

# Číslicová elektronika

Pavol Galajda, KEMT, FEI, TUKE

Pavol.Galajda@tuke.sk

## Základné vlastnosti, parametre, aplikácia pasívnych a polovodičových prvkov, modely prvkov a ich využitie pri analýze a syntéze jednoduchých elektronických obvodov.

**Elektronikou** rozumieme odvetvie fyziky, ktoré sa zaoberá vedením elektrického prúdu a príbuznými javmi v tuhých látkach - kovoch, polovodičoch, dielektrikách, v kvapalinách a v ionizovaných plynoch. Do elektroniky ďalej zahŕňame časť techniky, ktorá sa zaoberá využitím týchto javov pri návrhu a konštrukcii elektronických prvkov a obvodov.

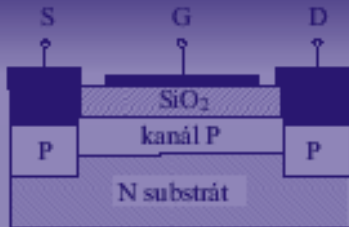
Rozvoj techniky sa začal v druhej polovici 19. storočia. Hlavná pozornosť sa vtedy zamerala na mechanizmy vedenia elektrického prúdu v zriedených plynoch. Toto štúdium viedlo k objavu katódových lúčov (1899). Ďalší výskum ukázal, že katódové lúče sú rýchlo sa pohybujúce záporne nabitú častice, ktoré sa začali približne od roku 1900 nazývať *elektrónmi*.

I keď v prvej etape elektroniky dominovali vákuové elektróny, rozvíjali sa postupne aj elektronické prvky z tuhých látok.

Dôležitým medzníkom v polovodičovej elektronike bol objav tranzistora. Koncom roku 1947 to bol hrotový tranzistor, ktorý objavil J. Barden a W. H. Brattain. V priebehu ďalších mesiacov W. Shockley sformuloval koncepciu *plošného tranzistora* s využitím vlastností *přechodov PN* (pri jeho činnosti sa vyžadujú obidva druhy nosičov náboja - elektróny a diery a preto patrí medzi *bipolárne súčastky*). Nie je bez zaujímavosti, že hrotový a plošný tranzistor sa objavili ako dôsledok experimentov, cieľom ktorých bolo získať *unipolárne súčastky*. Keďže tieto súčastky využívajú efekt poľa, nazývajú sa *tranzistory ovládané elektrickým poľom* a označujú sa FET (Field Effect Transistor).

Spoločne s *integráciou* pokračovala aj *miniaturizácia* súčastok a polovodičová technika vyúsťila tak do svojej súčasnej etapy - *mikroelektroniky*. Polovodičové súčastky a obvody okrem špeciálnych aplikácií (napr. obrazovky) nahradili elektróny.

Ale o tom až neskôr...



