

10 TRANZISTORY A ZOSILŇOVAČE

10.1 VŠEOBECNÁ ČASŤ

Tranzistor – je aktívny polovodičový nelineárny prvok s dvoma PN priechodmi, ktorým riadime veľký výkon na výstupe pomocou malého výkonu na vstupe. Vo svojej pôvodnej funkcii uskutočňuje premenu malého odporu so slabým napäťovým signálom na veľký odpor s takmer rovnakým prúdom, avšak mnohonásobne zosilneným napätím. Z tohto významu vznikol aj jeho názov: (angl.) **transfer resistor** = transistor. Tranzistor je základným stavebným prvkom v mikroelektronike a zosilňovacej technike. Dôležitým parametrom tranzistora je prúdový zosilňovací činiteľ β .

Použitie tranzistora:

- v zosilňovačoch na zosilnenie signálu,
- v bezkontaktných spínačoch na rýchle spínanie,
- v logických a číslicových obvodoch na vytváranie rôznych logických funkcií (najmä negácie),
- v impulzových obvodoch ako aktívny obmedzovač amplitúdy.

Rozdelenie tranzistorov:

- a) bipolárne (PNP, NPN) – na jeho funkcii sa zúčastňujú nosiče náboja oboch polarít,
- b) unipolárne (J FET, MOS FET, MIS FET, MNS FET, IG FET) – sú riadené elektrickým poľom a pri nich existuje len jeden druh prúdu – buď elektrónový, alebo dierový.

Výhody unipolárnych tranzistorov oproti bipolárnym

- veľmi veľký vstupný odpor (10^9 až $10^{12} \Omega$) a nulový vstupný prúd,
- výstupný obvod sa správa ako pasívny, a to je výhodné pre spínanie malých napätí,
- relatívne malý vlastný šum, a to umožňuje ich spoľahlivú činnosť i pri veľmi vysokých frekvenciách (1 GHz),
- príkon na rovnakú obvodovú funkciu je až 100-krát nižší (1 nW),
- možnosť veľmi veľkej integrácie (VLSI, ELSI) a miniaturizácie (zmenšovanie plochy),
- výroba unipolárnych obvodov je jednoduchšia a lacnejšia.

Nevýhody unipolárnych tranzistorov

- nižšia pracovná rýchlosť a rýchlosť spínania ako pri špeciálnych integrovaných bipolárnych tranzistorových štruktúrach,
- nebezpečenstvo prerazu riadiacej elektródy.

Zosilňovač – elektronické zariadenie (štvorpól, dvojbrána), ktoré zosilňuje elektrický signál. Popri vstupe, na ktorý privádzame signál určený na zosilnenie, a výstupe, z ktorého zosilnený signál odoberáme, musí mať zosilňovač ešte prívod energie (napájanie zo zdroja U_N , U_{CC} alebo U_Z), ktorý tvorí jeho nevyhnutnú súčasť. Časť napájacej energie sa pridáva k výstupnému signálu (o túto energiu sa vstupný signál zosilňuje) a druhú časť napájacej energie zosilňovač mení na stratové teplo. Zosilňovač sa skladá zo zosilňovacieho aktívneho prvku (najčastejšie tranzistor, elektrónka sa v súčasnosti používa v koncových stupňoch vysieláčov a v rozhlasovej technike na dosiahnutie väčšieho výkonu a menšieho šumu pri zosilňovaní vF signálov) a pomocných obvodov na nastavenie pracovného bodu.

Základným parametrom zosilňovačov je ich zosilnenie, zisk, prenos.

Rozdelenie zosilňovačov z viacerých hľadísk:

1. Podľa veľkosti vstupného signálu:
 - a) predzosilňovače
 - b) koncové stupne (výkonové zosilňovače)
2. Podľa charakteru vstupného signálu:
 - a) jednosmerné (=)
 - b) striedavé (~)
3. Podľa frekvencie striedavých signálov:
 - a) nízkočfrekvenčné (nf)
 - b) vysokočfrekvenčné (vf)
4. Podľa šírky prenášaného frekvenčného pásma:
 - a) úzkopásmové (selektívne)
 - b) širokopásmové
5. Podľa vnútornej štruktúry:
 - a) jednostupňové (obsahujú len jeden zosilňovací prvok)
 - b) viacstupňové
6. Podľa druhu väzby medzi stupňami:
 - a) priamo viazané
 - b) s transformátorovou väzbou
 - c) s väzbou RC (kapacitnou)
7. Podľa spôsobu činnosti:
 - a) jednočinné
 - b) dvojčinné

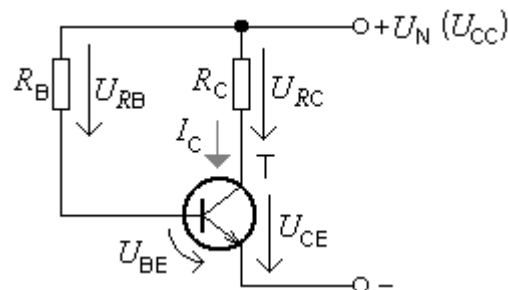
8. Podľa polohy pracovného bodu:

- a) zosilňovače triedy A
- b) zosilňovače triedy B
- c) zosilňovače triedy C
- d) zosilňovače triedy D (tzv. rekuperačné)

9. Podľa základného zapojenia tranzistora:

- a) zosilňovače s tranzistorom v zapojení so spoločným emitorom (SE, SS)
- b) zosilňovače s tranzistorom v zapojení so spoločnou bázou (hradlom) (SB, SG)
- c) zosilňovače s tranzistorom v zapojení so spoločným kolektorom (SK, SD)

Niekoľko vzťahov pre tranzistor v zapojení so spoločným emitorom (SE) dôležitých pri riešení príkladov z tranzistorov a zosilňovačov



Obr. 10.1 Tranzistor v zapojení so spoločným emitorom (SE)

Pre báзовý prúd I_B platí

$$I_B = \frac{U_{RB}}{R_B} = \frac{U_N - U_{BE}}{R_B}, \quad (10.1)$$

kde R_B je odpor v báze, U_{RB} napätie na odpore R_B , U_{BE} napätie medzi bázou a emitorom a U_N je napájacie napätie.

Pre kolektorový prúd môžeme písať

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{I_C}{I_B}, \quad (10.2)$$

kde β je prúdový zosilňovací činiteľ.

Napätie medzi kolektorom a emitorom U_{CE} môžeme určiť podľa vzťahu

$$U_N = U_{RC} + U_{CE} \quad \Rightarrow \quad U_{CE} = U_N - U_{RC}, \quad (10.3)$$

kde U_N je napájacie napätie a U_{RC} napätie na odpore R_C .

Saturačný prúd I_S dostaneme približne ako podiel napájacieho napätia U_N a kolektorového odporu R_C , čiže

$$I_S \doteq \frac{U_N}{R_C}. \quad (10.4)$$

Vstupnú impedanciu Z_{vst} dostaneme pomocou dynamického odporu emitora r_e ako

$$Z_{\text{vst}} = \beta \cdot r_e, \quad (10.5)$$

kde β je prúdový zosilňovací činiteľ a pre r_e platí približne empirický vzťah

$$r_e \doteq \frac{0,03}{I_C},$$

kde I_C je kolektorový prúd.

Výstupná impedancia $Z_{\text{výst}}$ sa približne rovná kolektorovému odporu R_C , čiže

$$Z_{\text{výst}} \doteq R_C \quad (10.6)$$

a napäťové zosilnenie A_u určíme ako

$$A_u = \frac{R_C \parallel R_z}{r_e}; \quad (10.7)$$

kde \parallel je označenie paralelnej kombinácie odporov R_C a R_z , R_C je kolektorový odpor, r_e je dynamický odpor emitora a R_z je zaťažovací odpor.

10.2 RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 10.2.1. Germániový tranzistor je zapojený podľa obr. 10.1, pričom $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $U_N = 10 \text{ V}$, $\beta = 60$. Aké bude napätie U_{CE} medzi kolektorom a emitorom? (Pri Ge tranzistore predpokladajte $U_{BE} = 0,2 \text{ V}$.)

Riešenie: Pre báзовý prúd platí podľa (10.1)

$$I_B = \frac{U_N - U_{BE}}{R_B} = \frac{10 \text{ V} - 0,2 \text{ V}}{100 \cdot 10^3 \Omega} = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 0,098 \text{ mA}.$$

Podľa (10.2) kolektorový prúd I_C

$$I_C = \beta \cdot I_B = 60 \cdot 0,098 \text{ mA} = 5,88 \text{ mA} \doteq 5,9 \text{ mA}.$$

Tento kolektorový prúd tečie cez odpor R_C a vytvorí na ňom úbytok napätia U_{RC} , pre ktorý z Ohmovho zákona platí

$$U_{RC} = I_C \cdot R_C = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 1 \cdot 10^3 \Omega = 5,9 \text{ V}.$$

Napätie U_{CE} vypočítame podľa (10.3)

$$U_{CE} = U_N - U_{RC} = 10 \text{ V} - 5,9 \text{ V} = 4,1 \text{ V}.$$

Príklad 10.2.2. Kremíkový tranzistor zapojený podľa obr. 10.1 má napájacie napätie $U_N = 6 \text{ V}$, $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$, $R_B = 330 \text{ k}\Omega$ a výrobca udáva, že β sa pohybuje v rozmedzí od 30 do 140 pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a pri teplote $80 \text{ }^\circ\text{C}$ môže vzrásť o 30 %. Aké bude minimálne a maximálne U_{CE} ?

