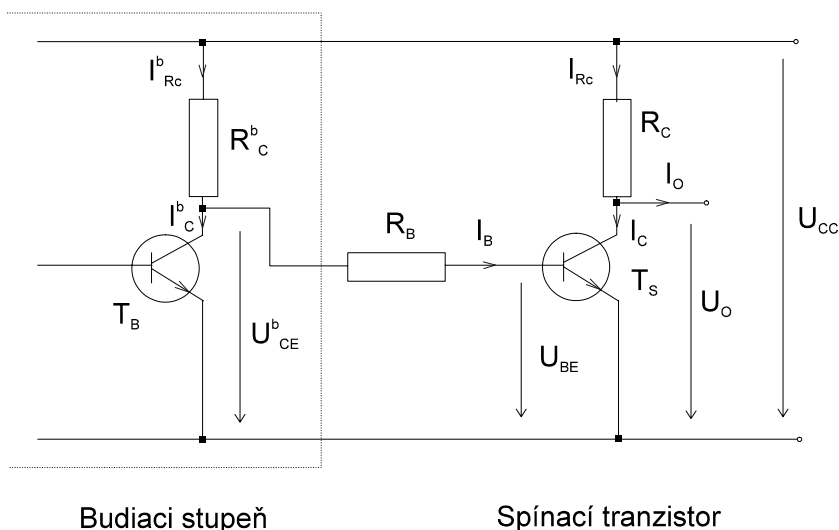


## Téma 7. : Spínací obvod s tranzistorom (S, R).

### Zadanie:

0. Overte svoj návrh jednoduchého nf striedavého zosilňovača triedy A s npn bipolárnym tranzistorom KF506 na predložených pripravkoch. Nastavte navrhnuté hodnoty jednotlivých odporov na príslušných potenciometroch, pripojte záťaž  $R_L$ , jednosmerné napájacie napätie  $U_{CC}=15V$  a na vstup funkčný generátor so sínusovým priebehom s amplitúdou rádovo mV. Amplitúdu vstupného a výstupného signálu odčítajte z osciloskopu, číselne vyjadrite dosiahnuté zosilnenie a porovnajte s teoreticky určenou hodnotou.
1. Navrhnite jednoduchý spínací obvod (odpory  $R_C$ ,  $R_B$ ) s tranzistorom KS500 v zapojení podľa obr. 8.1. pre  $U_{CC} = 15 V$ ,  $I_C = 10 mA$  a  $U_{OH} = 8 V$ , ak použitý tranzistor KS500 má tieto parametre:  $U_{CEmax} = 14 V$ ,  $I_{Cmax} = 250 mA$ ,  $P_{Cmax} = 300 mW$  a  $h_{21e} = 20-50$ .



**Obr. 8.1.** Základné zapojenie tranzistora ako spínača. Smery prúdov zodpovedajú zopnutému tranzistoru

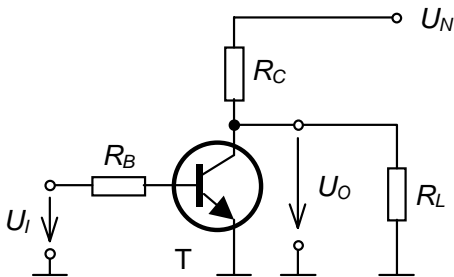
!!!!!! Študijná literatúra: prednášky – časť - Zosilňovací stupeň s tranzistorom v zapojení so spoločným emitorom

# Podklady k realizácii úloh zadania

K bodu 1:

## 1. Spínací obvod s tranzistorom

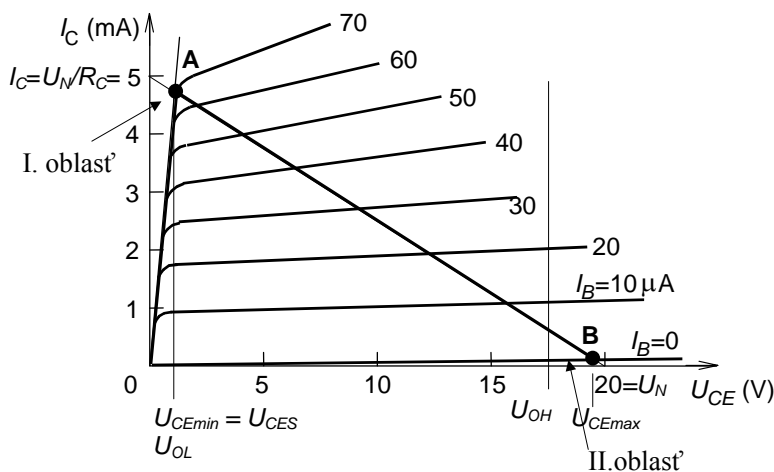
V číslicovej technike sa využíva spínací režim práce tranzistora.



Obr. 8.3 Schéma zapojenia tranzistorového spínača – invertor

Uvažujme bipolárny tranzistor T, zapojený v zapojení so spoločným emitorom Obr. 8.3. Zo vstupu obvodu je vstupné napätie  $U_i$  privádzané na bázu tranzistora cez bázový odpor  $R_B$ . Kolektor je pripojený na kladné napájacie napätie  $U_N$  cez kolektorový odpor  $R_C$ .

Správanie sa tranzistora v obvode najlepšie dokumentuje sieť výstupných charakteristík tranzistora Obr. 10.3. Sieť charakteristík je preložená zaťažovacou priamkou, ktorá je v podstate volt-ampérovou charakteristikou zaťažovacieho odporu  $R_C$  vzťahnutého k napájaciemu napätiu  $U_N$ .



Obr. 8.4. Grafické riešenie

tranzistorového spínača, výstupné charakteristiky tranzistora v zapojení SE sú preložené zaťažovacou priamkou.

Zaťažovacia priamka je vymedzená dvomi bodmi, na napät'ovej osi je to napájacie napätie  $U_N$  a na prúdovej osi hodnota prúdu, ktorý podľa Ohmovo zákona preteká týmto odporom pri napätí napájania

$$I_C = U_N / R_C$$

Reálne možné hodnoty kolektorového prúdu a napätí na výstupe (kolektore) musia byť spoločným riešením pre tranzistorové charakteristiky aj pre odporovú priamku a sú dané priesečníkmi oboch systémov. Všetky možné riešenia tvoria úsečku na zaťažovacej priamke vymedzenú bodmi A a B. Tento postup je zhodný s riešením, ktoré sme rozoberali pri lineárnom zosilňovači signálu malej amplitúdy. Rozdiel je teraz v tom, že pokiaľ sme pri zosilňovači nastavovali pomocné jednosmerné prúdy a napätia približne v strede úsečky AB a signál s relatívne malou amplitúdou sme superponovali na tieto napätia a prúdy, teraz budeme využívať okraje úsečky AB. Tranzistor bude mať dve možnosti, dva stavy: alebo bude mať pomery nastavené na zaťažovacej úsečke v blízkosti bodu A alebo v blízkosti bodu B. Rozhodovať o tom bude veľkosť bázového prúdu  $I_B$ .

Ak bude bázový prúd veľký, v našom príklade  $70 \mu\text{A}$  a viac, potom bude cez kolektor tranzistora pretekať veľký kolektorový prúd

$$I_C = \beta I_B$$

(napr. ak je  $\beta = 80$ , potom  $I_C = 5,6 \text{ mA}$ ) a napätie na kolektore bude malé, rovné saturačnému napätiu tranzistora

$$U_{CE} = U_{CES} = 0,3 \text{ V}$$

V tomto prípade hovoríme, že tranzistor je **zopnutý**, alebo **otvorený**. V prípade, že do bázy tečie malý prúd, napríklad menší ako  $5 \mu\text{A}$ , potom aj kolektorom bude tečieť malý prúd ( $I_C = 0,4 \text{ mA}$ ) a napätie na kolektore sa bude blížiť k napájaciemu napätiu

