



S P O J E N Á
Š K O L A
S A B I N O V
S N P 16

Bipolárny tranzistor v praxi

Definícia

- **Tranzistor** je (trojvrstvová) **polovodičová súčiastka**,
- ktorá ma tri elektródy: **kolektor**, **emitor** a **bázu**.
- Používa sa na **zosilnenie** eklektického prúdu, či napätia.

mnemotechnická pomôcka:

(čo je tranzistor)

(niečo o ňom)

(na čo sa používa)

Bipolárny tranzistor môžeme vnímať skôr ako akýsi elektrický „ventil“ (kohútik), ktorým môžeme regulovať tečenie elektrického prúdu medzi elektródami **Kolektor** - **Emitor**. Táto vetva sa niekedy nazýva spínaná, alebo tiež silová vetva. Ak chceme tranzistor (ventil, či kohútik) otvoriť, musíme zabezpečiť, aby riadiacou (ovládacou) elektródou **Báza**, tiekol elektrický prúd. Prúd, ktorý tečie bázou, prechádza emitorom (prechod Báza – Emitor).

Polovodičové vrstvy P a N môžeme zoradiť do troch vrstiev iba dvoma spôsobmi:

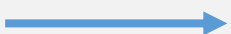
PNP

Tranzistor PNP zakresľujeme tak, že v emitore je **šípka smerujúca do bázy**. Tranzistor sa ovláda privedením **záporného napätia** na elektródu **báza**. V silovej vetve tečie prúd v smere šípky od **emitora ku kolektore**.

NPN

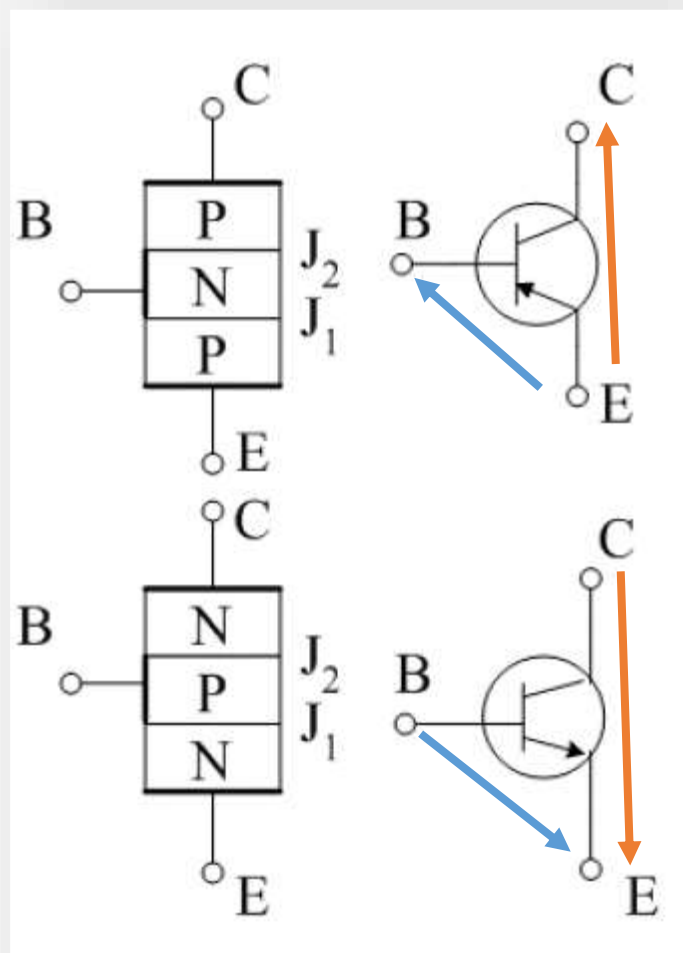
Tranzistor NPN zakresľujeme tak, že v emitore je **šípka smerujúca von**. Tranzistor sa ovláda privedením **kladného napätia** na elektródu **báza**. V silovej vetve tečie prúd v smere šípky od **kolektora k emitoru**.

Ovládacie napätie U_{BE} :

kladné +  - **záporne**
(Napätie. Šípka označuje záporný pól.)

Prúd tečúci silovou vetvou I_C :

kladné +  - **záporne**
(Šípka označuje smer tečenia prúdu)



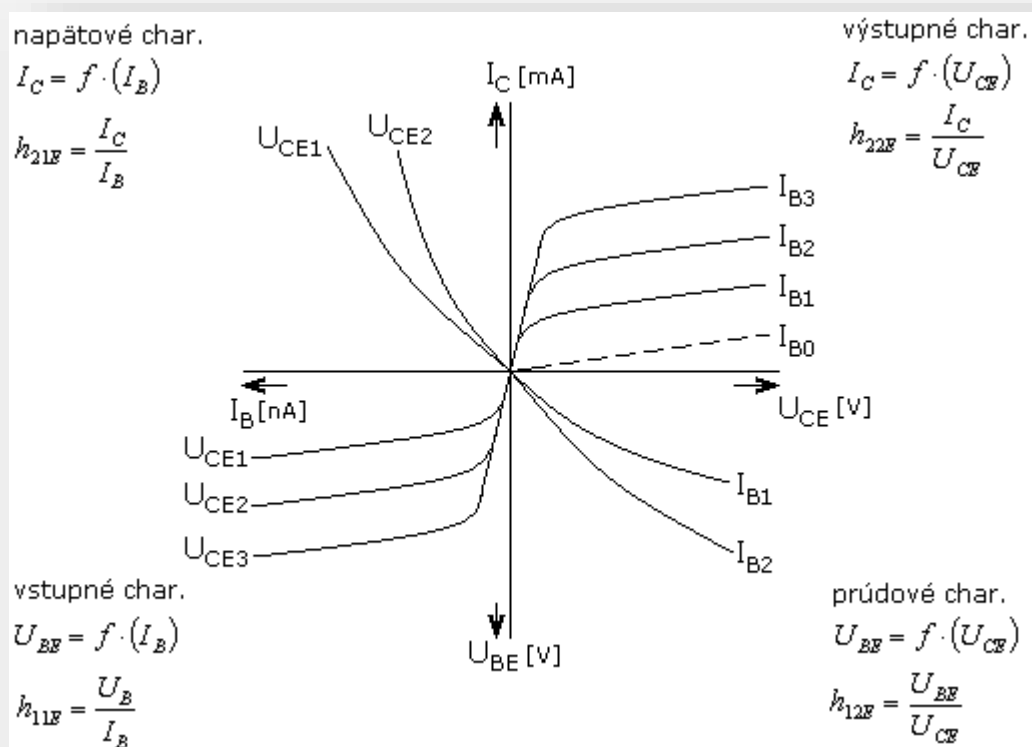
Mnemotechnická pomôcka:
„NPN – šípka von.“

Obr.1

Charakteristika tranzistora

Charakteristika bipolárneho tranzistora nám znázorňuje, závislosti napätí a prúdov v tranzistore. Vďaka nim, dokážeme navrhnuť obvod a vypočítať potrebné súčiastky. Celková charakteristika sa delí na štyri kvadranty:

- **h_{21E} – prevodová charakteristika** – určuje prevod medzi kolektorovým a bázovým prúdom. Z lineárnej časti tejto charakteristiky je možné vyjadriť hodnotu, ktorú nazývame **prúdové zosilnenie** (gain) a označujeme ho **h_{FE}** , alebo **β** .
- **h_{22E} – výstupná charakteristika**
- **h_{11E} – vstupná charakteristika** – spolu s h_{21E} sa využívajú pre výpočet zosilnenia zosilňovača A_u .
- **h_{12E} – spätно-väzobná charakteristika.**



Obr. 2

Je nutné si uvedomiť, že prúdy a napätia v charakteristike navzájom súvisia. Teda, ako môžeme z grafu odčítať hodnotu bázového prúdu I_B , keď je daný kolektorový prúd I_C , tak to funguje aj naopak. Môžeme z grafu odčítať kolektorový prúd I_C , keď poznáme bázový prúd I_B . Dokonca je možné presúvať a odčítať hodnoty z viacerých kvadrantov. Napríklad kolektorový prúd I_C z grafu h_{21E} preniesieme na os s bázovým prúdom I_B . A následne z neho v kvadrante h_{11E} dokážeme odčítať napätie medzi bázou a emitorom U_{BE} .