Riešenie: Pri Si tranzistore predpokladáme $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$. Pre bázový prúd podľa (10.1) platí

$$I_B = \frac{U_N - U_{BE}}{R_B} = \frac{6 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{330 \cdot 10^3 \Omega} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 0,016 \text{ mA}.$$

Kolektorový prúd podľa (10.2) je

$$I_C = \beta \cdot I_B.$$

Teda pre minimálnu hodnotu $\beta = 30$

$$I_{C1} = 30 \cdot 0,016 \text{ mA} = 0,48 \text{ mA}.$$

Úbytok napätia na odpore R_C pri tomto prúde (podľa Ohmovho zákona)

$$U_{RC1} = I_{C1} \cdot R_C = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 1,8 \cdot 10^3 \Omega = 0,86 \text{ V}$$

a príslušné napätie na kolektore podľa (10.3)

$$U_{CE1} = U_N - U_{RC1} = 6 \text{ V} - 0,86 \text{ V} = 5,14 \text{ V},$$

čo je jeho maximálna hodnota. Kolektorový prúd I_{C2} pre maximálnu hodnotu β pri 80°C ($\beta = 140 + 30\% = 182$) podľa (10.2) je

$$I_{C2} = 182 \cdot 0,016 \text{ mA} = 2,91 \text{ mA}.$$

Podobne ako pre I_{C1} vypočítame U_{RC2} a U_{CE2} .

$$U_{RC2} = I_{C2} \cdot R_C = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 1,8 \cdot 10^3 \Omega = 5,24 \text{ V},$$

$$U_{CE2} = U_N - U_{RC2} = 6 \text{ V} - 5,24 \text{ V} = 0,76 \text{ V}, \text{ čo je jeho minimálna hodnota.}$$

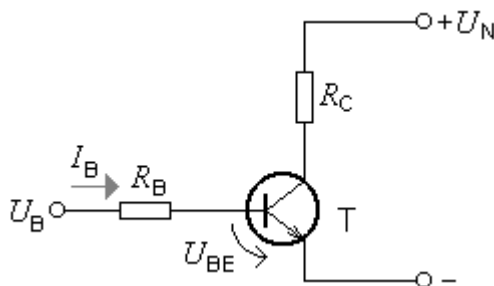
Príklad 10.2.3. Kremíkový tranzistor je zapojený podľa obr. 10.2. Aké napätie U_B musíme pripojiť na odpor R_B , aby tranzistorom tiekol saturačný prúd pre ľubovoľné β z rozmedzia od 35 do 200. $R_B = 22 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2,7 \text{ k}\Omega$, $U_N = 14 \text{ V}$.

Riešenie: Pre saturačný prúd podľa (10.4) platí

$$I_S \doteq \frac{U_N}{R_C} = \frac{14 \text{ V}}{2,7 \cdot 10^3 \Omega} = 5,18 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 5,18 \text{ mA}.$$

Vezmite do úvahy najnepriaznivejší prípad, t. j. keď $\beta = 35$; bázový prúd I_B teda bude

$$I_B = \frac{I_S}{\beta} = \frac{5,18 \text{ mA}}{35} = 0,148 \text{ mA}.$$



Obr. 10.2

Tento báзовý prúd vytvorí na odpore R_B úbytok

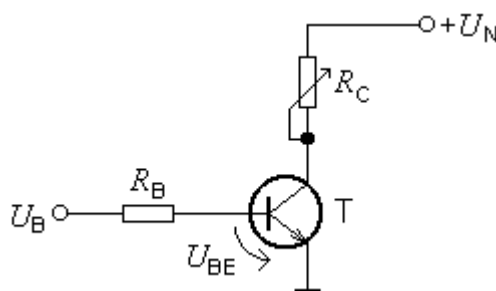
$$U_{RB} = I_B \cdot R_B = 0,148 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega = 3,256 \text{ V} \doteq 3,3 \text{ V}.$$

Keďže ide o kremíkový tranzistor (Si), vieme, že na priechode emitor-báza je napätie $U_{BE} \doteq 0,7 \text{ V}$. Pre napätie U_B podľa Kirchhoffovho zákona

$$U_B = U_{RB} + U_{BE} = 3,3 \text{ V} + 0,7 \text{ V} = 4 \text{ V}.$$

Príklad 10.2.4. Germániový tranzistor NPN vo funkcii bezkontaktného spínača (obr. 10.3) je pripojený na napájací zdroj $U_N = 10 \text{ V}$, vo vstupnom obvode má zapojený odpor $R_B = 10 \text{ k}\Omega$ a v obvode kolektora má zaradený zaťažovací odpor $R_C = 1,5 \text{ k}\Omega$ s možnosťou jeho regulácie. Pre daný tranzistor má činiteľ zosilnenia hodnoty od $\beta_{\min} = 50$ do $\beta_{\max} = 200$.

- Aký musí byť odpor v obvode kolektora R_C , aby napätie na výstupe U_{CE} v stave uzavretia tranzistora nekleslo na menej ako 9 V ? (V stave uzavretia podľa katalógu výrobcu tečie tranzistorom zvyškový prúd $I_{CE0} = 1 \text{ mA}$).
- Určte napätie U_B na vstupe, aby tento tranzistor zopol, teda dostal sa do stavu nasýtenia. (V stave nasýtenia podľa katalógu výrobcu je $U_{BE} = 0,3 \text{ V}$).



Obr. 10.3

Riešenie: a) Musíme zabezpečiť, aby pri napájacom napätí 10 V nebolo napätie v stave uzavretia tranzistora menšie ako $U_{CE} = 9 \text{ V}$ pri prúde $I_{CE0} = 1 \text{ mA}$. Tento prúd vyvolá na odpore R_C úbytok napätia, ktorý nemôže byť väčší ako

$$\Delta U_{RC} = U_N - U_{CE} = 10 \text{ V} - 9 \text{ V} = 1 \text{ V}.$$

Potom hodnota odporu, ktorú musíme zapojiť do obvodu kolektora vypočítame z Ohmovho zákona

$$\Delta U_{RC} = R_C \cdot I_{CE0} \quad \Rightarrow \quad R_C = \frac{\Delta U_{RC}}{I_{CE0}} = \frac{1 \text{ V}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ mA}} = 1 \cdot 10^3 \Omega = 1 \text{ k}\Omega.$$

Keď teda nastavíme potenciometer vo výstupe tranzistora na hodnotu $1 \text{ k}\Omega$, cez tranzistor preteká prúd 1 mA , je uzavretý a nespína.

b) Pre uvedenie do vodivého stavu budeme najskôr uvažovať stav najnepriaznivejší, teda keď má tranzistor minimálne zosilnenie $\beta_{\min} = 50$. Vo vodivom – saturačnom stave platí, že na tranzistore je úbytok napätia zanedbateľne malý a že prúd cez kolektor tranzistora závisí takmer len od napájacieho napätia U_N (nezávisí od bázového prúdu)

$$I_C \doteq \frac{U_N}{R_C} = \frac{10 \text{ V}}{1 \cdot 10^3 \Omega} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 10 \text{ mA}.$$

Z činiteľa prúdového zosilnenia dokážeme vypočítať bázový prúd

$$\beta_{\min} = \frac{I_C}{I_B} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{I_C}{\beta_{\min}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{50} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 0,2 \text{ mA}.$$

Aby tranzistor zopol, musí byť na vstupe napätie (podľa Kirchhoffovho zákona)

$$U_B = U_{RB} + U_{BE} = I_B \cdot R_B + U_{BE} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega + 0,3 \text{ V} = 2,3 \text{ V}.$$

Pri najpriaznivejšom prípade, teda keď uvažujeme maximálne zosilnenie tranzistora $\beta_{\max} = 200$ potrebujeme pripojiť na bázu (vstup tranzistora) napätie U_B , ktoré vypočítame nasledovne

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{\max}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{200} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 0,05 \text{ mA},$$

$$U_B = U_{RB} + U_{BE} = I_B \cdot R_B + U_{BE} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega + 0,3 \text{ V} = 0,8 \text{ V}.$$

Čiže, ak tranzistor zosilňuje dokonale (pri β_{\max}), stačí, ak na bázu pripojíme napätie 0,8 V. Vtedy tranzistor zopne a preteká ním na výstupe prúd $I_C = 10 \text{ mA}$.

Príklad 10.2.5. Tranzistorový zosilňovač má vstupnú impedanciu $Z_{\text{vst}} = 700 \Omega$, výstupnú impedanciu $Z_{\text{výst}} = 1000 \Omega$, napäťové zosilnenie pri nezaťaženom výstupe $A_{u0} = 20$. Na vstup zosilňovača je pripojený RC-generátor s vnútorným odporom $R_g = 300 \Omega$ a napätím naprázdno $u_0 = 10 \text{ mV}$. Aké je napätie na výstupe zosilňovača, ak je naň pripojený zaťažovací odpor $R_z = 500 \Omega$ (obr. 10.4) ?