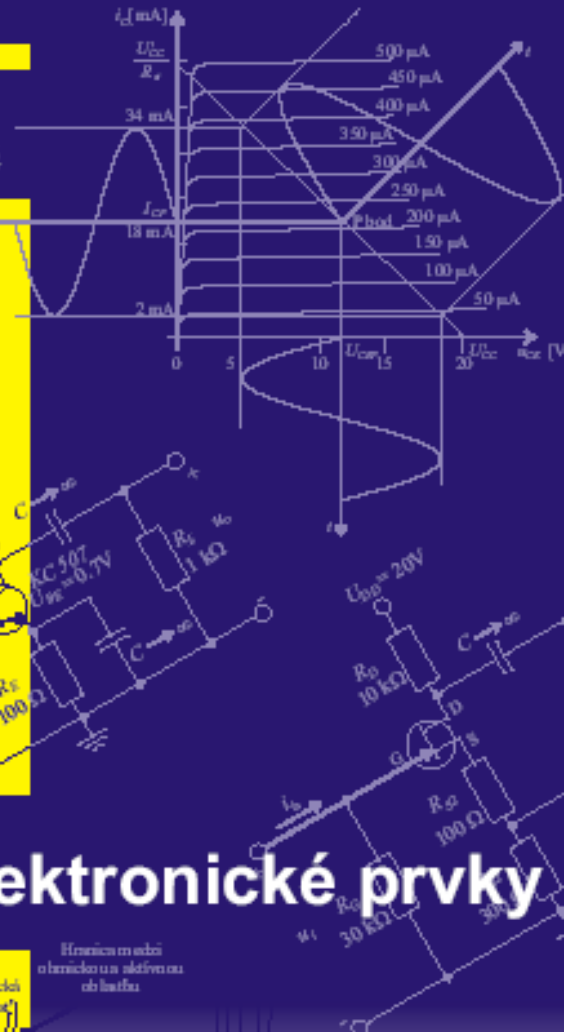
ISBN 80-89061-51-6



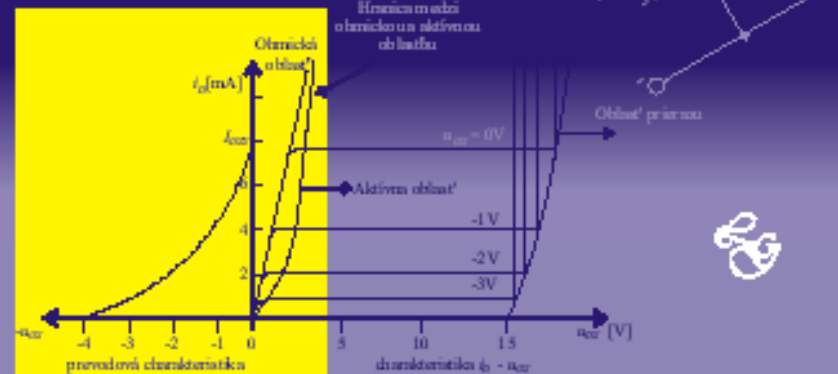
Elektronické prvky

Galajda - Lukáč

Pavol Galajda  
Rastislav Lukáč



Elektronické prvky



# Prečo práve S.O.S Electronic



Viac ako 7000 typov súčiastok priamo na našom sklade...

Rýchle dodávky tovaru...

Široký výber sortiments, prispôbený Vašim požiadavkám...



Vždy máme pre Vás pripravené niečo nové...

Technické poradenstvo, vyškolený personál, kvalitné služby...

Kvalitné služby pre Vás - ISO certifikát...



OnLine Shop... elektronické ceny a skladové množstvá...

Novinky, zauímavosti, akcie...

Komplexné informácie...

4 x ročne časopis...

ISBN 80-89061-59-1



9 788089 761594

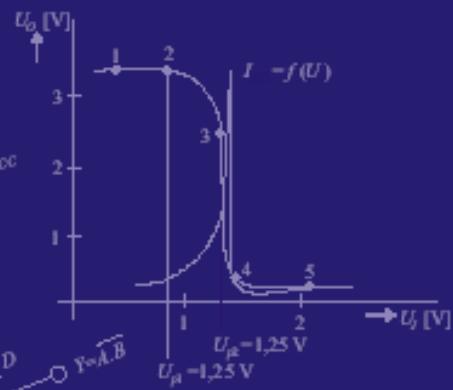
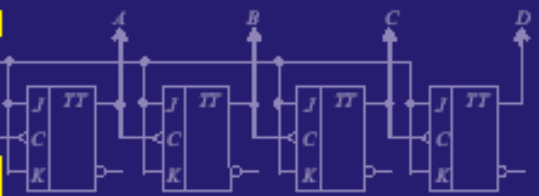
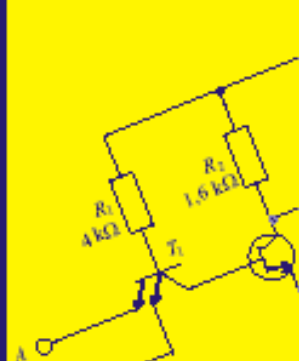
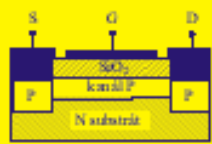
www.soselectronic.sk

S.O.S. electronic, Ždiarska 32, 04001 Košice, tel. 055/623 40 00-4, fax. 055/623 40 07, e-mail: info@sos.sk