V dnešných dokumentáciách tranzistorov sa už tento typ charakteristiky neuvádza.

Pre prácu s tranzistorom a výpočet súčiastok v obvode s tranzistorom sú pre nás dôležité iba dva prevody:

1.) Prevod medzi bázovým prúdom I_B a kolektorovým prúdom I_C .

Zosilňovací činiteľ - značený tiež ako h_{FE} , alebo β je číslo, ktoré vyjadruje zosilnenie tranzistora v lineárnej časti charakteristiky h_{21E} . V podstate vyjadruje pomer medzi I_C a I_B . To znamená, že ak kolektorom prechádza $I_C = 10A$ a zosilnenie tranzistora je $h_{FE} = 100$, tak bázou bude prechádzať prúd $I_B = I_C/h_{FE} = 10/100 = 0,1A$. Funguje to aj opačne. Teda z bázového prúdu dokážeme vypočítať kolektorový prúd.

Prúdové zosilnenie:

$$I_C = I_B \times h_{FE}$$

Hodnotu zosilnenia h_{FE} poprípade β môžeme vyčítať z dokumentácie daného tranzistora. Aj keď najčastejšie sa zosilnenie udáva v rozmedzí hodnôt.

Dokumentácia tranzistora 2SC5200:

Obr. 3

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Collector cut-off current	I_{CBO}	$V_{CB} = 230V, I_E = 0$	—	—	5.0	μA
Emitter cut-off current	I_{EBO}	$V_{EB} = 5V, I_C = 0$	—	—	5.0	μA
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CEO}$	$I_C = 50mA, I_B = 0$	230	—	—	V
DC current gain	$h_{FE(1)}$ (Note)	$V_{CE} = 5V, I_C = 1A$	55	—	160	
	$h_{FE(2)}$	$V_{CE} = 5V, I_C = 7A$	35	60	—	
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 8A, I_B = 0.8A$	—	0.4	3.0	V
Base-emitter voltage	V_{BE}	$V_{CE} = 5V, I_C = 7A$	—	1.0	1.5	V
Transition frequency	f_T	$V_{CE} = 5V, I_C = 1A$	—	30	—	MHz
Collector output capacitance	C_{ob}	$V_{CB} = 10V, I_E = 0, f = 1MHz$	—	200	—	pF

Note: $h_{FE(1)}$ classification: R: 55 to 110, O: 80 to 160

Z tejto tabuľky môžeme vyčítať, že ak je tranzistor na hranici svojich možností (tečie ním 7A), jeho zosilnenie je 60. No minimálne garantované zosilnenie je 35. Ak sa jedná o lineárnu časť prevodovej charakteristiky, jeho zosilnenie je v rozsahu od 55 do 160. Bližšie sa tomu venujú v poznámke, kde typ „2SC5200 R“ má zosilnenie v rozmedzí 55 až 110 (v priemere 80) a typ „2SC5200 O“ má zosilnenie v rozmedzí 80 až 160 (v priemere 120).

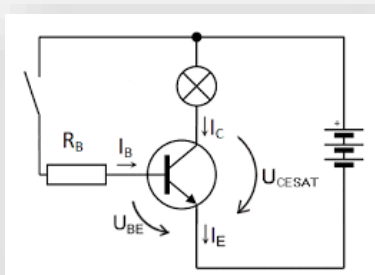
Príklad:

Tranzistorom „2SC5200 R“ spíname žiarovku s odberom 1A. Vypočítaj prúd tečúci bázou I_B .

$I_C = 1A$; $h_{FE} = 80$; $I_B = ?$

$I_B = I_C / h_{FE} = 1A / 80 = 0,0125A = 12,5mA$

Obr. 4



2.) Prevod medzi kolektorovým prúdom I_C a napätím báza-emitor U_{BE} .

V tomto prevode nejde o obyčajné číslo, ako pri zosilnení. Prevod musíme vyčítať z prevodovej charakteristiky, ktorá je akýmsi spojením kvadrantov h_{11E} a h_{21E} . Bežne je táto charakteristika súčasťou dokumentácie tranzistora.

Z tejto charakteristiky je možné vyčítať, pri akom napätí medzi bázou a emitorom U_{BE} bude tiecť požadovaný kolektorový prúd I_C . Používa sa to pri zosilňovačoch prúdu, prúdových zrkadlách a podobne.

Príklad:

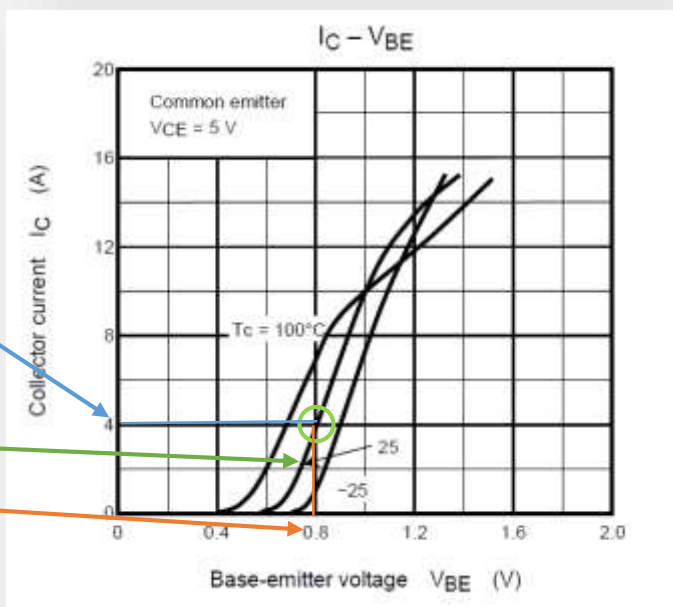
Tranzistorom „2SC5200“ spíname elektromotor s odberom 4A, aké bude napätie U_{BE} medzi bázou a emitorom?

$$I_C = 4A;$$

Na grafe je možno vidieť, ako sa tranzistor správa pri rôznych teplotách.

Pre nás je smerodajná stredná charakteristika s teplotou 25°C

$$U_{BE} = 0,8V;$$



Obr. 5

Základne parametre tranzistora

Z dokumentácie tranzistora môžeme vyčítať o tranzistore ešte veľa užitočných údajov. Okrem parametra zosilnenia h_{FE} , tam môžeme nájsť:

Hlavné parametre:

I_C - Maximálny prúd, ktorý môže tiecť kolektorom.

U_{CEO} - Maximálne spínané napätie pri vypnutom (otvorenom) tranzistore.

I_B - Maximálny prúd, ktorý môže tiecť bázou.

P_{TOT} - Maximálny výkon, ktorý sa môže stratiť na tranzistore.

alternatíva:

$[V_{CEO}]$

$[P_C]$

Ďalšie:

U_{BE} - Napätie medzi bázou a emitorom. Toto napätie je možné presnejšie vyčítať z prevodových charakteristík. Vid' charakteristiku $I_C - U_{BE}$ na obr. 5. $[V_{BE}]$

$U_{CE(sat)}$ - Napätie, ktoré sa stratí na tranzistore, keď je zopnutý. Skratka „sat“ znamená, že tranzistor je v saturácii (stav presýtenia). $[V_{CE(sat)}]$

Saturácia (stav presýtenia tranzistora)

Tranzistor sa do saturácie dostane, keď bázou prechádza veľký prúd (pracovný bod tranzistora sa posunie až za aktívnu oblasť). To má za následok, že tranzistor je najviac priepustný a jeho stratové napätie U_{CE} spadne na minimum (0,2V až 0,3V). V saturácii sa kolektorový prúd I_C už ďalej nedokáže navýšiť, ani pri ďalšom zvyšovaní bázového prúdu I_B .