Riešenie: Vo vstupnom obvode tečie prúd

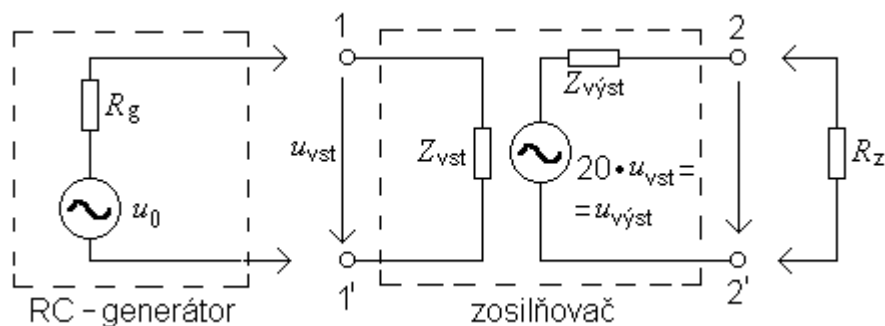
$$i_{\text{vst}} = \frac{u_0}{R_g + Z_{\text{vst}}} \quad (\text{čo vyplýva z Ohmovho zákona})$$

a tento prúd vytvorí na impedancii Z_{vst} vstupné napätie

$$u_{\text{vst}} = i_{\text{vst}} \cdot Z_{\text{vst}} = \frac{u_0}{R_g + Z_{\text{vst}}} \cdot Z_{\text{vst}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{300 \Omega + 700 \Omega} \cdot 700 \Omega = 0,007 \text{ V} = 7 \text{ mV}.$$

Na výstupe zosilňovača, ak nie je pripojený zaťažovací odpor, je napätie

$$u_{\text{výst } 0} = A_u \cdot u_{\text{vst}} = 20 \cdot 7 \text{ mV} = 140 \text{ mV}$$



Obr. 10.4

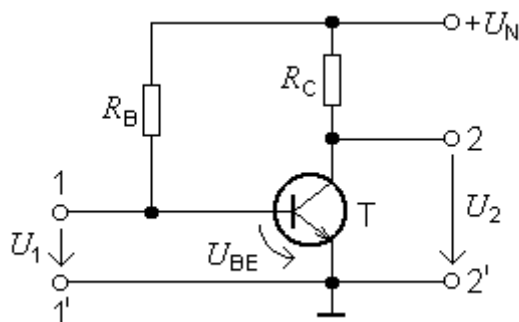
a toto napätie pretlačí do odporu R_z (po jeho pripojení)

$$i_{\text{výst}} = u_{\text{výst } 0} \cdot \frac{1}{Z_{\text{výst}} + R_z}.$$

Na odpore R_z prúd $i_{\text{výst}}$ vytvorí napätie $u_{\text{výst}} = i_{\text{výst}} \cdot R_z$ a po dosadení

$$u_{\text{výst}} = u_{\text{výst } 0} \cdot \frac{1}{Z_{\text{výst}} + R_z} \cdot R_z = 140 \text{ mV} \cdot \frac{1}{1000 \Omega + 500 \Omega} \cdot 500 \Omega = 0,0467 \text{ V} = 46,7 \text{ mV}.$$

Príklad 10.2.6. Majme zosilňovač podľa obr. 10.5 osadený kremíkovým tranzistorom, pričom $\beta = 80$, $U_N = 10 \text{ V}$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$. Určte hodnotu R_B , ak $U_{CE} = 5 \text{ V}$ a ďalej hodnoty Z_{vst} , $Z_{\text{výst}}$ a A_u .



Obr. 10.5

Riešenie: Zo vzťahu (10.3) vyplýva, že

$$U_{RC} = U_N - U_{CE} = 10 \text{ V} - 5 \text{ V} = 5 \text{ V}.$$

Z Ohmovho zákona vyplýva

$$I_C = \frac{U_{RC}}{R_C} = \frac{5 \text{ V}}{1 \cdot 10^3 \Omega} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 5 \text{ mA}.$$

Do bázy tečie prúd I_B , ktorý, ako vyplýva zo vzťahu (10.3), je β -krát menší ako I_C , teda

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \text{ mA}}{80} = 0,0625 \text{ mA}.$$

Z Kirchhoffovho zákona dostaneme vzťah pre napätie U_{RB} na odpore R_B

$$U_{RB} = U_N - U_{BE} = 10 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 9,3 \text{ V}$$

(pri Si tranzistore uvažujeme $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$) a pre odpor R_B platí

$$R_B = \frac{U_{RB}}{I_B} = \frac{9,3 \text{ V}}{0,0625 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 1,488 \cdot 10^5 \Omega = 148,8 \text{ k}\Omega.$$

Dynamický odpor emitora dostaneme z približného empirického vzťahu

$$r_e \doteq \frac{0,03}{I_C} = \frac{0,03}{5 \cdot 10^{-3}} = 6 \Omega.$$

Vypočítame ešte vstupnú impedanciu podľa (10.5)

$$Z_{vst} = \beta \cdot r_e = 80 \cdot 6 \Omega = 480 \Omega$$

a výstupná impedancia sa približne rovná odporu v kolektorovom obvode, čiže podľa (10.6)

$$Z_{výst} \doteq R_C \Rightarrow Z_{výst} \doteq 1\,000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega.$$

Napäťové zosilnenie A_u môžeme počítať zo vzťahu (10.7)

$$A_u = \frac{R_C \parallel R_z}{r_e},$$

kde \parallel je označenie paralelnej kombinácie odporov R_C a R_z a ich výsledný odpor sa vypočíta zo vzťahu

$$R_p = \frac{R_C \cdot R_z}{R_C + R_z}.$$

Keďže však R_z nie je pripojený

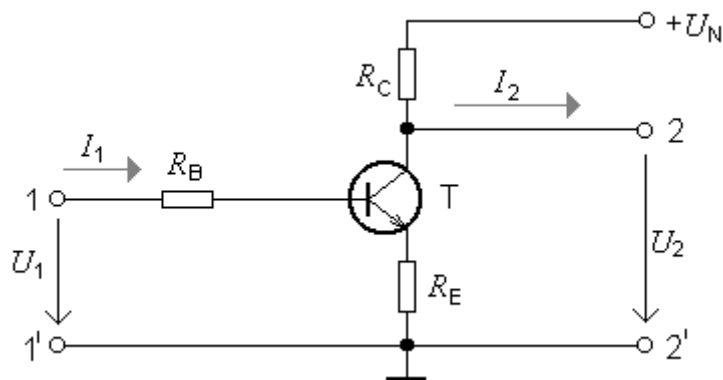
$$A_u = \frac{R_C}{r_e} = \frac{1000 \Omega}{6 \Omega} = 166,66 \doteq 167.$$

Príklad 10.2.7. Máme jednosmerný tranzistorový zosilňovač (obr. 10.6) v zapojení so spoločným emitorom (SE). Vypočítajte:

- hodnoty odporov zosilňovača na vstupe R_B a na výstupe R_C pri zanedbaní úbytkov napätia na polovodičových prechodoch germániového tranzistora ($U_{BE} \doteq 0$ a $U_{CE} \doteq 0$),
- napäťové A_u , prúdové A_i a výkonové zosilnenie A_p zosilňovača, ak sme meraním zistili, že vstupný prúd $I_1 = 5 \text{ mA}$, vstupné napätie $U_1 = 5 \text{ V}$, výstupný prúd $I_2 = 150 \text{ mA}$ a výstupné napätie $U_2 = 10 \text{ V}$.

Riešenie: a) Vstupný a výstupný odpor zosilňovača vypočítame z Ohmovho zákona

$$R_B \doteq \frac{U_1}{I_1} = \frac{5 \text{ V}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 1 \cdot 10^3 \Omega = 1 \text{ k}\Omega,$$



Obr. 10.6

$$R_C \doteq \frac{U_2}{I_2} = \frac{10 \text{ V}}{150 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 66,66 \, \Omega \doteq 66,7 \, \Omega.$$

b) Napät'ové, prúdové a výkonové zosilnenie zosilňovača vypočítame

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{10 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 2,$$

tzn., že náš zosilňovač zosilňuje napätie 2-krát.

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{0,15 \text{ A}}{0,005 \text{ A}} = 30,$$

tzn., že náš zosilňovač zosilňuje prúd 30-krát.

$$P_{\text{výst}} = P_2 = U_2 \cdot I_2 = 10 \text{ V} \cdot 0,15 \text{ A} = 1,5 \text{ W},$$

$$P_{\text{vst}} = P_1 = U_1 \cdot I_1 = 5 \text{ V} \cdot 0,005 \text{ A} = 0,025 \text{ W} = 25 \text{ mW},$$

$$A_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1,5 \text{ W}}{0,025 \text{ W}} = 60,$$

tzn., že náš zosilňovač zosilňuje výkon 60-krát.

Príklad 10.2.8. Na vstup zosilňovača je privádzaný výkon $P_1 = 2,5 \text{ mW}$, na výstupe je výkon $P_2 = 7,15 \text{ W}$. Aký je výkonový zisk v dB?

Riešenie: Pre výpočet zisku zosilňovača pri daných výkonoch platí:

$$a_p = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log \frac{7,15 \text{ W}}{0,0025 \text{ W}} = 10 \cdot \log 2860 = 10 \cdot 3,456 = 34,56 \text{ dB}$$

$$\text{alebo } a_p = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot (\log P_2 - \log P_1) = 10 \cdot (\log 7,15 - \log 0,0025) =$$

$$= 10 \cdot [0,854 - (-2,602)] = 10 \cdot 3,456 = 34,56 \text{ dB}.$$

Príklad 10.2.9. Na vstup zosilňovača privádzame napätie $U_1 = 50 \text{ mV}$. Aký je napät'ový zisk v decibeloch a neproch, ak na výstupe zosilňovača nameriame napätie $U_2 = 1 \text{ V}$?

Riešenie:

$$a_u [\text{Np}] = \ln \frac{U_2}{U_1} = \ln \frac{1 \text{ V}}{0,05 \text{ V}} = \ln 20 = 2,995 73 \doteq 3 \text{ Np},$$

$$a_u [\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log \frac{1 \text{ V}}{0,05 \text{ V}} = 20 \cdot \log 20 = 20 \cdot 1,301 = 26,02 \text{ dB} \doteq 26 \text{ dB}.$$

Prevod dB na Np a naopak: $1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$; $1 \text{ Np} = 8,695 \text{ dB}$.

Pre náš príklad môžeme písať

$$26,02 \cdot 0,115 \text{ Np} = 2,992 3 \text{ Np} \doteq 3 \text{ Np},$$

$$2,995 73 \cdot 8,695 \text{ dB} = 26,04 \text{ dB} \doteq 26 \text{ dB}.$$

Príklad 10.2.10. Vypočítajte zosilnenie výkonu A_p pri použití tranzistora so vstupným odporom $R_{\text{vst}} = 20 \Omega$, ak zaťažovací odpor $R_z = 20 \text{ k}\Omega$ a zosilnenie prúdu $A_i = 0,95$.