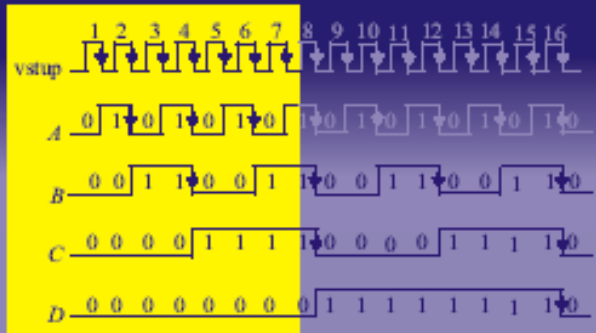
## Elektronické obvody

Pavol Galajda<sup>1)</sup>  
Rastislav Lukáč<sup>2)</sup>



## Elektronické obvody

## Galajda - Lukáč



# 5 Bipolárny tranzistor

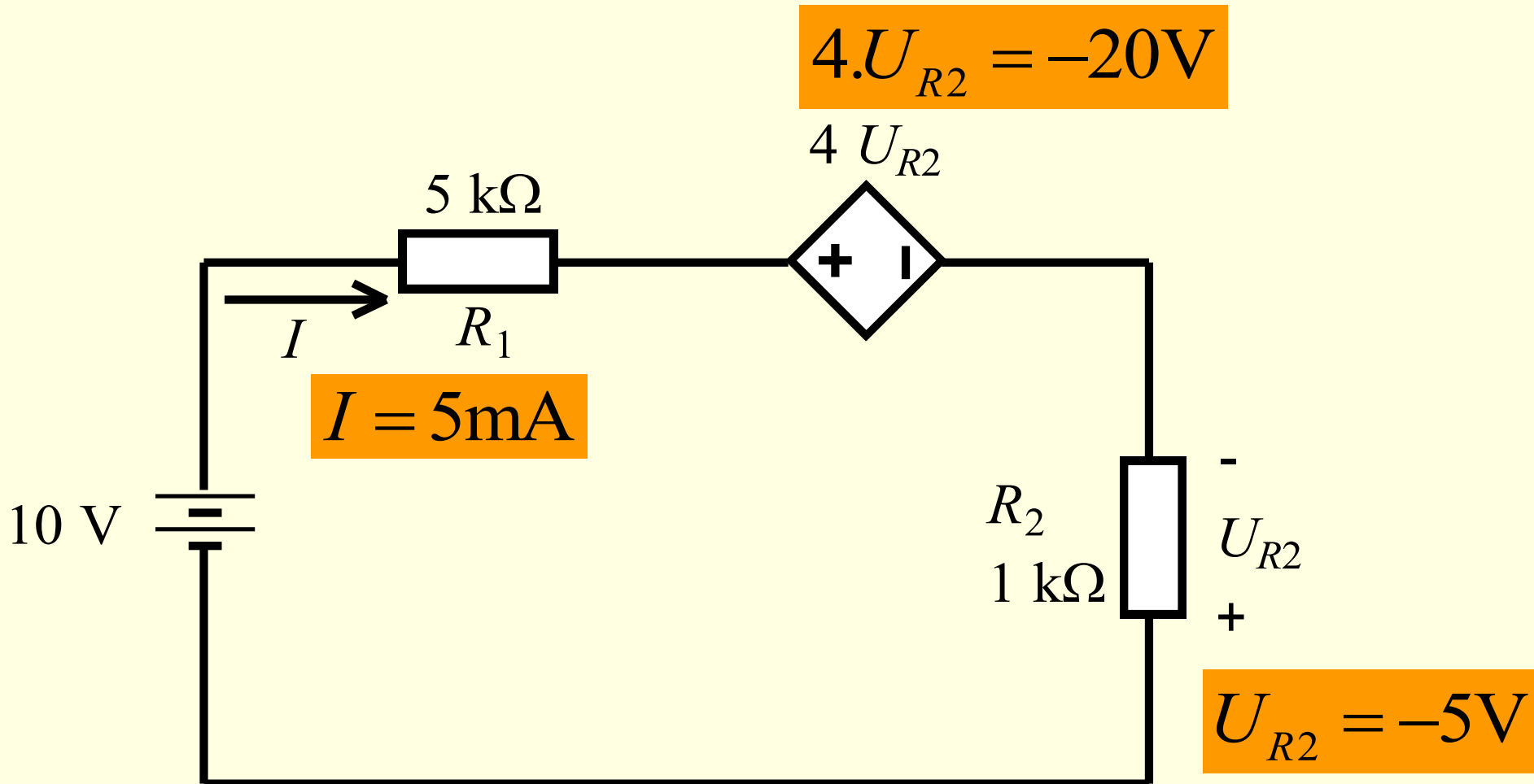
V roku 1948 **John Bardeen**, **Walter H. Brattain** a **William Shockley** z Bellovho telefónneho laboratória skonštruovali a otestovali prvý tranzistor.