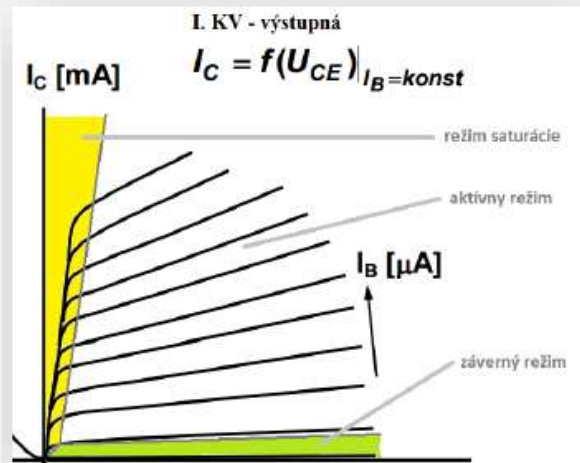
Tranzistor sa zo saturácie do vypnutého stavu dostáva pomerne pomaly!

Saturácia sa využíva, keď chceme tranzistor v obvode použiť ako spínací prvok.

Pri saturácii platí: $I_B > I_C / h_{FE}$

Príklad:

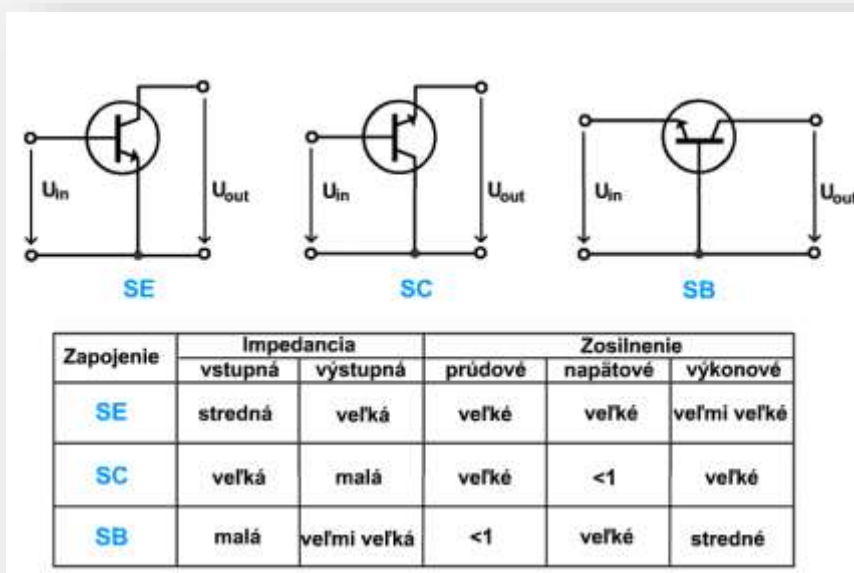
Mame žiarovku ktorá odoberá prúd z kolektora tranzistora $I_C = 1A$. Zosilnenie tranzistora je $h_{FE} = 100$. Zo vzorca $I_B = I_C / h_{FE}$ môžeme vypočítať, že bázový prúd $I_B = I_C / h_{FE} = 1A / 100 = 0,01A = 10mA$. Žiarovka viac ako 1A odoberať nebude. Preto ani kolektorový prúd I_C už viac nenarastie. Na druhej strane bázový prúd ovplyvniť vieme a to bázovým rezistorom. Ak rezistor prispôbime tak, aby bázou tiekol prúd $I_B = 10mA$ (ako sme vypočítali), tranzistor sa bude nachádzať v **aktívnom režime**. Ak by sme použili rezistor, ktorý by prúd bázy navýšil na $I_B = 15mA$, ale prúd kolektora udržiava žiarovka stále iba na $I_C = 1A$, tranzistor sa nasýti a dostane sa do **režimu saturácie**.



Obr. 6: h_{22E} kvadrant prevodovej charakteristiky

Zapojenie tranzistora

Tranzistory môžeme do obvodu zapojiť tromi spôsobmi: so spoločným emitorom (najčastejšie), so spoločným kolektorom, alebo so spoločnou bázou. Vhodné zapojenie tranzistora zvolíme podľa požadovanej vstupnej a výstupnej impedancie (odporu) a podľa požadovaného zosilnenia prúd a napätia. Zapojeniu so spoločnou bázou sa venovať nebudeme.



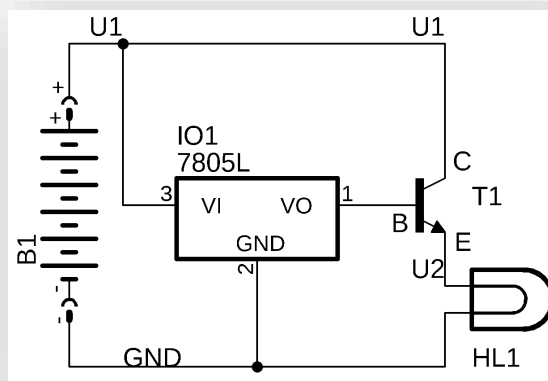
Obr. 7

Zapojenie so spoločným kolektorom

Zapojenie so spoločným kolektorom sa najčastejšie využíva ako prúdový zosilňovač, hoci na úkor malej napäťovej straty (o veľkosti U_{BE} v rozmedzí 0,6V až 1,2V). V tomto zapojení je kolektor pevne pripojený k zdroju. Emitor je výstup a teda napája elektrickú záťaž (napríklad: žiarovku, cievku relé...). Podstatou zapojenia je, že napätie na emitore kopíruje napätie bázy so spomínanou malou napäťovou stratou.

Príklad:

Máme stabilizátor napätia IO1 typu 7805L, ktorý stabilizuje napätie 5V. Maximálny výstupný prúd stabilizátora je 100mA. Pre zosilnenie prúdu použijeme tranzistor typu 2SC5200, ktorý má zosilnenie $h_{FE}=100$. Tranzistor je v zapojení so spoločným kolektorom (kolektor je napojený na zdroj a emitor tvorí výstup, ktorý napája lampu). Vypočítaj aký maximálny prúd môže odoberať lampa (žiarovka).



Obr. 8

Výpočet:

Výstup stabilizátora je priamo napojený na bázu tranzistora. Teda bázou môže tiecť iba taký veľký prúd, koľko dokáže zniesť stabilizátor:

$I_B = I_{IO1(max)} = 100mA = 0,1A$; Maximálny prúd tečúci bázou tranzistora.

Kolektorový prúd vypočítame zo vzťahu prúdového zosilnenia:

$I_C = I_B \times h_{FE} = 0,1A \times 100 = 10A$; Kolektorový prúd pri bázovom prúde 100mA.

Odpoveď:

V tomto zapojení môže lampa odoberať maximálne 10A.

Ešte pre úplnosť, môžeme dopočítať, aké napätie sa stratí na tranzistore a následne, aké napätie zostane na lampe (pri plnom odbere 10A). Z grafu na obr. 5 môžeme vyčítať, že tranzistor pri prúde $I_C = 10A$ má napätie medzi bázou a emitom $U_{BE} = 1V$. Z toho vyplýva:

$U_{HL1} = U_{IO1(out)} - U_{BE} = 5V - 1V = 4V$.

V praxi sa táto strata ošetrí pridaním usmerňovacej diódy medzi stabilizátor a zem, čo spôsobí napäťový zdvih stabilizátora zhruba o 0,6V až 0,8V.

Zapojenie so spoločným emitorom

Zapojenie so spoločným emitorom je najpoužívanejšie zapojenie tranzistora. V tomto zapojení ma tranzistor napäťové aj prúdové zosilnenie (záleží od zapojenia záťaže). Tranzistor v tomto zapojení sa najčastejšie používa ako zosilňovač v triedach A, B, C, alebo ako spínač.

Zapojenie je špecifické tým, že tranzistor je pripojený k zdroju pomocou emitora. Kolektor tvorí výstup. Prechodnosť vetvy emitor – kolektor sa ovplyvňuje malým bázovým napätím U_{BE} , alebo bázovým prúdom I_B . Aj tu platí, že kolektorový prúd I_C je súčinom bázového prúdu I_B a zosilnenia tranzistora h_{FE} .

Tranzistor ako spínač

Ak chceme rozsvietiť lampu s napájacím napätím 24V a prúdom 100mA, ale riadiaci signál je iba o veľkosti 5V (max. prúd 20mA), môžeme na tento účel použiť tranzistor.