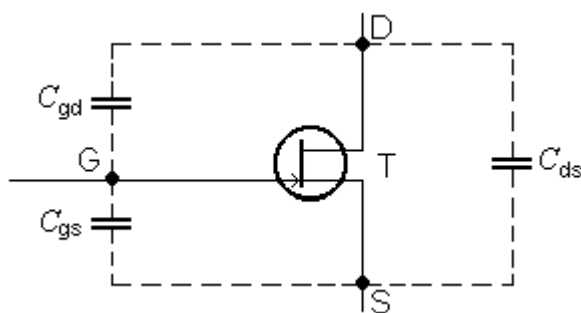
Riešenie: Pre výpočet zosilnenia výkonu platí

$$A_p = A_u \cdot A_i = R_v \cdot A_i \cdot A_i = \frac{R_z}{R_{\text{vst}}} \cdot A_i^2 = \frac{20 \cdot 10^3 \Omega}{20 \Omega} \cdot 0,95^2 = 1000 \cdot 0,902 5 = 902,5.$$

Príklad 10.2.11. Unipolárny tranzistor pracujúci v kvázilineárnom zosilňovači v zapojení so spoločným emitorom (SD) má v určitom pracovnom bode nasledujúce medzielektrodové kapacity (obr. 10.7): $C_{\text{gs}} = 5 \text{ pF}$, $C_{\text{ds}} = 2 \text{ pF}$, $C_{\text{gd}} = 0,2 \text{ pF}$. Aká je reaktančná zložka vstupnej impedancie zosilňovača pre frekvenciu vstupného harmonického signálu $f = 1 \text{ MHz}$, ak v pracovnom bode je strmosť tranzistora $S = 10 \text{ mA/V}$ a zaťažovací rezistor má odpor $R = 5 \text{ k}\Omega$ (výstupný odpor tranzistora považujte za nekonečne veľký)?

Riešenie: Reaktančná zložka vstupnej impedancie zosilňovača je spôsobená jeho vstupnou kapacitou C_i , pre ktorú platí (Millerov jav)

$$C_i = C_{\text{gs}} + (1 + |A_u|) \cdot C_{\text{gd}},$$



Obr. 10.7

kde $A_u = -S \cdot R = -10 \cdot 10^{-3} \text{ A/V} \cdot 5 \cdot 10^3 \Omega = -50$.

Po dosadení do vzťahu pre vstupnú kapacitu C_i dostaneme

$$C_i = C_{gs} + (1 + |A_u|) \cdot C_{gd} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ F} + (1 + 50) \cdot 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 15,2 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 15,2 \text{ pF}.$$

Pre reaktančnú zložku vstupnej impedancie potom platí

$$X_i = \frac{1}{\omega \cdot C_i} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot 15,2 \cdot 10^{-12} \text{ F}} = \frac{1}{9,55 \cdot 10^{-5}} = 10\,471,2 \Omega \doteq 10,5 \text{ k}\Omega.$$

Príklad 10.2.12. Vypočítajte napäťové zosilnenie A_u , prúdové zosilnenie A_i , vstupný odpor R_{vst} a výstupný odpor $R_{výst}$ kvázilineárneho zosilňovača v zapojení so spoločnou bázou SB (obr. 10.8), ak admitančné parametre uvažovaného tranzistora v zapojení so spoločným emitorom (SE) pri $U_{CE} = U_{CEP}$, $I_C = I_{CP}$ a frekvencii rovnkej frekvencii ω vstupného harmonického signálu zosilňovača sú: $y_{11e} = 1 \text{ mS}$, $y_{12e} = -0,4 \mu\text{S}$, $y_{21e} = 50 \text{ mS}$, $y_{22e} = 25 \mu\text{S}$, kde U_{CE} , resp. I_C je jednosmerné napätie na priechode kolektor – emitor, resp. jednosmerný kolektorový prúd, pri ktorom sú uvedené parametre merané U_{CEP} , resp. I_{CP} je jednosmerné napätie, resp. prúd v pracovnom bode podľa obr. 10.8. Ďalej predpokladáme, že C_v , C_b a C_n predstavujú pre frekvenciu ω prakticky krátke spojenie (skrat).

Poznámka: U_{n0} a R_n predstavujú prvky náhradného zapojenia zdroja jednosmerného napájacieho napätia a C_n blokovací kondenzátor tohto zdroja. $R_z = 1,2 \text{ k}\Omega$, $R_g = 600 \Omega$ a $R_e = 1 \text{ k}\Omega$.

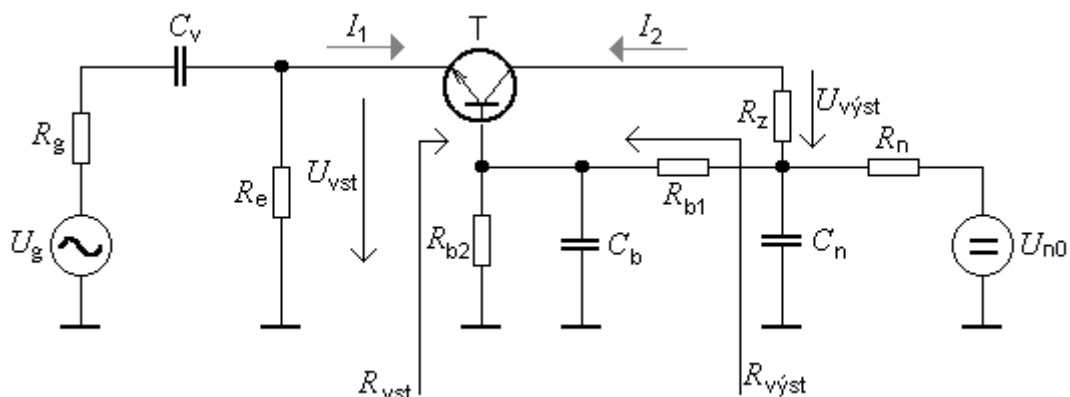
Riešenie: Najprv prepočítame uvedené parametre tranzistora v zapojení SE na vhodné štvorpólové parametre v zapojení SB (v našom prípade znovu na y – parametre).

$$y_{11b} = \sum y_e = y_{11e} + y_{12e} + y_{21e} + y_{22e} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ S} - 0,000\,4 \cdot 10^{-3} + 50 \cdot 10^{-3} \text{ S} + 0,025 \cdot 10^{-3} \text{ S} =$$

$$= 51,024\,6 \cdot 10^{-3} \text{ S} \doteq 51 \text{ mS}$$

$$y_{12b} = -(y_{12e} + y_{22e}) = -(-0,4 \cdot 10^{-6} \text{ S} + 25 \cdot 10^{-6} \text{ S}) = -24,6 \cdot 10^{-6} \text{ S} = -24,6 \mu\text{S}$$

$$y_{21b} = -(y_{21e} + y_{22e}) = -(50 \cdot 10^{-3} \text{ S} + 0,025 \cdot 10^{-3} \text{ S}) = -50,025 \cdot 10^{-3} \text{ S} \doteq -50 \text{ mS}$$



Obr. 10.8

$$y_{22b} = y_{22e} = 25 \mu\text{S}.$$

Ďalej vypočítame R_{vst} , $R_{výst}$, A_u a A_i nasledovne:

$$R_{vst} = \frac{1 + y_{22b} R_z}{y_{11b} + \Delta y_b R_z} = \frac{1 + 25 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \Omega}{51 \cdot 10^{-3} \text{ S} + 45 \cdot 10^{-9} \text{ S}^2 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \Omega} = \frac{1 + 0,03}{0,051054 \text{ S}} = 20,17 \Omega,$$

$$\text{kde } \Delta y_b = y_{11b} \cdot y_{22b} + y_{12b} \cdot y_{21b} = 51 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot 25 \cdot 10^{-6} \text{ S} - 24,6 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ S} = \\ = 1,275 \cdot 10^{-6} \text{ S}^2 - 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ S}^2 = 45 \cdot 10^{-9} \text{ S}^2$$

$$R_{výst} = \frac{1 + y_{11b} R'_g}{y_{22b} + \Delta y_b R'_g} = \frac{1 + 51 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot 375 \Omega}{25 \cdot 10^{-6} \text{ S} + 45 \cdot 10^{-9} \text{ S}^2 \cdot 375 \Omega} = \frac{1 + 19,125}{4,1875 \cdot 10^{-5} \text{ S}} = 480597 \Omega = \\ = 480,6 \text{ k}\Omega,$$

$$\text{kde } R'_g = \frac{R_e \cdot R_g}{R_e + R_g} = \frac{1000 \Omega \cdot 600 \Omega}{1000 \Omega + 600 \Omega} = \frac{6 \cdot 10^5 \Omega^2}{1,6 \cdot 10^3 \Omega} = 375 \Omega$$

$$A_u = \frac{U_{výst}}{U_{vst}} = - \frac{y_{21b} \cdot R_z}{1 + y_{22b} \cdot R_z} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot 1200 \Omega}{1 + 25 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot 1200 \Omega} = \frac{60}{1 + 0,03} = 58,25$$