Tento „nedokonalý“ prvok s malým ziskom sa dal použiť iba pre laboratórne účely, no v šesťdesiatych rokoch sa výrobné procesy a metódy zdokonalili tak, že s jeho spoľahlivou výrobou nie sú žiadne problémy.

Výkonová zaťažiteľnosť a maximálna pracovná frekvencia sa neustále zlepšovali a tranzistor dnes môže temer úplne nahradiť vákuové elektrónky s výnimkou určitých vysoko výkonových a vf aplikácii.

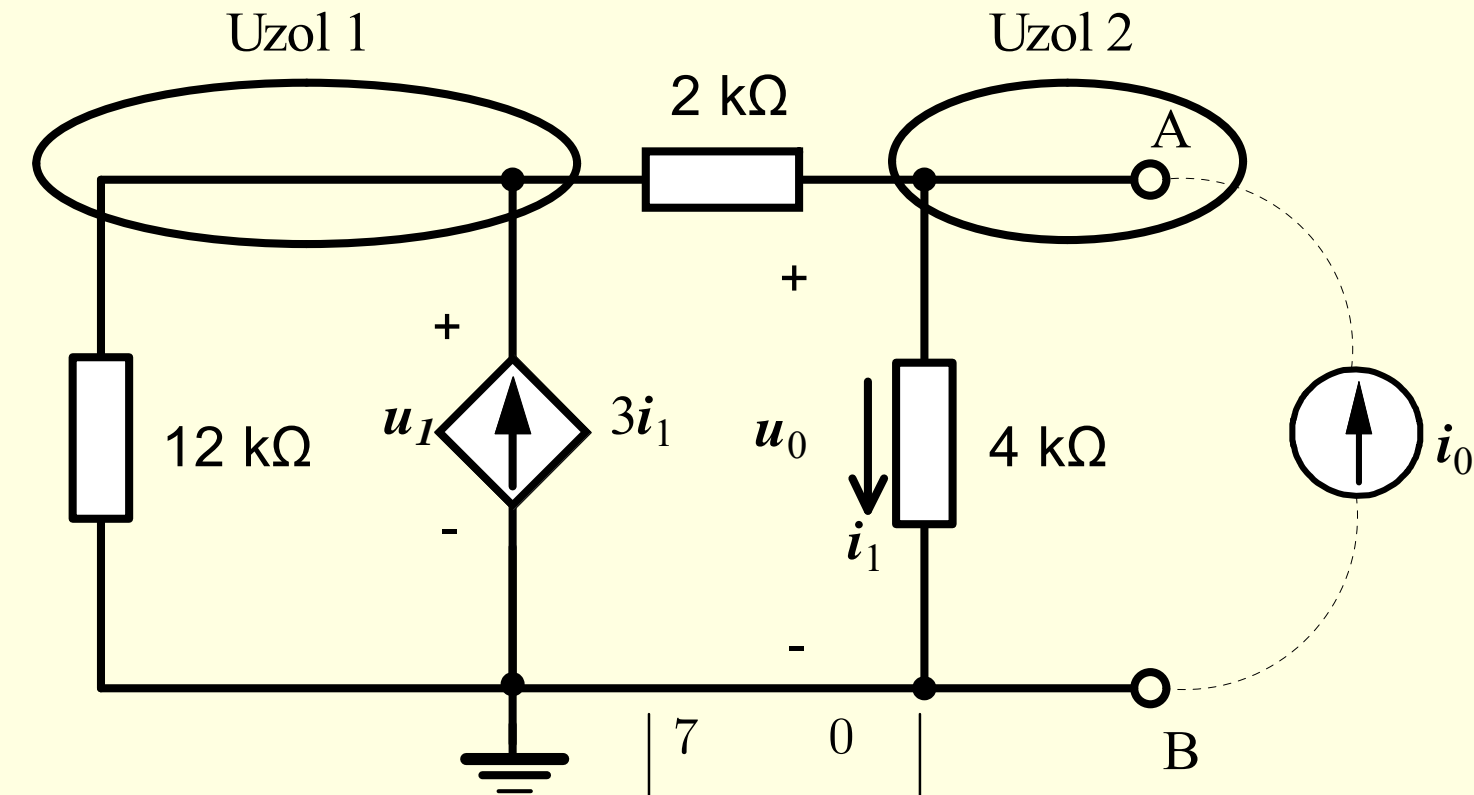
# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.1 Závislé napätové a prúdové zdroje



# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.1 Závislé napätové a prúdové zdroje



$$7u_1 - 15u_0 = 0$$

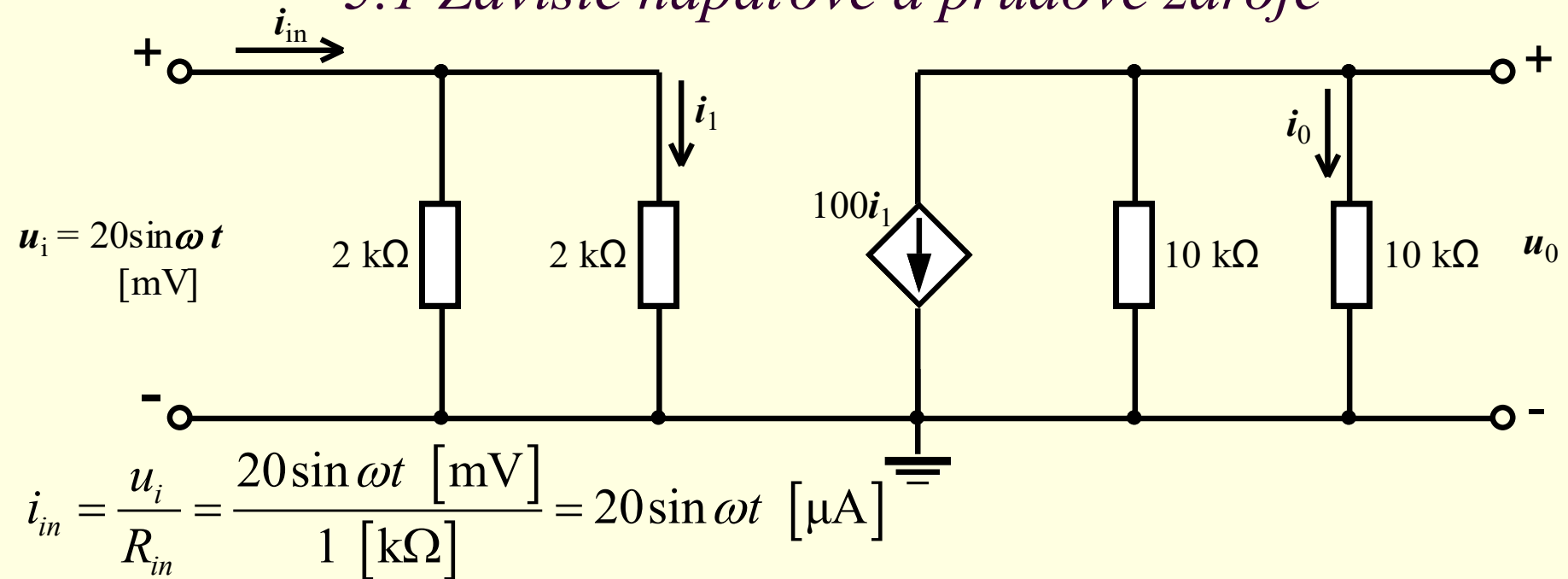
$$-2u_1 + 3u_0 = 4000i_0$$

$$u_0 = \frac{\begin{vmatrix} 7 & 0 \\ -2 & 4000i_0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 7 & -15 \\ -2 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{(28000)i_0}{21 - 30} = (-3110)i_0 \text{ [V]}$$