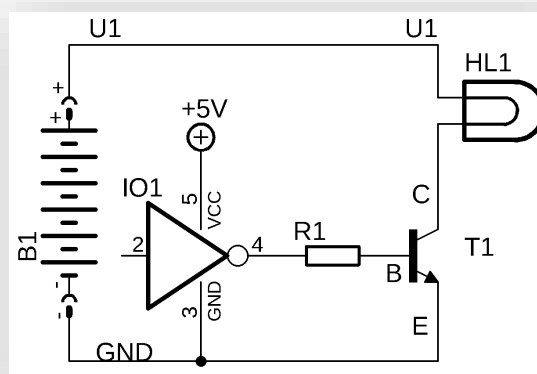
Tranzistor v zapojení ako spínač demonštruje zapojenie na obr. 9. V tomto zapojení je nutné vypočítať jedinú súčiastku, a to rezistor R1.

Pre výpočet rezistora R1 je potrebné vedieť s akým prúdom do bázy I_B počítame. Máme 3 možnosti:

- **Maximálna saturácia.** – Zistíme aký maximálny prúd bázy I_{BM} znesie tranzistor. Rezistor prispôbíme tak, aby bázou tiekol maximálny možný prúd. Tento spôsob zbytočne zaťažuje ako zdroj signálu, tak aj tranzistor.
- **Doporučená saturácia.** – Ak ma tranzistor zosilnenie nad 80, doporučuje sa tranzistor dostať do saturácie tak, že bázový prúd bude len desatina kolektorového prúdu $I_B = I_C / 10$.
- **Bez saturácie.** – Bázový prúd vypočítame zo vzťahu $I_B = I_C / h_{FE}$. Táto možnosť má výhodu, že tranzistor pomerne rýchlo reaguje a odoberaný prúd zo zdroja signálu je len minimálny. No na druhej strane je napätie U_{CE} trochu vyššie ako v saturácii.

Príklad:

Lampa má parametre 24V/100mA, výstup hradla integrovaného obvodu IO1 o veľkosti 5V a maximálnym zaťažením 20mA. Tranzistor je použitý BC546C s $U_{BE} = 0,7V$, $I_{BM} = 200mA$ a $h_{FE} = 500$. Schéma zapojenia je na obr. 9. Vypočítajte rezistor R1.



Obr. 9

Cesta „maximálnej saturácii“ nepripadá do úvahy, keďže maximálny prúd bázy je 200mA a hradlo IO1 dokáže dodať maximálne 20mA. Pri „doporučenej saturácii“ je prúd bázy $I_B = I_C / 10 = 100mA / 10 = 10mA$. Hradlo IO1 znesie prúd 10mA. Teda sa jedná sa o dobre riešenie. Ak by sme sa rozhodli vyhnúť saturácii, prúd bázy by bol $I_B = I_C / h_{FE} = 100mA / 500 = 0,2mA$, čo je 50x menej ako doporučenej saturácii. Tu by som hľadal nejaký kompromis. Vieme, že do saturácie sa môžeme dostať vtedy, keď $I_B > I_C / h_{FE}$. Preto by som zvolil hodnotu 1mA.

Z obr. 9 môžeme pozorovať, že rezistor R1 ma zo strany IO1 napätie 5V a zo strany tranzistora je prechod tranzistora U_{BE} o veľkosti 0,7V. Z toho dokážeme vypočítať napätie na rezistore R1.
 $U_{R1} = U_{IO1(out)} - U_{BE} = 5V - 0,7V = 4,3V$

Hodnota rezistora pri doporučenej saturácii: $R1 = U_{R1} / I_B = 4,3V / 0,01A = 430\Omega$

Hodnota rezistora pri našej 1mA saturácii: $R1 = U_{R1} / I_B = 4,3V / 0,001A = 4300\Omega = 4k3$

Hodnota rezistora bez saturácie: $R1 = U_{R1} / I_B = 4,3V / 0,0002A = 21500\Omega = 21k5$

Odpoveď:

Pre zapojenie na obr. 9 som zvolil rezistor s odporom 4k7 (najbližší hodnote 4k3). Ale zapojenie bude fungovať s akýmkoľvek rezistorom, ktorý má odpor v rozmedzí 470 Ω až 18k Ω .

Tranzistor ako zosilňovač v triede A

Zosilňovač v triede A sa používa ako zosilňovač napäťového signálu. Pri tomto zapojení je prúd na výstupe veľmi malý. Preto sa toto zapojenie najčastejšie používa ako predzosilňovač.

Pracovný bod tranzistora v tomto zosilňovači je nastavený v „polovici lineárnej časti prevodovej charakteristiky“. To znamená, že tranzistor je otvorený iba na polovicu.

Príklad:

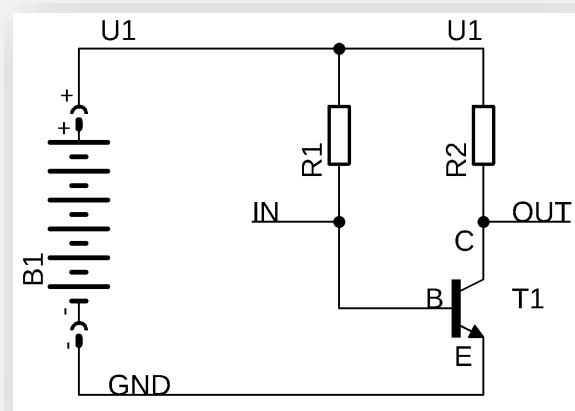
Na obr. 10 je schéma zapojenia zosilňovača v triede A. Vypočítajte rezistory R1 a R2, keď je dané:

Napájacie napätie $U1 = 20V$. Použitý tranzistor BC546C má zosilnenie $h_{FE} = 500$. Napätie U_{BE} vyčítajte z prevodovej charakteristiky na obr. 11. Zvolili sme prúd kolektora $I_C = 20mA$.

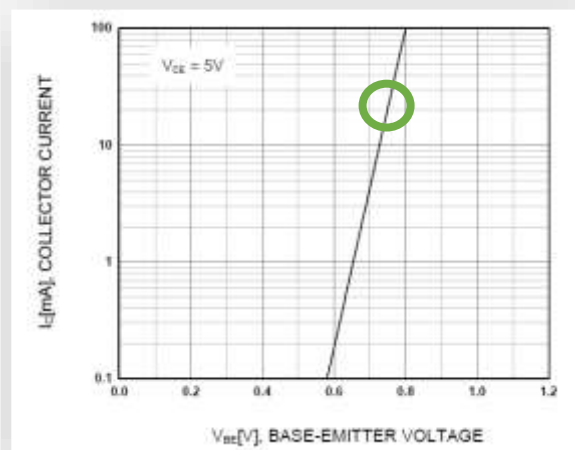
Výpočet:

Pre výpočet rezistora R2 potrebujeme vedieť napätie na rezistore a prúd, ktorý nim tečie.

Prúd ktorý prechádza kolektorom I_C prechádza aj rezistorom R2. $I_{R2} = I_C = 20mA$. Napätie na rezistore je rovnaké ako napätie na tranzistore v silovej vetve U_{CE} . Vychádzame z princípu zosilňovača v triede A, ktorý má pracovný bod v strede prevodovej charakteristiky, teda je na polu otvorený. $U_{R2} = U_{CE} = U1 / 2 = 20V / 2 = 10V$. Výpočet rezistora $R2 = U_{R2} / I_{R2} = 10V / 0,02A = 500\Omega$.



Obr. 10



Obr. 11 – BC546 prevod medzi I_C a U_{BE}

Ako pri rezistore R2, tak aj pri rezistore R1 je nutné vedieť napätie na rezistore a prúd, ktorý ním tečie. Zo zapojenia vidíme, že vo vetve s rezistorom R1 sa napájacie napätie U1 rozdelilo na napätie rezistora U_{R1} a napätie tranzistora U_{BE} . Napätie U_{BE} si vyčítame z tabuľky na obr. 11. Pri kolektorovom prúde $I_C = 20\text{mA}$ je napätie $U_{BE} = 0,75\text{V}$ (zelený krúžok).