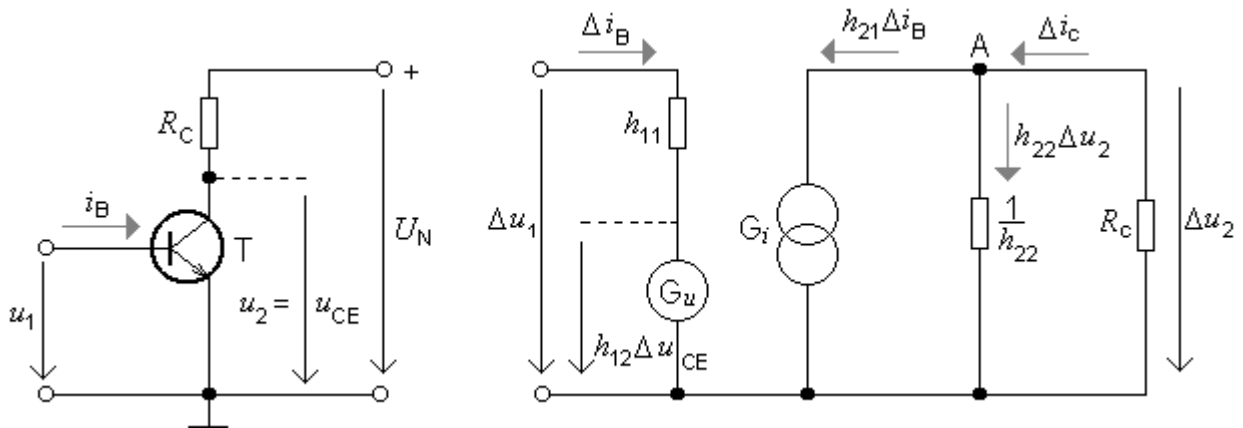
$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{y_{21b}}{y_{11b} + \Delta y_b \cdot R_z} = - \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ S}}{51 \cdot 10^{-3} \text{ S} + 45 \cdot 10^{-9} \text{ S}^2 \cdot 1200 \Omega} = - \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ S}}{51,054 \cdot 10^{-3} \text{ S}} = \\ = - 0,979.$$

Príklad 10.2.13. Pre kremíkový tranzistor NPN, typu KFY 34 v zapojení so spoločným emitorom (obr. 10.9), pomocou parametrov h vypočítajte prúdové zosilnenie A_i a napäťové zosilnenie A_u . Kolektorový odpor $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, napájacie napätie $U_N = 24 \text{ V}$ a h – parametre tranzistora sú: $h_{11} = 510 \Omega$, $h_{12} = 75 \cdot 10^{-6} \doteq 0$, $h_{21} = \beta = 192,5$, $h_{22} = 300 \cdot 10^{-6} \text{ S}$.

Riešenie: Z definície parametrov h

$$u_1 = h_{11} \cdot i_B + h_{12} \cdot u_{CE}$$

$$i_C = h_{21} \cdot i_B + h_{22} \cdot u_{CE},$$



Obr. 10.9

vyplýva pre prírastky náhradný lineárny obvod (obr. 10.9 vpravo). Zdroj napätia predstavuje pre počítané zmeny nulovú impedanciu. Z Kirchhoffovho zákona pre bod „A“ vyplýva

$$\Delta i_C = h_{21} \cdot \Delta i_B + h_{22} \cdot \Delta u_2.$$

Do poslednej rovnice môžeme dosadiť $\Delta u_2 = -R_C \cdot \Delta i_C$, potom

$$\Delta i_C = h_{21} \cdot \Delta i_B - h_{22} \cdot R_C \cdot \Delta i_C,$$

$$\Delta i_C \cdot (1 + h_{22} \cdot R_C) = h_{21} \cdot \Delta i_B \quad \Rightarrow \quad \Delta i_C = \frac{h_{21} \cdot \Delta i_B}{1 + h_{22} \cdot R_C}.$$

Prúdové zosilnenie

$$A_i = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{\frac{h_{21} \cdot \Delta i_B}{1 + h_{22} \cdot R_C}}{\Delta i_B} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot R_C} = \frac{192,5}{1 + 300 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot 1000 \Omega} = \frac{192,5}{1 + 0,3} \doteq 148.$$

Napät'ové zosilnenie

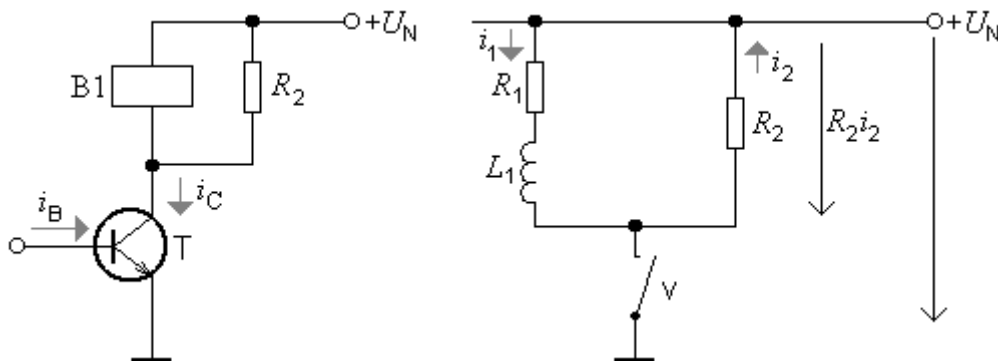
$$A_u = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = \frac{-R_C \cdot \Delta i_C}{h_{11} \cdot \Delta i_B + h_{12} \cdot \Delta u_{CE}},$$

v praxi je možné parameter h_{12} zanedbať, potom

$$A_u = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = \frac{-R_C \cdot \Delta i_C}{h_{11} \cdot \Delta i_B} = -\frac{R_C}{h_{11}} \cdot A_i = -\frac{1000 \Omega}{510 \Omega} \cdot 148 \doteq -290.$$

Príklad 10.2.14. Spínacím tranzistorom T ovládame podľa obr. 10.10 relé B1, ktorého cievka má odpor $R_1 = 500 \Omega$ a indukčnosť $L_1 = 7,5 \text{ H}$. Napájacie napätie $U_N = 10 \text{ V}$. Akú hodnotu musí mať ochranný odpor R_2 zapojený paralelne ku cievke relé B1, aby napätie u_{CE} medzi kolektorom a emitorom pri náhlom uzavretí tranzistora T neprekročilo hodnotu 30 V ?

Riešenie: V náhradnej schéme (obr. 10.10 vpravo) sme nahradili spínací tranzistor vypínačom v. Po jeho rozpojení sa snaží indukčnosť L podľa Lenzovho zákona ďalej udržiavať prechodný prúd v slučke.



Obr. 10.10

Predpokladajme, že odpor R_2 je bezindukčný. Potom bude v prvom okamihu po rozpojení vypínača v, pre $t = 0$

$$i_{10} = I_1 = \frac{U_N}{R_1} = i_{20},$$

$$u_{CE0} = U_N + R_2 \cdot i_{20} = U_N + R_2 \cdot \frac{U_N}{R_1} \Rightarrow R_2 = \left(\frac{u_{CE0}}{U_N} - 1 \right) \cdot R_1.$$

Po dosadení zadanych hodnôt vypočítame hodnotu odporu ochranného rezistora R_2

$$R_2 = \left(\frac{u_{CE0}}{U_N} - 1 \right) \cdot R_1 = \left(\frac{30 \text{ V}}{10 \text{ V}} - 1 \right) \cdot 500 \Omega = 2 \cdot 500 \Omega = 1000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega.$$

Príklad 10.2.15. Odvodte rovnicu priebehu napätia u_{CE} po uzavretí tranzistora T v príklade 10.2.14.

Riešenie: Pre slučku, ktorá je na obr. 10.10 vpravo označená hrubo, platí

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_2) \cdot i_1 = 0.$$

Zavedieme časovú konštantu

$$\tau = \frac{L_1}{R_1 + R_2}$$

a pre hodnoty z príkladu 14 bude časová konštanta

$$\tau = \frac{7,5 \text{ H}}{500 \Omega + 1000 \Omega} = \frac{7,5 \text{ H}}{1500 \Omega} = 0,005 \text{ s} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}.$$

Po zavedení časovej konštanty do prvej rovnice dostaneme

$$\int_{i_{10}}^{i_1} \frac{di_1}{i_1} = - \int_0^t \frac{dt}{\tau},$$

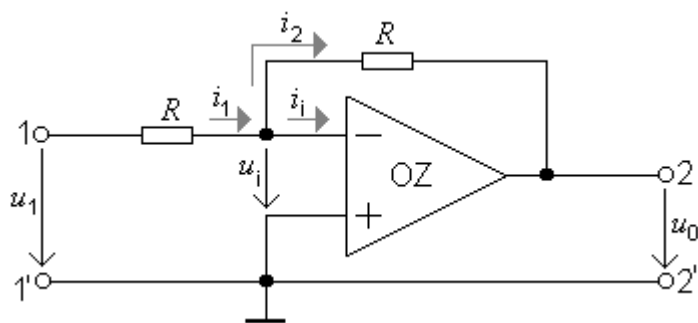
$$i_1 = I_{10} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_N}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$u_{CE} = U_N + R_2 \cdot i_2 = U_N + R_2 \cdot i_1 = U_N \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

pre parametre z príkladu 10.2.14 bude u_{CE}

$$u_{CE} = U_N \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = 10 \cdot \left(1 + \frac{1000}{500} \cdot e^{-\frac{t}{0,005}} \right) = 10 + 20 \cdot e^{-200 t}.$$

Príklad 10.2.16. Vypočítajte napät'ové zosilnenie A_u ideálneho operačného zosilňovača v zapojení na obr. 10.11.



Obr. 10.11

Riešenie: Vstupný odpor ideálneho operačného zosilňovača je nekonečný, teda $i_1 = 0$ a $i_2 = i_1$. Z toho je

$$\frac{u_1 - u_i}{R} = \frac{u_i - u_0}{R}.$$

Pretože ideálny OZ má $A \rightarrow \infty$, je $u_i = 0$ a teda

$$\frac{u_1}{R} = -\frac{u_0}{R} \quad \Rightarrow \quad u_0 = -u_1.$$

Z posledného vzťahu vychádza napäťové zosilnenie zosilňovača

$$A_u = \frac{u_0}{u_1}, \quad \text{ak } u_0 = -u_1, \quad \text{potom } A_u = -1.$$

Napäťové zosilnenie operačného zosilňovača je -1 , zosilňovač sa správa ako invertor, tzn., že obracia fázú vstupného napätia.