$$U_{CE} = U_N - R_C I_{C \min}$$

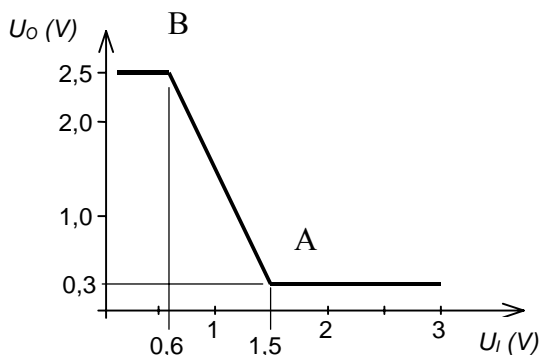
čo v našom prípade bude len o 1,6 V menšie než je napájacie napätie.

Princíp činnosti obvodu na Obr. 8.3 môžeme vysledovať nasledovne. Ak pripojíme na vstup veľké napätie  $U_I$ , (napr. blížiac sa napájaciemu) cez odpor  $R_B$  a bázu tranzistoru T bude pretekať veľký prúd

$$I_I = I_B.$$

Odpor  $R_B$  chráni *pn* prechod tranzistoru báza - emitor pred prúdovým preťažením, nastavuje hodnotu  $I_{I \max}$ . Kolektorom bude tieť  $\beta$ -krát väčší prúd a napätie na kolektore klesne. Výstupné napätie bude minimálne. Ak zmenšíme napätie na vstupe, najlepšie na  $U_I = 0$  V, bázovým odporom ani bázou tranzistora nebude tieť žiaden prúd a aj kolektorový prúd kladne na minimum. Napätie na kolektore a teda na výstupe stúpne na maximálnu hodnotu, blížiacu sa napájaciemu napätiu. Toto napätie prevádza vstupný signál na výstup tak, že ho obracia, t.j. invertuje. Zapojenie sa nazýva **invertor** a jeho prevodová charakteristika je znázornená na obr. 8.5.

Vráťme sa k samotnému zapojeniu a uvažujme, že rovnaké stupne invertorov budú zapojené za sebou. To znamená, že pred vstupom do obvodu bude výstup rovnakého obvodu. Potom z dôvodu zabezpečenia jednoznačného rozlíšenia úrovne H a L nasledujúcim obvodom musia výstupné napätiové úrovne predchádzajúceho obvodu byť zaručene v *intervale prípustných vstupných hodnôt* nasledujúceho stupňa. Hovoríme o *intervaloch zaručených hodnôt výstupného napätia*. Dokonca sa vyžaduje určitá rezerva pre prípad superponovania náhodného, poruchového signálu – šumu na pôvodný signál formou prekrytia uvedených intervalov. Preto máme osobitne definované úrovne L a H pre vstup ( $U_{IL}$ ,  $U_{IH}$ ) a výstup ( $U_{OL}$ ,  $U_{OH}$ ). Rozdiel medzi hranicami L úrovne ( $U_{IL} - U_{OL}$ ) nazývame *šumová imunita L úrovne* a rozdiel medzi hranicami H úrovne ( $U_{OH} - U_{IH}$ ) *šumová imunita H úrovne*.



**Obr. 8.5.** Prevodová charakteristika tranzistorového invertora.

Uvážme teraz skutočné hodnoty napätí na výstupoch a vstupoch.

Pre úroveň H bude výstupné napätie o niečo nižšie ako je napájacie napätie. Zníženie bude rovné úbytku napätia na kolektorovom odpore  $R_C$  a bude závisieť od pretekajúceho prúdu  $I_{RC}$ . Ten je daný súčtom kolektorového prúdu tranzistora  $I_C$  a prúdom tečúcim do výstupu, teda do vstupu nasledujúceho člena  $I_O$ . Je zrejmé, že pokiaľ vstupný odpor nasledujúceho člena bude veľký, resp. vstupný prúd bude malý, napätie v H úrovni na výstupe sa bude blížiť napájaciemu napätiu. Ak bude prúd do výstupu veľký (veľká záťaž) výstupné napätie klesne, ale nesmie klesnúť pod minimálnu úroveň výstupného napätia  $U_{OH}$ . To znamená, že pripojením nadmiernej záťaže môžeme spôsobiť zlepšenie šumovej imunity.