Napätie na rezistore je teda $U_{R1} = U_1 - U_{BE} = 20\text{V} - 0,75\text{V} = 19,25\text{V}$. Prúd ktorý tečie rezistorom R1 tečie priamo do bázy. Teda ide o báзовý prúd. Báзовý prúd I_B dokážeme vypočítať zo vzťahu prúdového zosilnenia (keďže poznáme zosilnenie aj kolektorový prúd). $I_B = I_C / h_{FE} = 0,02\text{A} / 500 = 0,00004\text{A} = 40\mu\text{A}$. Máme vypočítaný prúd aj napätie, môžeme vypočítať odpor $R1 = U_{R1} / I_{R1} = 19,25\text{V} / 0,00004\text{A} = 481250\Omega = 481\text{k}\Omega$.

Odpoved'

Rezistor **R1** má odpor $481\text{k}\Omega$ a rezistor **R2** má odpor 500Ω .

Poznámka: Hodnotu U_{BE} nemusíme vyčítať z prevodovej charakteristiky. Jeho hodna pri takýchto výpočtoch výrazne neovplyvňuje výsledok. Preto, ak hodnota U_{BE} nebude v zadaní definovaná, kludne môžeme pracovať s hodnotou $U_{BE} = 0,8\text{V}$.

Odpoved' máme, ale pre úplnosť je dobré vypočítať ešte stratové výkony na rezistoroch a tranzistore. Poprípadе porovnať vypočítané napätia, prúdy a výkon na tranzistore s dokumentáciou tranzistora. Či sme nepresiahli niektoré z maximálnych parametrov.

$$P_{R1} = U_{R1} \times I_{R1} = 19,25\text{V} \times 0,00004\text{A} = 0,00077\text{W} = 0,77\text{mW}$$

$$P_{R2} = U_{R2} \times I_{R2} = 10\text{V} \times 0,02\text{A} = 0,2\text{W} = 200\text{mW}$$

$$P_{T1} = U_{T1} \times I_{T1} = 10\text{V} \times 0,02\text{A} = 0,2\text{W} = 200\text{mW}$$

Ako vidíme z obr. 12, Tranzistor BC546 znesie napätie 80V , kde v našom zapojení sme pracovali s napätím $U_1 = 20\text{V}$. Kolektorový prúd sme mali daný $I_C = 20\text{mA}$ a tranzistor vydrží až 100mA . Nakoniec v našom zapojení bude výkonová strata na tranzistore 200mW a tranzistor vydrží stratový výkon až do 500mW .

Absolute Maximum Ratings $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted			
Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	BC546	80
		BC547/550	50
		BC548/549	30
			V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	BC546	65
		BC547/550	45
		BC548/549	30
			V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	BC546/547	6
		BC548/549/550	5
I_C	Collector Current (DC)	100	mA
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW

Obr. 12 Maximálne hodnoty, pre tranzistor BC546

Rôzne príklady zapojenia s tranzistorom a ich výpočet

Príklad 1 – stabilizátor so zenerovou diódou:

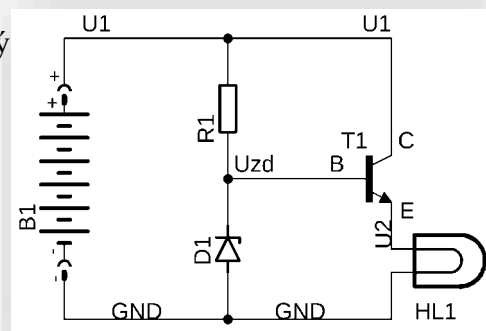
V tomto zapojení vidíme, že kolektor tranzistora je napojený priamo na zdroj a výstup je v tomto prípade emitor. To je hlavným znakom, že sa jedná o zapojenie so spoločným kolektorom.

Vypočítajte súčiastky v obvode stabilizátora, keď je dané:

Napájacie napätie batérie U_1 je v rozmedzí 18V až 24V.

Lampa (žiarovka) s napätím 12V odoberá prúd 120mA.

Používame tranzistor typu „2SC5200 O“ so zosilnením $h_{FE} = 120$.



Obr. 13

Výpočet:

Z charakteristiky tranzistora na obrázku 5. môžeme vyčítať, že napätie U_{BE} pri prúde 120mA je v okolí 0,7V.

U_1 (oproti GND) = min. 18V a max. 24V.

U_2 (oproti GND) = 12V; Napätie žiarovky.

U_{ZD} (oproti GND) = $U_2 + U_{BE} = 12V + 0,7V = 12,7V$; Požadované napätie zenerovej diódy.

$I_C = 120mA = 0,12A$; Kolektorový prúd (silová vetva) sa rovná prúdu záťaže, teda lampy.

$I_B = I_C / h_{FE} = 0,12A / 120 = 0,001A = 1mA$; Prúd ktorý bude tiecť bázou je 1mA.

Najprv vypočítame, hodnotu rezistora $R1$ pri minimálnom napájaní. Vidíme že prúd ktorý bude tiecť rezistorom sa rozdelí na prúd tečúci bázou tranzistora I_B (1mA) a prúd tečúci zenerovou diódou $D1$. Zenerová dióda ma vlastnosť udržania požadovaného napätia na svojich elektródach. Teda bude odoberať toľko prúdu, koľko je potrebné pre udržanie požadovaného napätia. Z toho vyplýva, že pri napájaní 18V nemusí zenerovou diódou $D1$ tiecť žiaden prúd a naopak pri 24V bude diódou $D1$ tiecť taký prúd, aby udržala napätie U_{ZD} na hodnote 12,7V.

Výpočet rezistora $R1$ pri napájacom napätí 18V:

$$U_{R1(18V)} = U_1 - U_{DZ} = 18V - 12,7 = 5,3V;$$

$$I_{R1(18V)} = I_B + I_{D1} = 0,001A + 0A = 0,001A;$$

$$R1 = U_{R1(18V)} / I_{R1(18V)} = 5,3V / 0,001A = 5300\Omega = 5,3k\Omega;$$

Volíme najbližší nižší odpor, lebo prúd môže byť väčší (zenerová dióda zvyškový prúd vstrebe), no nie nižší, lebo by tranzistorom pretekal menší prúd a lampa by stratila požadovaný jas. Teda volíme hodnotu rezistora $R1 = 4k7 = 4700\Omega$.

V podstate sme už zadanie príkladu vypočítali. No pri návrhu obvodu je ešte treba dopočítať stratové výkony. Najprv zistíme, aký prúd bude tiecť zenerovou diódou D1 a z toho vypočítame jej stratový výkon. Tento parameter je dôležitý pri výbere typu zenerovej diódy.

Diódou D1 bude tiecť najväčší prúd pri napájaní napätím 24V. Teda musíme opäť prepočítať prúd rezistora pri napájaní $U_1 = 24V$ pri zvolenom odpore rezistora $R1 = 4700\Omega$.

Výpočet hodnôt rezistora pri napájacom napätí 24V.

$$U_{R1(24V)} = U_1 - U_{DZ} = 24V - 12,7 = 11,3V;$$

$$I_{R1(24V)} = U_{R1(24V)} / R1 = 11,3V / 4700 = 0,0024A;$$

Z prúdu rezistora najprv odtečie do tranzistora 1mA. Zbytok pohltí zenerova dióda D1.

$$I_{D1} = I_{R1(24V)} - I_B = 0,0024A - 0,001A = 0,0014A;$$

Výpočet stratových výkonov:

$$P_{D1} = U_{DZ} \times I_{D1} = 12,3V \times 0,0014A = 0,018W = 18mW;$$

$$P_{R1} = U_{R1(24V)} \times I_{R1(24V)} = 11,3V \times 0,0024A = 0,027W = 27mW;$$

Pre výpočet stratového výkonu na tranzistore je nutné vypočítať napätie medzi emitorom a kolektorom pri maximálnom napájacom napätí $U_1 = 24V$.