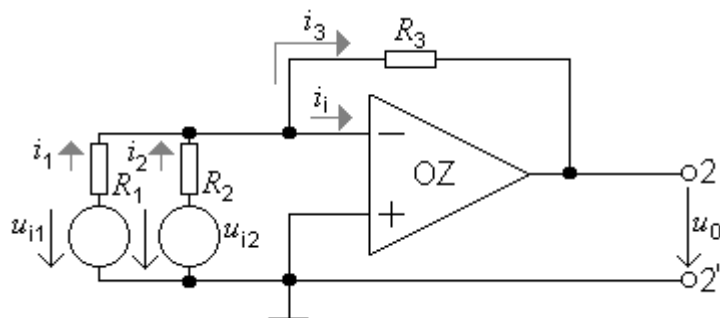
Príklad 10.2.17. Vypočítajte výstupné napätie obvodu na obr. 10.12. Uvažujte ideálny OZ.

Riešenie: Pre ideálny OZ je $i_i = 0$, platí

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad i_1 + i_2 = i_3.$$

Ďalej platí

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}, \quad i_3 = -\frac{u_0}{R_3}.$$



Obr. 10.12

Po dosadení je

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = -\frac{u_0}{R_3} \quad \Rightarrow \quad \frac{u_0}{R_3} = -\left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2}\right),$$

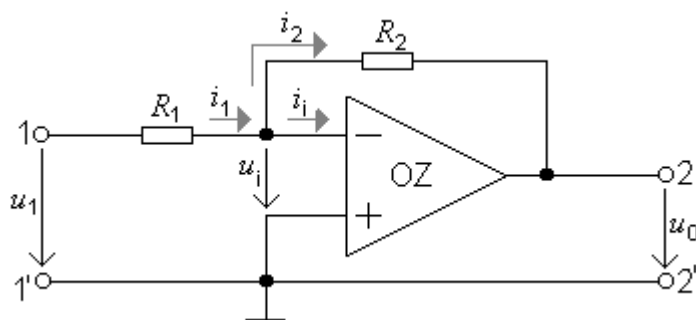
$$u_0 = -\left(\frac{R_3}{R_1}u_{i1} + \frac{R_3}{R_2}u_{i2}\right).$$

Výstupné napätie je lineárnou kombináciou vstupných napätí. Ak bude platiť $R_1 = R_2 = R_3$, bude výstupné napätie dané súčtom vstupných napätí (s obrátenou fázou).

Príklad 10.2.18. Aké je napäťové zosilnenie reálneho operačného zosilňovača v zapojení na obr. 10.13? Zosilnenie $A = 10^5$, vstupný odpor $R_i = 100 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$.

Riešenie: Podľa 1. Kirchhoffovho zákona platí: $i_1 = i_2 + i_i$. Vyjadríme prúdy pomocou napätí:

$$i_1 = \frac{u_1 - u_i}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_i - u_0}{R_2}, \quad i_i = \frac{u_i}{R_i}.$$



Obr. 10.13

Po dosadení je

$$\frac{u_1 - u_i}{R_1} = \frac{u_i - u_0}{R_2} + \frac{u_i}{R_i}.$$

Pretože je zosilňovač zapojený s invertujúcim vstupom

$$A = -\frac{u_0}{u_i} \quad \Rightarrow \quad u_0 = -A \cdot u_i.$$

Po dosadení za $u_i = -\frac{u_0}{A}$

$$\frac{u_1 + \frac{u_0}{A}}{R_1} = \frac{-\frac{u_0}{A} - u_0}{R_2} - \frac{u_0}{AR_i},$$

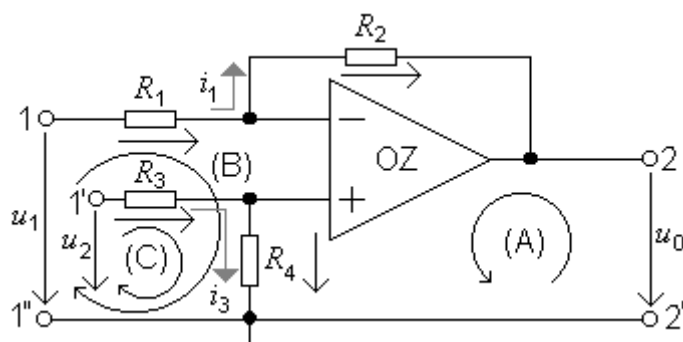
$$u_0 = -\frac{u_1}{R_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{AR_1} + \frac{1}{AR_2} + \frac{1}{AR_i} + \frac{1}{R_2}},$$

$$u_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1 \cdot \frac{A}{A+1+\frac{R_2}{R_1}+\frac{R_2}{R_i}}.$$

Je vidieť, že hodnota zlomku $\frac{A}{A+1+\frac{R_2}{R_1}+\frac{R_2}{R_i}}$ je veľmi blízka jednej.

Potom $u_0 \cong -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1 = -\frac{50 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \cdot u_1 = -5 \cdot u_1.$

Príklad 10.2.19. V zapojení operačného zosilňovača na obr. 10.14 (je použitý ideálny OZ) vypočítajte odpor R_4 , ak je dané: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 30 \text{ k}\Omega$, $u_1 = 1,05 \text{ V}$, $u_2 = 1,25 \text{ V}$, $u_0 = 0,5 \text{ V}$. Vnútorne odpory zdrojov signálu sú nulové a napájanie OZ je symetrické $\pm 15 \text{ V}$.



Obr. 10.14

Riešenie: Podľa II. Kirchhoffovho zákona napíšeme rovnice pre jednotlivé slučky A, B a C:

(A) $u_0 = -R_2 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3,$

$$u_0 = -R_2 \cdot i_1 - R_1 \cdot i_1 + u_1 \Rightarrow i_1 = \frac{u_1 - u_0}{R_1 + R_2} = \frac{1,05 \text{ V} - 0,5 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} = \frac{0,55 \text{ V}}{110 \cdot 10^3 \Omega} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ A},$$

$$u_0 = -R_2 \cdot i_1 - R_3 \cdot i_3 + u_2 \Rightarrow i_3 = \frac{u_2 - u_0 - R_2 \cdot i_1}{R_3} = \frac{1,25 \text{ V} - 0,5 \text{ V} - 100 \cdot 10^3 \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{30 \cdot 10^3 \Omega} =$$

$$= \frac{0,25 \text{ V}}{30 \cdot 10^3 \Omega} = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 8,3 \mu\text{A},$$

(B) $u_1 = R_1 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3,$

(C) $u_2 = R_3 \cdot i_3 + R_4 \cdot i_3.$

Po dosadení prúdov i_1 a i_3 do rovníc (A), (B) a (C) môžeme vypočítať odpor R_4 :

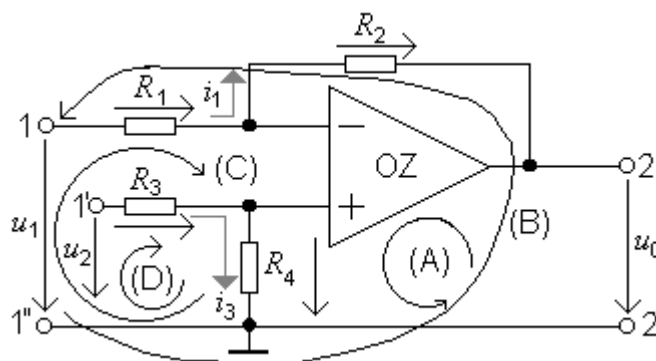
$$(A) \quad u_0 = -R_2 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3 \Rightarrow R_4 = \frac{u_0 + R_2 \cdot i_1}{i_3} = \frac{0,5 \text{ V} + 100 \cdot 10^3 \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{8,3 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 120 \text{ k}\Omega,$$

$$(B) \quad u_1 = R_1 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3 \Rightarrow R_4 = \frac{u_1 - R_1 \cdot i_1}{i_3} = \frac{1,05 \text{ V} - 10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{8,3 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 120 \text{ k}\Omega,$$

$$(C) \quad u_2 = R_3 \cdot i_3 + R_4 \cdot i_3 \Rightarrow R_4 = \frac{u_2 - R_3 \cdot i_3}{i_3} = \frac{1,25 \text{ V} - 30 \cdot 10^3 \Omega \cdot 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{8,3 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 120 \text{ k}\Omega.$$

Príklad 10.2.20. Na obr. 10.15 je zapojenie rozdielového zosilňovača. Dokážte, že pre ideálny OZ platí:

$$u_0 = (u_2 - u_1) \cdot \frac{R_2}{R_1} = (u_2 - u_1) \cdot \frac{R_4}{R_3}, \text{ ak } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}.$$



Obr. 10.15

Riešenie: Podľa II. Kirchhoffovho zákona napíšeme rovnice pre jednotlivé slučky A, B, C a D

$$(A) \quad u_0 = -R_2 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3,$$

$$(B) \quad u_0 = -(R_1 + R_2) \cdot i_1 + u_1,$$

$$(C) \quad u_1 = R_1 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_3,$$

$$(D) \quad u_2 = (R_3 + R_4) \cdot i_3 \Rightarrow i_3 = \frac{u_2}{R_3 + R_4}.$$

Prúd i_3 dosadíme do rovnice (C)

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + R_4 \cdot \frac{u_2}{R_3 + R_4} \Rightarrow i_1 = \frac{u_1}{R_1} - \frac{R_4 \cdot u_2}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)}.$$

Prúd i_1 dosadíme do (B)

$$u_0 = -(R_1 + R_2) \cdot \left[\frac{u_1}{R_1} - \frac{R_4 \cdot u_2}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} \right] + u_1 = u_2 \cdot \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} + u_1 \cdot \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) =$$

$$= u_2 \cdot \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} + u_1 \cdot \left(\frac{R_1 - R_1 - R_2}{R_1} \right) = u_2 \cdot \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} - u_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}. \quad (\text{E})$$

$$\text{Ak } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} = \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 R_4 \cdot \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right)} = \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right)} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1},$$

po dosadení do (E)

$$u_0 = u_2 \cdot \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot (R_3 + R_4)} - u_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = u_2 \cdot \frac{R_2}{R_1} - u_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = (u_2 - u_1) \cdot \frac{R_2}{R_1} = (u_2 - u_1) \cdot \frac{R_4}{R_3}.$$

Príklad 10.2.21. Aký veľký je anódový prúd I_a elektrónky, ktorej zosilňovací činiteľ $\mu = 30$, strmosť $S = 3 \text{ mA/V}$, ohmický odpor v anódovom obvode $R_a = 10 \text{ k}\Omega$ a striedavé napätie na prvej mriežke $U_{g1} = 2 \text{ V}$?