Pri úrovni L bude situácia odlišná. Z princípu činnosti bipolárneho tranzistora vyplýva, že na jeho zopnutie je postačujúce vstupné napätie 0,6 V. Na výstupe v úrovni L máme saturačné napätie tranzistora

$$U_O = U_{CES},$$

čo sú napätia typicky 0,2-0,4 V. To ale znamená, že medzi zaručeným výstupným napätím (0,4 V) a maximálnym prípustným napätím (pri 0,6 V sa tranzistor už otvára) nie je prakticky žiaden rozdiel, teda šumová imunita úrovne L je príliš malá.

## 2. Základné zapojenie tranzistora v spínacom režime doplnené budiacim stupňom.

Najčastejším zapojením tranzistora vo funkcii spínača je zapojenie so spoločným emitorom. Pre bipolárny tranzistor je to schéma na obr. 8.1, doplnená budiacim stupňom.

Funkcia spínača sa dá vysvetliť pomocou výstupných charakteristík  $I_C = f(U_{CE})$  tranzistora (Obr. 8.4):

Otvorenému tranzistoru zodpovedá pracovný bod A v oblasti I. a uzavretému tranzistoru pracovný bod B v oblasti II. (je ohraničená maximálnym napätím  $U_{CE}$ , krivkou  $I_C = 0$  A a výstupnou charakteristikou s  $U_{BE} = 0$  V). Oblasť I. predstavuje režim saturácie (je ohraničená maximálnym prúdom kolektora, maximálnym výkonom a krivkou pre ktorú platí  $U_{CB} = 0$  V), v ktorom sú obidva P-N priechody polarizované priepustne.

V danom zapojení je tento pracovný bod zabezpečený takým napätím  $U_{BE}$ , aby jeho veľkosť bola minimálne  $U_{BES}$  (saturačné napätie medzi emitorom a bázou). Jeho veľkosť možno nájsť pre zvolený typ tranzistora a zvolený kolektorový prúd  $I_C$  v katalógu zo závislosti

$$U_{BES} = f(I_C).$$

Napätie na kolektore tranzistora  $U_{CES}$  sa pohybuje v závislosti od kolektorového prúdu na úrovni desiatí voltu. Uzavretie tranzistora v ideálnom prípade dosiahneme, ak  $U_{BE} = 0$  V. Vtedy napätie

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_{CEO}$$

a vzhľadom na reálne hodnoty zvyškového prúdu  $I_{CEO}$  je na kolektore takmer celé napájacie napätie. Podľa obr. 8.1 nie je však reálne táto podmienka splnená vzhľadom na predchádzajúci budiaci stupeň. Najnižšie napätie výstupu budiaceho stupňa je dané saturačným napätím otvoreného tranzistora, teda  $U_{CES}^b$ . V praxi treba zabezpečiť, aby platila podmienka

$$U_{CES}^b \leq U_{BEoff},$$

kde  $U_{BEoff}$  je maximálne napätie, pre ktoré možno považovať tranzistor za zatvorený (prúd  $I_C$  musí byť dostatočne malý).

Z analýzy obvodu podľa obr. 8.1 vyplýva, že tranzistorový spínač v zapojení SE tvorí, s prihliadnutím na budiaci stupeň, logický člen - prevodník úrovne L (low, nízka) na H (high, vysoká) a naopak. Vstupné veličiny pritom označujeme indexom I (input, vstup) a výstupné indexom O (output, výstup).