Výpočet stratového výkonu tranzistora a žiarovky pri napájaní 24V:

$$U_{CE(24V)} = U_1 - U_2 = 24V - 12V = 12V;$$

$$P_{T1} = U_{CE(24V)} \times I_C = 12V \times 0,12A = 1,44W;$$

$$P_{HL1} = U_2 \times I_{HL1} = 12V \times 0,12A = 1,44W;$$

Odpoveď:

T1 – Tranzistor typu 2SC5200 - O

R1 – Rezistor 4k7 s minimálnym výkonom 27mW

D1 – Zenerová dióda s napätím 12,7V a minimálnym výkonom 18mW

HL1 – Žiarovka s napätím 12V a 1,44W (120mA)

Tranzistor je nutné chladieť, keďže sa na ňom stráca výkon 1,44W.

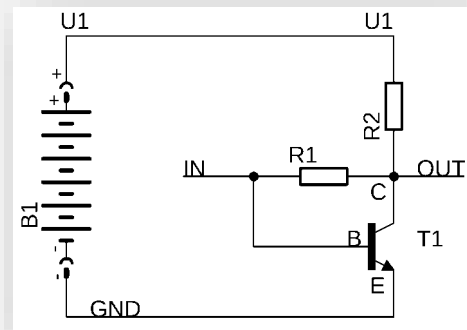
Príklad 2 – zosilňovač v triede A so spätnou väzbou:

Vypočítajte rezistory v obvode na obr. 14. Jedná sa zosilňovač v triede A, z čoho vyplýva že tranzistor je na pol otvorený.

Dané je: napájacie napätie $U_1 = 10V$, $I_C = 50mA$. použitý je tranzistor BC546A, ktorého zosilnenie je $h_{FE} = 150$ (pozri obr. 15).

Výpočet:

Tu je nutné dať na správnu mieru, že prúd ktorý tečie Rezistorom R2 sa delí na prúd tečúci R1 a prúdom tečúci tranzistorom I_C . Keďže pomer prúdov I_{R1} (sa rovná I_B) a I_C je v pomere zosilnenia 1:150 (čo je pod 0,7%), je pre náš výpočet I_{R1} zanedbateľný. Preto si výpočet zjednodušíme a pri výpočte rezistora R2 nebudeme brať do úvahy prúd tečúci R1.



Obr. 14

Výpočet rezistora **R2**:

$$U_{R2} = U_{CE} = U_1 / 2 = 10V / 2 = 5V;$$

$$I_{R2} = I_C + I_{R1} = 50mA = 0,05A;$$

$$R2 = U_{R2} / I_{R2} = 5V / 0,05A = 100\Omega;$$

Výpočet rezistora **R1**:

$$U_{R1} = U_{CE} - U_{BE} = 5V - 0,8V = 4,2V;$$

$$I_{R2} = I_C / h_{FE} = 0,05A / 150 = 0,0003A;$$

$$R1 = U_{R1} / I_{R1} = 4,2V / 0,0003A = 14000\Omega = 14k\Omega;$$

Pri výpočte R2 sme počítali s napätím, ktoré vzniká na tranzistore medzi kolektorom a emitorom U_{CE} s odpočtom napätia U_{BE} . Ak nemáme U_{BE} dané, platí veľkosť napätia 0,8V (predvolená hodnota).

h_{FE} Classification

Classification	A	B	C
h_{FE}	110 ~ 220	200 ~ 450	420 ~ 800

Obr. 15 Zosilnenie tranzistora podľa označenia BC546A, BC546B a BC546C

Odpoveď:

Rezistor R1 = 14k Ω a rezistor R2 = 100 Ω

Na záver zistíme, aká by bola veľkosť rezistora R2, ak by sme nezanedbali prúd tečúci do rezistora R1:

$$I_{R2} = I_C + I_{R1} = 0,05A - 0,0003A = 0,0503A;$$

$$R2 = U_{R2} / I_{R2} = 5V / 0,0503A = 99,4\Omega;$$

Pri rade rezistorov E24 máme na výber iba dva rezistory 91 Ω a 100 Ω . Samozrejme použijeme rezistor 100 Ω , ktorý je výsledku najbližšie.

Príklad 3 – zosilňovač v triede A s kladným a záporným výstupom:

Vypočítajte rezistory v obvode na obr. 16. Jedná sa zosilňovač v triede A, kde tranzistor bude otvorený tak, aby nám vznikli tri rovnako veľké napätia U_{CE} , U_{R2} a U_{R3} .

Dané je: napájacie napätie $U1 = 15V$, $I_C = 50mA$.
použili sme tranzistor BC546B, ktorého zosilnenie je $h_{FE} = 300$ (pozri obr. 15).

Výpočet:

Najprv si rozdelíme napájacie napätie rovnako medzi tranzistor T1 a rezistory R2, R3.

$$U_{CE} = U_{R2} = U_{R3} = U1 / 3 = 15V / 3 = 5V;$$

Prúd ktorý tečie kolektorom tečie aj rezistorom R2 a R3. Pozor! Rezistorom R3 bude tiecť okrem kolektorového prúdu aj bázový $I_E = I_C + I_B$. Ako v predošlom príklade aj tu platí, že bázový prúd ku kolektorovému prúdu je zanedbateľný, preto sa nim zaoberať nemusíme. Pri zosilnení $h_{FE} = 300$ ide o chybovosť výpočtu len 0,3%.

$$I_{R2} = I_{R3} = I_C = 50mA = 0,05A;$$

$$R2 = U_{R2} / I_{R2} = 5V / 0,05A = 100\Omega ;$$

$$R3 = U_{R3} / I_{R3} = 5V / 0,05A = 100\Omega ;$$

Pri výpočte napätia na rezistore R1 si treba uvedomiť, že rezistor je napojený na bázu a tá je spätá s emitorom. Prúd ktorý vchádza bázou, vychádza emitorom. Z toho môžeme usúdiť, že celkové napätie $U1$ sa rozloží na napätie tranzistora U_{BE} a napätia na rezistoroch R1, R3.

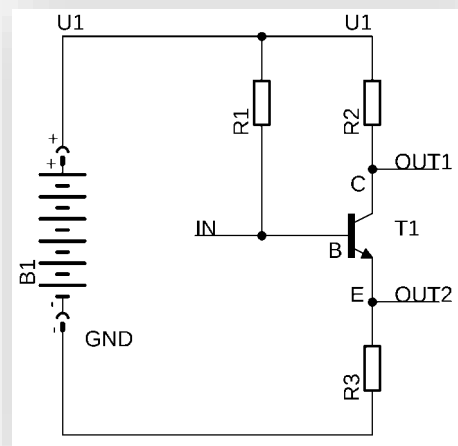
$$U_{R1} = U1 - U_{BE} - U_{R3} = 15V - 0,8V - 5V = 9,2V;$$

$$I_{R1} = I_B = I_C / h_{FE} = 0,05 / 300 = 0,00017A;$$

$$R1 = U_{R1} / I_{R1} = 9,2V / 0,00017A = 54117\Omega = 54k\Omega ;$$

Odpoveď:

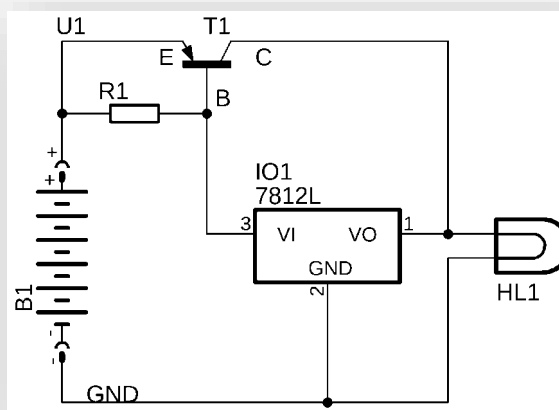
Rezistor $R1 = 54k\Omega$ a rezistory $R2$ a $R3 = 100\Omega$.



Obr. 16

Príklad 4 – rezistor medzi bázou a emitorom:

V prvom rade si treba všimnúť, že v schéme máme tranzistor typu PNP. Keďže emitor je pripojený na zdroj a kolektor tvory výstup, ide o zapojenie so spoločným emitorom. Tým, že je emitor priamo pripojený na kladný pól, je teda najkladnejší zo všetkých elektród. Tým aj od bázy. Vieme, že tranzistor PNP sa používa vtedy, keď tranzistor ovládame práve záporným napätím bázy (báza je zápornejšia od emitora). Princíp tohto zapojenia tkvie v rezistore R1, ktorý vlastne prevádza prúd na napätie. Nim sa otvára tranzistor a ten následne vypomáha svojím prúdom stabilizátoru. Okrem zdrojov sa tento princíp používa aj pri audio zosilňovačoch.