Riešenie: Vnútny odpor vypočítame

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{30}{0,003 \text{ A/V}} = 10\,000 \, \Omega = 10 \text{ k}\Omega.$$

Pre výpočet anódového prúdu z daných veličín platí

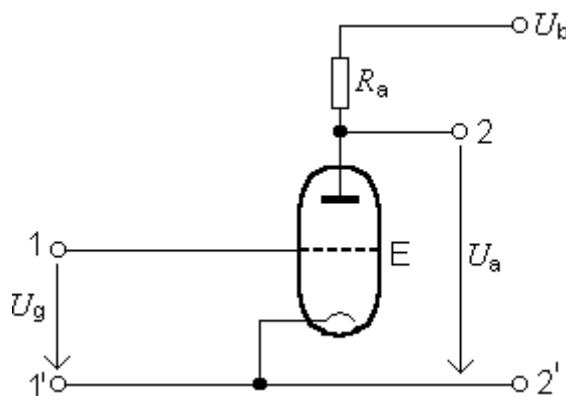
$$I_a = U_{g1} \cdot \mu \cdot \frac{1}{R_i + R_a},$$

$$I_a = U_{g1} \cdot \mu \cdot \frac{1}{R_i + R_a} = 2 \text{ V} \cdot 30 \cdot \frac{1}{10^4 + 10^4} = \frac{60 \text{ V}}{2 \cdot 10^4 \, \Omega} = 0,003 \text{ A} = 3 \text{ mA}.$$

Príklad 10.2.22. Aké je zosilnenie zosilňovacieho stupňa podľa schémy na obr. 10.16, ak vnútorný odpor zosilňovacej triódy $R_i = 11,2 \text{ k}\Omega$, strmosť $S = 2,7 \text{ mA/V}$ a zaťažovací odpor $R_a = 2 \cdot 10^4 \, \Omega$? Vypočítajte dynamickú strmosť triódy.

Riešenie: Zosilňovací činiteľ elektrónky

$$\mu = S \cdot R_i = 0,0027 \text{ A/V} \cdot 11\,200 \, \Omega = 30,24 \approx 30.$$



Obr. 10.16

Pre výpočet zosilnenia platí vzťah:

$$A = \mu \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a} = 30 \cdot \frac{2 \cdot 10^4 \Omega}{11,2 \cdot 10^3 \Omega + 2 \cdot 10^4 \Omega} = \frac{6 \cdot 10^5 \Omega}{0,312 \cdot 10^5 \Omega} = 19,23.$$

Dynamická strmosť elektrónky

$$S_D = -\frac{A}{R_a} \quad \text{alebo}$$

$$\begin{aligned} S_D &= S \cdot \frac{R_i}{R_i + R_a} = 2,7 \text{ mA/V} \cdot \frac{11,2 \cdot 10^3 \Omega}{11,2 \cdot 10^3 \Omega + 2 \cdot 10^4 \Omega} = \\ &= 2,7 \text{ mA/V} \cdot 0,359 = 0,969 \text{ mA/V} \doteq 0,97 \text{ mA/V}. \end{aligned}$$

Príklad 10.2.23. Akú strmosť S a vnútorný odpor R_i má elektrónka ECC83, ak zmena anódového prúdu $\Delta I_a = 0,8 \text{ mA}$, zmena mriežkového predpätia $\Delta U_g = 0,4 \text{ V}$ a prienik $D = 2,5 \%$ (0,025)?

Riešenie: Strmosť elektrónky vypočítame

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{0,8 \text{ mA}}{0,4 \text{ V}} = 2 \text{ mA/V} \quad \left(D = \frac{1}{\mu} \right).$$

Závislosť strmosti, vnútorného odporu a prieniku elektrónky vyjadruje Barkhausenova rovnica $S \cdot R_i \cdot D = 1$. Z tejto rovnice vyjadríme R_i

$$R_i = \frac{1}{S \cdot D} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A/V} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-5} \text{ A/V}} = 20\,000 \Omega = 20 \text{ k}\Omega.$$

10.3 ÚLOHY NA SAMOSTATNÉ RIEŠENIE

Úloha 10.3.1. Kremíkový tranzistor je zapojený podľa obr. 10.1, pričom $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $U_N = 4 \text{ V}$, $\beta = 90$. Aké bude napätie U_{CE} medzi kolektorom a emitorom a bázový prúd I_B ? Pri tomto tranzistore uvažujte $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$.

($U_{CE} = 0,94 \text{ V}$; $I_B = 34 \mu\text{A}$)

Úloha 10.3.2. Aký musí byť bázový prúd, aby tranzistorom s $\beta = 100$, $U_N = 10 \text{ V}$, $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$ tiekol saturačný prúd.

($I_B = 21,3 \mu\text{A}$)

Úloha 10.3.3. Tranzistor na obr. 10.1 má prúdové zosilnenie nakrátko $\beta = 150$, pri kolektorovom prúde $I_C = 2 \text{ mA}$. Napájacie napätie $U_N = 12 \text{ V}$. Odpor v obvode kolektora $R_C = 5 \text{ k}\Omega$ a napätie na ňom $U_{RC} = 10 \text{ V}$. Za predpokladu lineárneho vzťahu medzi I_B a I_C

a $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ vypočítajte hodnotu R_B .

($R_B = 847,5 \text{ k}\Omega$; zvolíme normalizovaný odpor $820 \text{ k}\Omega$)

Úloha 10.3.4. Kremíkový tranzistor zapojený podľa obr. 10.1 má napájacie napätie $U_N = 6 \text{ V}$, $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$, $R_B = 330 \text{ k}\Omega$, $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ a $\beta = 140$. Vypočítajte U_{CE} .

($U_{CE} = 1,97 \text{ V}$)

Úloha 10.3.5. Aká má byť najnižšia hodnota R_C , aby kremíkovým tranzistorom (obr. 10.2) s $\beta = 35$, $R_B = 22 \text{ k}\Omega$, $U_N = 14 \text{ V}$ tiekol saturačný prúd pri $U_B = 6 \text{ V}$? (Pri tranzistore predpokladajte $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$.)

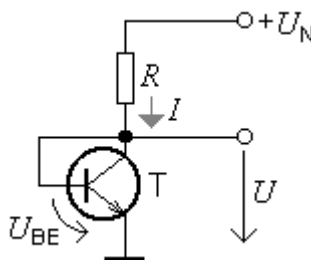
($R_C = 1,66 \text{ k}\Omega$)

Úloha 10.3.6. Kremíkový tranzistor KF 125 na obr. 10.2 má pokojovú polohu pracovného bodu pri hodnotách $U_N = 12 \text{ V}$, $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $U_B = 1 \text{ V}$, $I_C = 10 \text{ mA}$, $\beta = 90$, $U_{BE} \doteq 0,6 \text{ V}$. Vypočítajte I_B , R_B a R_C .

($I_B = 0,111 \text{ mA}$; $R_B = 3,6 \text{ k}\Omega$; $R_C = 200 \Omega$)

Úloha 10.3.7. V zapojení na obr. 10.17 určte hodnotu prúdu I a napätia U . Je dané: $U_N = 9 \text{ V}$, $R = 2 \text{ k}\Omega$ a spád napätia medzi bázou a emitorom $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

($I = 4,15 \text{ mA}$; $U = 0,7 \text{ V}$)



Obr. 10.17

Úloha 10.3.8. Majme zosilňovač so vstupnou impedanciou $Z_{vst} = 1,6 \text{ k}\Omega$ a RC-generátor s vnútorným odporom $R_g = 600 \Omega$. Na výstupe RC generátora bolo napätie naprázdno $u_{g0} = 200 \text{ mV}$. Aké bude napätie generátora u_g po pripojení na vstup zosilňovača?

($u_g = 145 \text{ mV}$)

Úloha 10.3.9. Na výstupe nezaťaženeho zosilňovača $Z_{výst} = 900 \Omega$ je napätie $u_{výst 0} = 1,3 \text{ V}$. Aké bude napätie $u_{výst}$, ak na zosilňovač pripojíme zaťažovací odpor $R_z = 600 \Omega$?