Z predchádzajúceho rozboru vyplýva, že pracovný bod sa nemusí nachádzať pre jednotlivé stavy tranzistora výhradne v oblastiach I. a II., ale musí byť zabezpečené, aby výstupné napätie  $U_{CE}$  otvoreného tranzistora neprekročilo napätie  $U_{OL}$  a pri uzavretom tranzistore nesmie byť menšie ako napätie  $U_{OH}$  (obr. 8.5).

## 3. Návrh spínacieho obvodu.

Cieľom návrhu je zabezpečiť prevod jednotlivých úrovní L a H tak, aby platilo:

1. Stav s vysokou úrovňou (uzavretý tranzistor)

$$U_{IL} = U_{BEoff} \quad U_{OH} = \text{vyplýva z požiadaviek na návrh}$$

2. Stav s nízkou úrovňou (otvorený tranzistor)

$$U_{IH} = U_{BES} \quad U_{OL} = U_{CES}$$

Prevodová charakteristika je znázornená na obr. 8.5 s vyznačenými napäťovými úrovňami.

Pri návrhu budeme predpokladať, že budiaci stupeň má rovnaké vlastnosti ako uvažovaný spínací stupeň. Tým sa vlastný návrh redukuje na určenie hodnôt odporov  $R_B$  a  $R_C$ .

Ďalej budeme uvažovať, že spínací tranzistor má tieto medzné hodnoty:

- maximálne napätie medzi kolektorom a emitorom  $U_{CEmax}$
- maximálny prúd kolektora  $I_{Cmax}$
- maximálny stratový výkon  $P_{Cmax}$

## 1. Návrh odporu $R_C$ .

Hodnota odporu  $R_C$  je limitovaná:

a) maximálnym kolektorovým prúdom  $I_C$

$$R_C \geq \frac{U_{CC} - U_{CES}}{I_{Cmax}} \approx \frac{U_{CC}}{I_{Cmax}}$$

b) maximálnym stratovým výkonom  $P_{Cmax}$  (krivka maximálneho výkonu a zaťažovacia charakteristika sa nesmú pretínať)

$$\frac{P_{Cmax}}{I_C} \geq U_C - R_C I_C \quad (\text{kvadratická nerovnica s neznámou } I_C)$$

nemá reálne riešenie, ak platí

$$R_C \geq \frac{U_C^2}{4P_{Cmax}}$$

Za  $U_C$  vezmeme pri výpočte maximálnu hodnotu napätia, teda  $U_{CC}$ .

c) zvolenou hodnotou prúdu  $I_C$

$R_C$  sa volí podľa požadovaného prúdu v zopnutom stave

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{I_C} \approx \frac{U_{CC}}{I_C}$$

Pozn.: Veľkosť napätia  $U_{CES}$  závisí od  $I_C$ . Príslušnú závislosť možno nájsť v katalógu.

## 2. Návrh odporu $R_B$ .

Hodnota odporu  $R_B$  je podmienená niekoľkými skutočnosťami:

a) V stave, kedy má byť tranzistor uzavretý, je na výstupe budiča (ktorý je otvorený) saturačné napätie  $U_{CES}^b$ . Aby bol tranzistor skutočne uzavretý, musí platiť podmienka

$$U_{BEoff} \geq U_{CES}^b,$$

čo je väčšinou splnené.

Diskutabilnou môže byť veľkosť  $U_{BEoff}$ , pretože najlepšie uzavretie tranzistora dosiahneme najnižším napätím medzi bázou a emitorom. Príliš vysoká hodnota  $U_{BEoff}$  by spôsobila čiastočné otvorenie tranzistora, a tým aj pokles napätia  $U_{CE}$ , ktoré nesmie klesnúť pod stanovenú hodnotu  $U_{OH}$ . Pri danom  $U_{CES}^b$  možno znížiť napätie  $U_{BE}$  zvýšením odporu  $R_B$ . Matematicky možno vyjadriť  $U_{CE}$  pre daný stav v tvare