Obr. 17
(princiálna schéma)

V obvode použijeme tranzistor typu 2SC5200, ktorého prevodová charakteristika $U_{BE} - I_C$ je na obr. 5. Stabilizátor IO1 znesie maximálny prúd 1A. Vypočítajte rezistor R1 tak, aby obvod bol schopný dodať do lampy (žiarovky) 11A.

Výpočet:

Pri výstupnom prúde 11A sa rozdelí prúd na 1A, ktorý bude tiecť stabilizátorom IO1 a 10A, ktorý bude tiecť tranzistorom T1. Prúd stabilizátora prechádza rezistorom R1, ktorý v podstate funguje ako „odporník“ (výkonový rezistor s malým odporom, na ktorom sa meria napäťová strata). Podľa veľkosti stratového napätia na rezistore sa bude otvárať tranzistor.

Vieme, že ak stabilizátorom bude tiecť 1A, tranzistor musí dodávať 10A. V prevodovej charakteristike na obr. 5 sme vyčítali, že tranzistor 2SC5200 pri kolektorovom prúde 10A potrebuje mať napätie na báze $U_{BE} = 1V$.

Zo schémy vyplýva:

$$U_{R1} = U_{BE} = 1V; \quad I_{R1} = I_{IO1} = 1A;$$

$$R1 = U_{R1} / I_{R1} = 1V / 1A = 1\Omega;$$

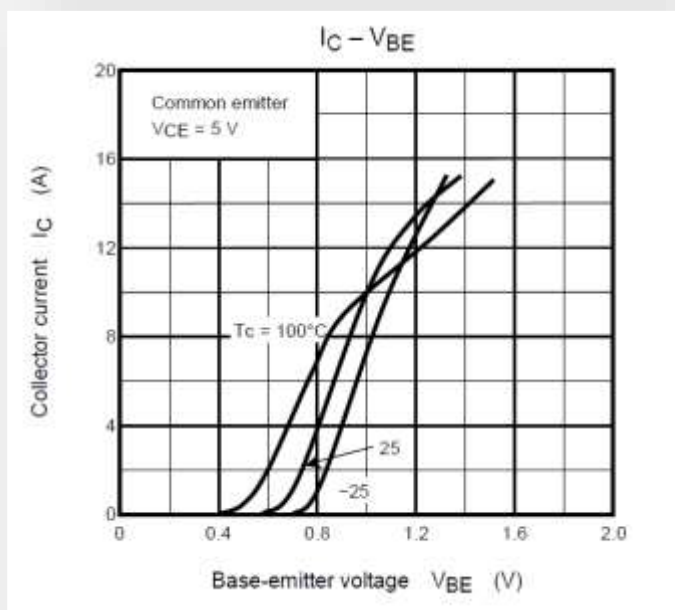
Pri odporníkoch aj tranzistoroch je nutné zistiť (vypočítať) stratový výkon:

$$P_{R1} = U_{R1} \times I_{R1} = 1V \times 1A = 1W;$$

Stratový výkon tranzistora nedokážeme vypočítať keďže nie je dané napájacie napätie U_1 .

Odpoveď:

Rezistor $R1 = 1\Omega$ o výkone 1W.



Obr. 5

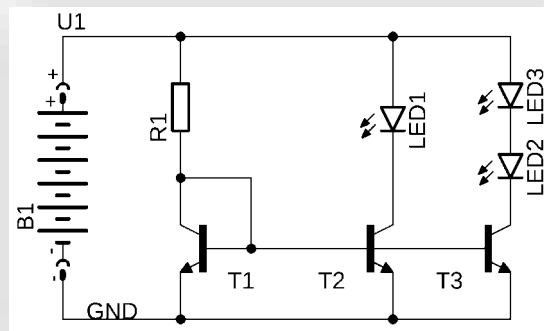
Príklad 5 – prúdové zrkadlo:

Na obr. 17 je schéma zapojenia prúdového zrkadla. Úlohou tohto zapojenia je preniesť požadovaný prúd z prvého tranzistora na ďalšie tranzistory. V princípe ide zasa len o využitie prevodu U_{BE} na I_C .

Prvý tranzistor je zapojený tak, že prevádza kolektorový prúd na napätie báza-emitor U_{BE} . Aj v tomto prípade ignorujeme prúdy tečúce do báz tranzistorov. Pri zosilnení $h_{FE} = 500$, prúd bázy odoberá percentuálne 0,2% z I_C

kolektorového prúdu. Pri troch tranzistoroch to činí 0,6%. Takáto odchýlka môže vzniknúť aj pri zaokrúhľovaní čísel pri výpočte. Preto nemá zmysel sa ďalej zaoberať báзовým prúdom. Pri tomto zapojení je najdôležitejšie, aby všetky tranzistory boli toho istého typu. Dokonca, najlepšie by bolo, keby boli tej istej série.

Výhoda tohto zapojenia spočíva v tom, že tranzistory T2 a T3 sa správajú ako zdroje prúdu. Teda absolútne nezáleží na napätí záťaže. V schéme je to demonštrované iným počtom LED v jednotlivých vetvách.



Obr. 18

Dané je napájacie napätie je $U_1 = 10V$, požadovaný prúd LED je 10mA. Vypočítajte rezistor R1. (Napätie U_{BE} nie je v zadani definované. Preto si zvolíme predvolenú hodnotu 0,8V).

Výpočet:

Prúd LED je $I_{LED} = 10mA$. Je to v podstate požadovaný prúd, ktorý musí tiecť aj rezistorom R1. Napätie na R1 sa vypočíta z napájacieho napätia a straty na U_{BE} (tranzistora T1).

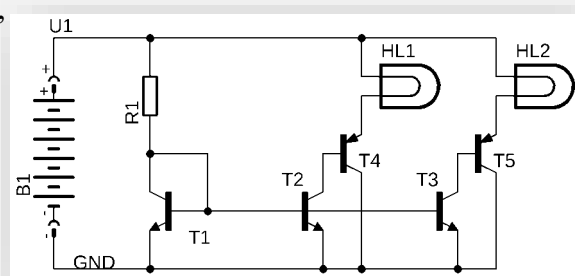
$$I_{R1} = I_{LED} + I_{B(T1)} + I_{B(T2)} + I_{B(T3)} = 10mA = 0,01A;$$

$$R1 = (U_1 - U_{BE}) / I_{R1} = (10V - 0,8V) / 0,01A = 920\Omega;$$

Odpoveď:

Rezistor $R1 = 920\Omega$.

Zapojenie s prúdovým zrkadlom môžeme obohatiť o tranzistor v zapojení so spoločným kolektorom. Keďže bázy tranzistorov T4 a T5 sú ovládané záporným napätím, je potrebné použiť tranzistory typu PNP. V tomto zapojení priamo tranzistory T4 a T5 zosilňujú prúd zo prúdového zrkadla zosilnením h_{FE} . Takto môžeme s pomerne malým prúdom ovládať napríklad výkonové lampy.



Obr. 19

Ak použijeme tranzistory BCP5210 so zosilnením $h_{FE} = 100$, tak pri vypočítanom rezistore R1 a prúde 10mA nám do lampa bude tiecť prúd $I_C = I_B \times h_{FE} = 0,01A \times 100 = 1A$. Takýmto spôsobom dokážeme ovládať viacero spotrebičov (lampa) jedným rezistorom (popríklad potenciometrom).

Je treba mať na pamäti, že minimálna strata na jednom tranzistore medzi kolektorom a emitorom je 0,8V. Ak sú tranzistory za sebou v kaskáde ako T2 a T4, je nutné počítať so stratou minimálne 1,6V. Teda pri napájaní 10V sa do lampy dostane maximálne 8,4V.