($u_{výst} = 0,52 \text{ V}$)

Úloha 10.3.10. Na výstupe zosilňovača nameriame 2 V, ak je zaťažený reproduktorom $16\ \Omega$. Ak k tomuto reproduktoru pripojíme paralelne taký istý reproduktor, výstupné napätia klesne na 1,3 V. Aká je výstupná impedancia zosilňovača? Aké je výstupné napätie nezaťaženého zosilňovača?

$$(Z_{\text{výst}} = 18,6\ \Omega; u_{\text{výst } 0} = 4,32\ \text{V})$$

Úloha 10.3.11. Majme zosilňovač podľa obr. 10.5, $R_B = 68\ \text{k}\Omega$, $R_C = 470\ \Omega$, $U_N = 4,6\ \text{V}$. Kremíkový tranzistor má $\beta = 50$. Vypočítajte U_{CE} , Z_{vst} , A_u , $Z_{\text{výst}}$!

$$(U_{CE} = 3,25\ \text{V}; Z_{\text{vst}} = 523\ \Omega; A_u \doteq 45; Z_{\text{výst}} = 470\ \Omega)$$

Úloha 10.3.12. Na obr. 10.5 je schéma zapojenia tranzistorového zosilňovača. Vypočítajte hodnoty odporov R_B a R_C , ak $U_N = 4,5\ \text{V}$, činiteľ zosilnenia prúdu v zapojení so spoločným emitorom $\beta = 65$, zvolený pracovný bod $I_C = 1\ \text{mA}$, napätie $U_{CE} = 2\ \text{V}$ a zvyškový prúd kolektora $I_Z = 0,2\ \text{mA}$.

$$(R_B = 365,6\ \text{k}\Omega; R_C = 2,5\ \text{k}\Omega)$$

Úloha 10.3.13. Vstupné napätie nízkočfrekvenčného zosilňovača $U_1 = 3,6\ \text{mV}$. Aké je výstupné napätie U_2 pri zosilnení $A = 500$?

$$(U_2 = 1,8\ \text{V})$$

Úloha 10.3.14. Aký prúd I_2 nameriame na výstupe zosilňovača so ziskom $a_i = 20\ \text{dB}$, ak je na vstupe prúd $I_1 = 1\ \text{mA}$?

$$(I_2 = 0,01\ \text{A} = 10\ \text{mA})$$

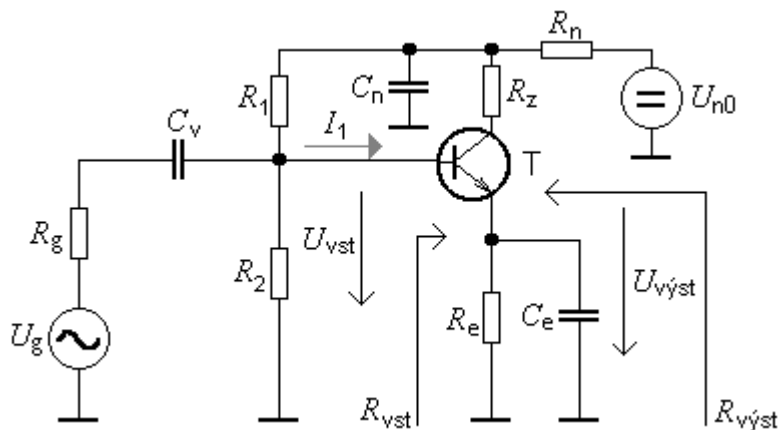
Úloha 10.3.15. Vypočítajte zosilnenie napätia A_u pri použití tranzistora so vstupným odporom $R_{\text{vst}} = 50\ \Omega$, ak zaťažovací odpor $R_Z = 20\ \text{k}\Omega$ a zosilnenie prúdu $A_i = 0,95$.

$$(A_u = 380)$$

Úloha 10.3.16. Vypočítajte napäťové zosilnenie A_u , prúdové zosilnenie A_i , vstupný odpor R_{vst} a výstupný odpor $R_{\text{výst}}$ kvázilineárneho zosilňovača so spoločným emitorom, ak h – parametre uvažovaného tranzistora v zapojení SE pre pracovný bod podľa obr. 10.18 a frekvenciu ω vstupného harmonického signálu zosilňovača sú: $h_{11e} = 1000\ \Omega$, $h_{12e} = 4 \cdot 10^{-4}$, $h_{21e} = 50$, $h_{22e} = 45 \cdot 10^{-6}\ \text{S}$. Hodnoty odporov sú: $R_g = 600\ \Omega$, $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_Z = 1,2\ \text{k}\Omega$. Ďalej uvažujeme, že C_v , C_n a C_e predstavujú pre frekvenciu ω prakticky krátke spojenie (skrat).

Poznámka: U_{n0} a R_n predstavujú prvky náhradného zapojenia zdroja jednosmerného napájacieho napätia a C_n blokovací kondenzátor tohto zdroja.

($A_u = -58,25$; $A_i = 47,44$; $R_{vst} \doteq 977 \Omega$; $R_{výst} \doteq 31,3 \text{ k}\Omega$)



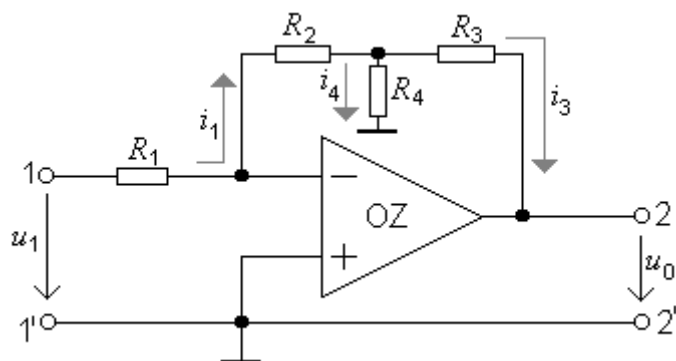
Obr. 10.18

Úloha 10.3.17. Spínací tranzistor T z príkladu 10.2.14 (obr.10.10) má rovnicu priebehu napätia u_{CE} po uzavretí tranzistora: $u_{CE} = 10 + 20 \cdot e^{-200t}$. Za koľko milisekund po rozpojení klesne v príklade 10.2.14 napätie u_{CE} na hodnotu 15 V?

($t = 6,93 \text{ ms} \doteq 7 \text{ ms}$)

Úloha 10.3.18. V zapojení operačného zosilňovača na obr. 10.19 (je použitý ideálny OZ) vypočítajte napätie u_0 , ak je dané: $R_1 = R_4 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 20 \text{ k}\Omega$, $u_1 = 1 \text{ mV}$. Vnútorňý odpor zdroja signálu je nulový a napájanie OZ je symetrické $\pm 15 \text{ V}$.

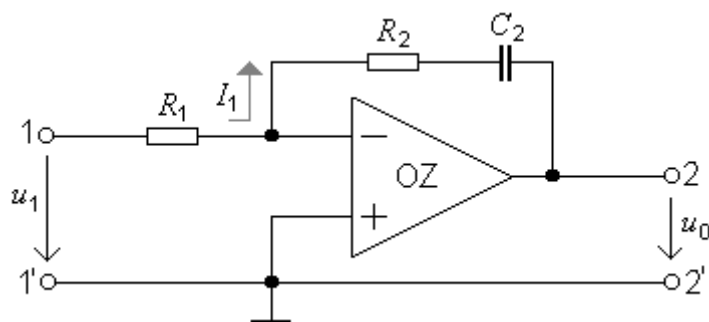
($u_0 = -24 \text{ mV}$)



Obr. 10.19

Úloha 10.3.19. Pre dané zapojenie zosilňovača s OZ typu MAA 741 na obr. 10.20 nakreslite teoretický priebeh amplitúdovo-frekvenčnej charakteristiky a vypočítajte zisk v dB pre frekvencie: $f_1 = 1 \text{ Hz}$, $f_2 = 10 \text{ Hz}$, $f_3 = 50 \text{ Hz}$, $f_4 = 1000 \text{ Hz}$, $f_5 = 2000 \text{ Hz}$. Hodnoty obvodových prvkov sú: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 220 \text{ nF}$. V zapojení je použitý ideálny OZ a vnútorný odpor zdroja signálu je nulový.

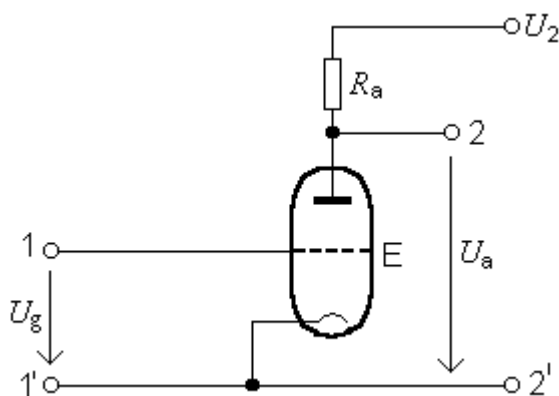
($a_u(1 \text{ Hz}) = 57,19 \text{ dB}$, $a_u(10 \text{ Hz}) = 37,27 \text{ dB}$, $a_u(50 \text{ Hz}) = 24,90 \text{ dB}$, $a_u(1000 \text{ Hz}) = 20,02 \text{ dB}$, $a_u(2000 \text{ Hz}) = 20,005678 \text{ dB}$)



Obr. 10.20

Úloha 10.3.20. Zosilňovací stupeň podľa obr. 10.21 dostáva maximálne napätie $U_g = 1 \text{ V}$. Vypočítajte napätie U_2 a zosilnenie A , ak zaťažovací odpor anódy $R_a = 100 \text{ k}\Omega$, zosilňovací činiteľ $\mu = 100$ a vnútorný odpor elektrónky $R_i = 62,5 \text{ k}\Omega$. Vypočítajte tiež dynamickú strmosť tejto triódy S_D , ktorá má podľa katalógu strmosť $S = 2,9 \text{ mA/V}$.

($U_2 = 61,5 \text{ V}$; $A = 61,5$; $S_D = 1,115 \text{ mA/V}$)



Obr. 10.21