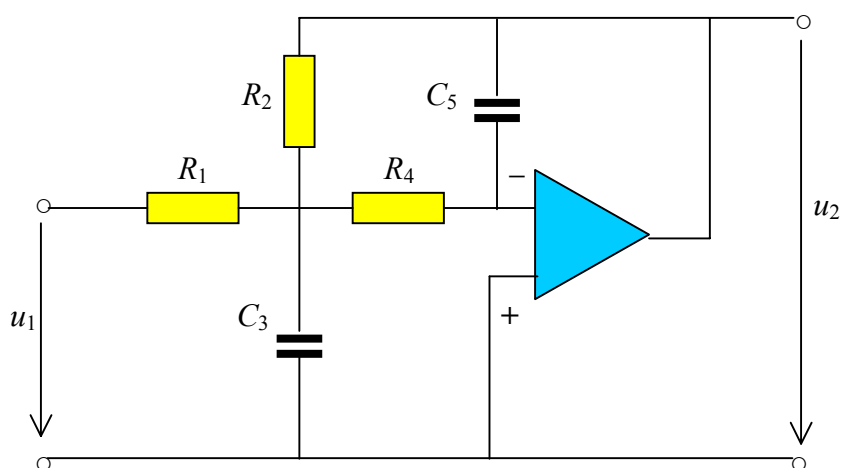
$$F_n(p) = \frac{Y_1 Y_4}{Y_2 Y_4 + Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}$$

Příklad

DP 2

$$F_n(p) = \frac{4}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q}p + \omega_0^2}$$

Z toho $Y_1 a Y_4$ reálné $Y_1 = G_1$ $Y_4 = G_4$ $Y_3 = pC_3$ $Y_5 = pC_5$ $Y_2 = G_2$



Dosadíme

$$F(p) = \frac{G_1 G_4}{p^2 C_3 C_5 + p C_5 (G_1 + G_2 + G_4) + G_2 G_4} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + p C_5 \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) R_4 \right] - p^2 C_3 C_5 R_2 R_4}$$

obrázek

$$(u_1 - u_{23})Y_1 - u_{23}(Y_3 + Y_4) + (u_2 - u_{23})Y_2 = 0$$

$$u_{23}Y_4 + u_2Y_5 = 0 \quad u_{23} = -u_2 \frac{Y_5}{Y_4}$$

$$\left(u_1 + u_2 \frac{Y_5}{Y_4} \right) Y_1 + u_2 \frac{Y_5}{Y_4} (Y_3 + Y_4) + \left(u_2 + u_2 \frac{Y_5}{Y_4} \right) Y_2 = 0$$

$$u_1 Y_1 + u_2 \frac{Y_5 Y_1}{Y_4} + u_2 \frac{Y_5}{Y_4} (Y_3 + Y_4) + u_2 \left(1 + \frac{Y_5}{Y_4} \right) Y_2 = 0$$

$$u_1 Y_1 + u_2 \left(\frac{Y_5 Y_1}{Y_4} + \frac{Y_5}{Y_4} (Y_3 + Y_4) + \left(\frac{Y_4 + Y_5}{Y_4} \right) Y_2 \right) = 0$$

$$\frac{u_2}{u_1} = - \frac{Y_1}{\frac{Y_5 Y_1}{Y_4} + \frac{Y_5}{Y_4} (Y_3 + Y_4) + \frac{(Y_4 + Y_5) Y_2}{Y_4}} = - \frac{Y_1 Y_4}{Y_5 Y_1 + Y_5 Y_3 + Y_5 Y_4 + Y_4 Y_2 + Y_5 Y_2} =$$

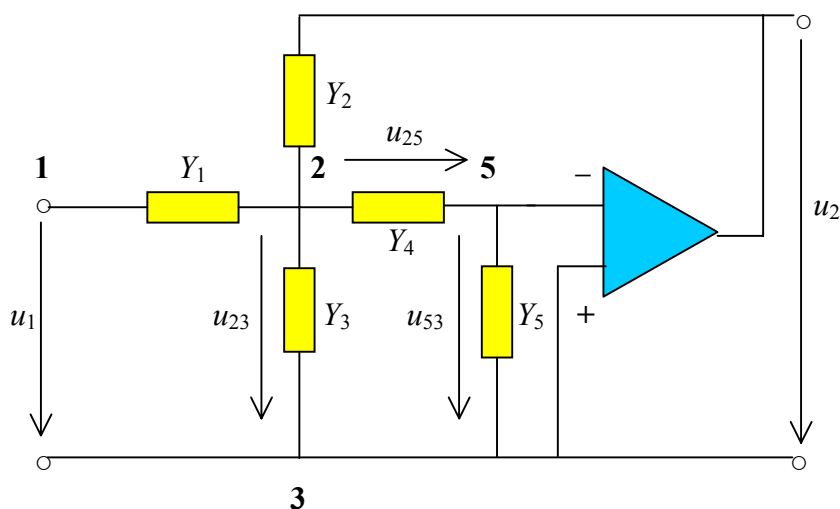
$$= - \frac{Y_1 Y_4}{Y_4 Y_2 + Y_5 (Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_2)}$$

6.4 Aktivní filtr se zesilovačem s konečným zesílením.

Zavádí se slabá kladná zpětná vazba pro odtlumení pasivního obvodu RC.

Musí vzniknout zpětná vazba s trojbranem:

- jedna brána vstupní,
- jedna brána pro zavedení zpětného signálu,
- jedna brána výstupní.



$$F(p) = A_u \frac{Y_1 Y_4}{Y_5 Y_1 + Y_4 Y_1 + Y_5 Y_3 + Y_4 Y_3 + Y_5 Y_4 - A_u Y_4 Y_2 + Y_5 Y_2 + Y_4 Y_2} =$$

$$= A_u \frac{Y_1 Y_4}{Y_4 [Y_1 + Y_3 + (1 - A_u) Y_2] + Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}$$

7. OZ s nelineární zpětnou vazbou

7.1 Diodové tvarovače

7.2 Logaritmické a exponenciální převodníky

7.3 Jednocestný a dvoucestný usměrňovač

7.4 Přesné tvarovací obvody.