Príklad 6 – zdroj prúdu:

Pri zapojení tranzistora so spoločným emitorom sa môžeme niekedy stretnúť s rezistorom medzi emitorom a napájaním. Tento rezistor núti tranzistor aby sa privrel, ak ním tečie veľký prúd. Jedná sa o akúsi prúdovú ochranu. Často takéto zapojenie rezistora nájdeme vo výkonových zosilňovačoch. Ich úlohou je chrániť koncový stupeň proti preťaženiu. Rezistor R1 a zenerová dióda tvoria konštantné napätie na báze. Čím väčší prúd bude pretekať silovou vetvou tranzistora I_C a rezistorom R2, tým väčšia napäťová bude strata na rezistore R2. Napätie na R2 môže narastať iba do vtedy, kým bude rozdiel medzi bázou a emitorom U_{BE} väčší ako 0,8V. Potom sa už tranzistor začne uzatvárať, čím obmedzí tečúci prúd tranzistorom aj rezistorom.

Je dané napájacie napätie $U_1=10V$. Požadovaný prúd LED je 10mA. Použili sme tranzistor NPN BC546A so zosilnením $h_{FE} = 150$. Zenerová dióda D1 stabilizuje napätie 2V. Vypočítajte rezistory R1 a R2.

Výpočet:

Najprv si vypočítame rezistor R1. Prúd ktorý ním tečie sa rozdeľuje na dva vetvy. Jedná

Vetva tečie zenerovou diódou D1 a druhá bázou tranzistora. Preto je pre nás podstatný odber bázy. $I_B = I_C / h_{FE} = 10mA / 150 = 0,07mA$. Takýto prúd stačí, aby sme rozsvietili LED na 10mA. No my potrebujeme trochu pevnejší zdroj napätia. Preto si zvolíme prúd tečúci rezistorom R1 aspoň 1mA. Napätie na rezistore môžeme vypočítať z celkového napätia a úbytku napätia, ktoré vznikne na zenerovej dióde D1. $U_{R1} = U_1 - U_{D1} = 10V - 2V = 8V$.

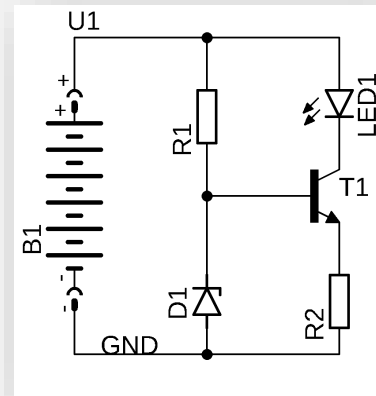
$$R1 = U_{R1} / I_{R1} = 8V / 0,001A = 8000\Omega = 8k\Omega;$$

Na výpočet rezistora R2 potrebujeme vedieť prúd a napätie. Prúd poznáme, keďže ide o vetvu so záťažou (LED1) a tou preteká požadovaný prúd 10mA. (Aj v tomto zapojení sme ignorovali bázový prúd, ktorý prechádza cez emitor a následne aj rezistorom R2.) Napätie na rezistore R2 sa rovná rozdielu napätia na dióde D1 (nášmu referenčnému napätiu 2V) a strate na prechode tranzistora medzi bázou a emitorom U_{BE} . Podľa prevodovej charakteristiky kolektorového prúdu na bázové napätie môžeme vyčítať, že pri odbere 10mA je napätie bázy $U_{BE} = 0,73V$. (Vyčítané z obr. 11, zelený krúžok)

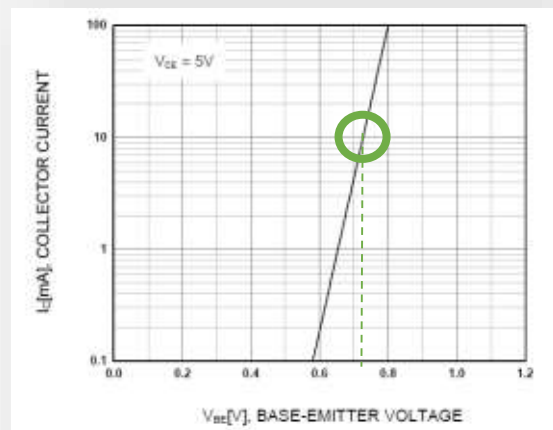
$$R2 = (U_{D1} - U_{BE}) / (I_C + I_B) = (2V - 0,73) / 0,01A = 127\Omega;$$

Odpoveď:

Rezistor $R1 = 8k\Omega$ a rezistor $R2 = 127\Omega$.



Obr. 20

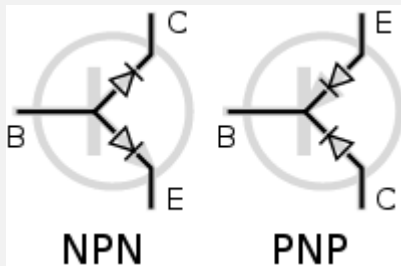


Obr. 11 – BC546 prevod medzi I_C a U_{BE}

Meranie tranzistorov

Tranzistor sa navonok javí ako dva diódy. Preto jeho funkčnosť je možné overiť meracím prístrojom, napríklad „diódovým testom“. No treba dávať pozor, lebo niekedy sa síce takýmto meraním tranzistor javí ako dobrý, ale v obvode je nefunkčný.

Pri kremíkovom tranzistore musia byť namerané hodnoty približne 650mV. Ak je nameraná hodnota 0mV, tranzistor je prerazený. Naopak, ak sa nám nepodari namerať žiadnu hodnotu, tranzistor je prepálený.



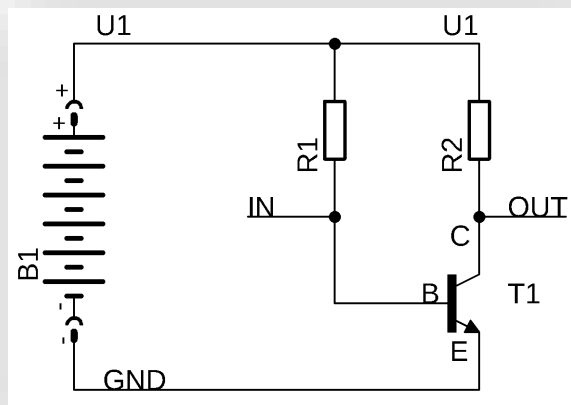
Overenie vedomostí

1. Čo je tranzistor?
2. Ak chceme použiť tranzistor ako spínač, použijeme zapojenie so spoločným:
3. Ako môžeme tranzistor dostať do saturácie?
4. Silová (alebo spínacia) vetva je medzi elektródami:
5. Tranzistor typu NPN má šípku smerom:
6. Napíšte vzťah na výpočet prúdového zosilnenia:
7. Ovládacia (riadiaca) elektróda tranzistora sa nazýva:
8. Zapojenie tranzistora, ktoré zosilňuje prúd na úkor malej napäťovej straty je zapojenie so spoločným:
9. Pre otvorenie tranzistora PNP, je nutné na riadiacu priviesť napätie (polarity):
10. Vypočítaj rezistory v obvode podľa obrázka, ak je dané:

$U_1 = 40V$; $I_C = 100mA$;

$U_{BE} = 0,8V$; $h_{FE} = 100$;

Pracovný bod tranzistora je v strede prevodovej charakteristiky: $U_{CE} = U_{R2}$



Výsledky overenia vedomostí:

1. Tranzistor je polovodičová súčiastka, ktorá nám slúži ako zosilňovač; 2. emitorom; 3. zväčšeným prúdom bázy: $I_B > I_C / h_{FE}$; 4. kolektor – emitor; 5. von z tranzistora; 6. $I_B = I_C / h_{FE}$; 7. báza; 8. kolektorom; 9. záporne; 10. $R_2 = U_{R2} / I_{R2} = 20V / 0,1A = 200\Omega$; $R_1 = U_{R1}/I_{R1} = (U_1 - U_{BE})/(I_C / h_{FE}) = 39,2V/0,001A = 39200\Omega = 39k\Omega$.

Rev. 1

Spojená škola Sabinov, SNP16

Vladimír Višňovský, Lipany (c) 2021