$$U_{CE(H)} = U_{CC} - h_{21} \frac{U_{CES}^b - U_{BE}}{R_B} R_C$$

Ak by sme uvažovali najhorší prípad s  $U_{BE}=0V$ , potom

$$U_{CE(H)} = U_{CC} - h_{21} \frac{U_{CES}^b}{R_B} R_C$$

Ak chceme zaručiť vo vypnutom stave pokles napätia  $U_{CE}$  voči  $U_{CC}$  najviac o hodnotu  $U_{CES}$ , pre  $R_B$  platí

$$R_B \geq h_{21} R_C$$

Z praktického hľadiska za  $h_{21}$  berieme jeho hodnotu v saturácii, ktorá je mešia ako v aktívnom režime, a pohybuje sa v rozsahu 10÷30.

b) V stave, keď je tranzistor otvorený, musí platiť  $U_{BE} \geq U_{BES}$  alebo tiež  $I_B \geq I_C/h_{21}$ .

Pre  $R_B$  platí podmienka

$$R_B \leq \frac{U_{CE(H)}^b - U_{BES}}{\frac{I_C}{h_{21}}}$$

Pri praktickom výpočte môžeme položiť  $U_{BE(H)}^b = U_{OH}$ .

Návrh odporu  $R_B$  možno zhrnúť:

1. Príliš nízka hodnota  $R_B$  nie je vhodná z pohľadu zabezpečenia uzavretia tranzistora.
2. Príliš vysoká hodnota  $R_B$  nie je vhodná z pohľadu zabezpečenia otvorenia tranzistora.  
(Inou možnosťou ako čiastočne ovplyvniť návrh odporov  $R_B$  a  $R_C$  je zmeniť prúd budiča, čím sa zmení i  $U_{CES}^b$ )

V katalógu sa neuvádza hodnota  $U_{BEoff}$ . Treba si však uvedomiť, že znížením napätia  $U_{BE}$  o 0,1 V klesne v ideálnom prípade prúd približne  $e^4$  krát pri bežnej teplote. V reálnom prípade je to menej, približne 20 krát. Teda ak napr. pri  $U_{BE} = 0,7$  V tečie tranzistorom kolektorový prúd 1mA, pri  $U_{BE} = 0,5$  V má kolektorový prúd veľkosť približne 2,5  $\mu$ A. Pri hodnote  $R_C = 10$  k $\Omega$  je úbytok napätia na kolektorovom odpore v tomto prípade 25 mV, čo je z pohľadu bežného napájacieho napätia zanedbateľná hodnota. Prakticky možno teda hodnotu  $U_{BEoff} = 0,5$  V považovať pri izbovej teplote za úplne postačujúcu.

Ak má byť obvod navrhnutý pre široký rozsah teplôt, treba zvážiť jej vplyv na hodnotu  $U_{BES}$  a  $U_{CES}$ .

Z analýzy návrhu odporov sa ukazuje, že jednotlivé napäťové úrovne z výstupu budiča pri dobrom návrhu odporov  $R_B$  a  $R_C$  spĺňajú s rezervou hodnoty, ktoré zabezpečia jednotlivé stavy tranzistora. Bola zavedená tzv. šumová imunita ( noise margin ) pre vysokú úroveň signálu ( otvorený tranzistor )

$$NM_H = U_{OH} - U_{IH}$$

a podobne pre nízku úroveň signálu ( uzavretý tranzistor )

$$NM_L = U_{IL} - U_{OL}$$

Z pohľadu pripojenia záťaže sa definuje tzv. vetvenie výstupu N ( logický zisk ) ako pomer maximálneho výstupného prúdu  $I_{Omax}$  ku maximálnemu vstupnému prúdu  $I_{Imax}$ .

$$N = \frac{I_{Omax}}{I_{Imax}}$$

Maximálny výstupný prúd poskytuje spínač pri výstupnej úrovni H, a musí byť taký veľký, aby zabezpečil otvorenie ďalšieho spínacieho stupňa. Parameter N prakticky určuje maximálny počet ďalších ( rovnakých ) spínacích stupňov.