$$R_N = \frac{u_0}{i_0} = -3,11 \text{ k}\Omega$$

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.1 Závislé napätové a prúdové zdroje



$$i_1 = \frac{2000(20 \sin \omega t \text{ [\mu A]})}{2000 + 2000} = 10 \sin \omega t \text{ [\mu A]}$$

$$u_o = -100i_1(10 \text{ [k}\Omega] \parallel 10 \text{ [k}\Omega]) = -500\,000(10 \cdot 10^{-6} \sin \omega t) = -5 \sin \omega t \text{ [V]}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{-5 \sin \omega t \text{ [V]}}{0.02 \sin \omega t \text{ [V]}} = -250$$
$$\frac{i_o}{i_{in}} = \frac{-50(10 \text{ [\mu A]})}{20 \text{ [\mu A]}} = -25$$

# 5 Bipolárny tranzistor

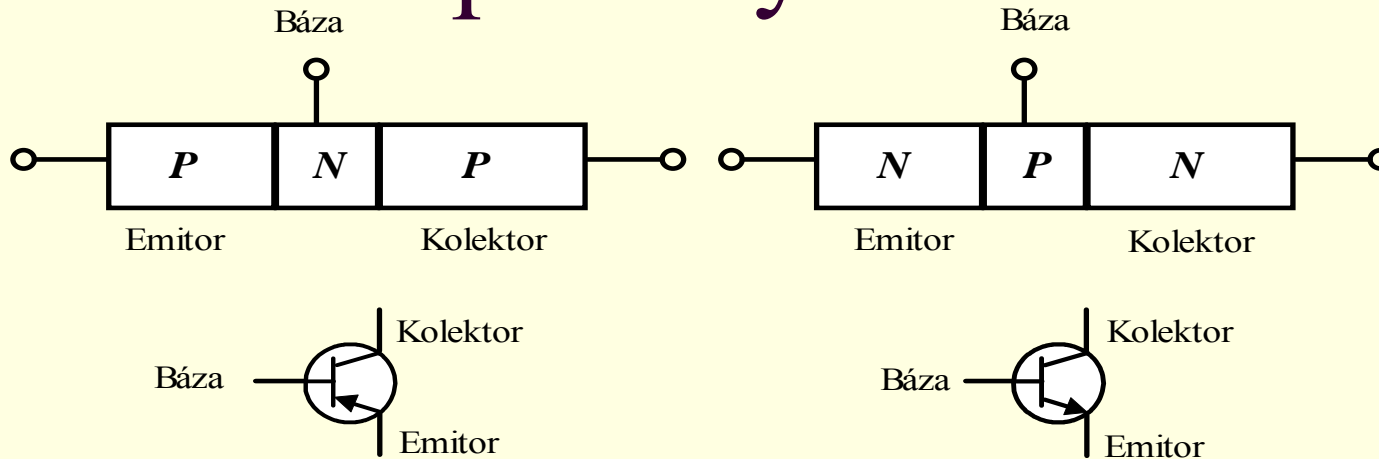
Tranzistor je trojpólový prvok (na rozdiel od diódy, ktorá reprezentuje dvojpól). Dióda pozostáva z materiálov typu P a N. Tranzistor sa skladá z dvoch materiálov typu N oddelených materiálom typu P (NPN tranzistor), alebo z dvoch vrstiev materiálu typu P oddelených materiálom typu N (PNP tranzistor)- nasledujúci Obr. a).

Spomenuté vrstvy alebo časti tranzistora sa označujú ako emitor, báza a kolektor. *Emitor* je bohato dotovaná časť so stredne veľkou vrstvou a je určená na emitovanie elektrónov. *Báza* je stredne dotovaná úzka vrstva, určená na prechod elektrónov. *Kolektor* je slabo dotovaná veľká vrstva určená na zachytávanie elektrónov.

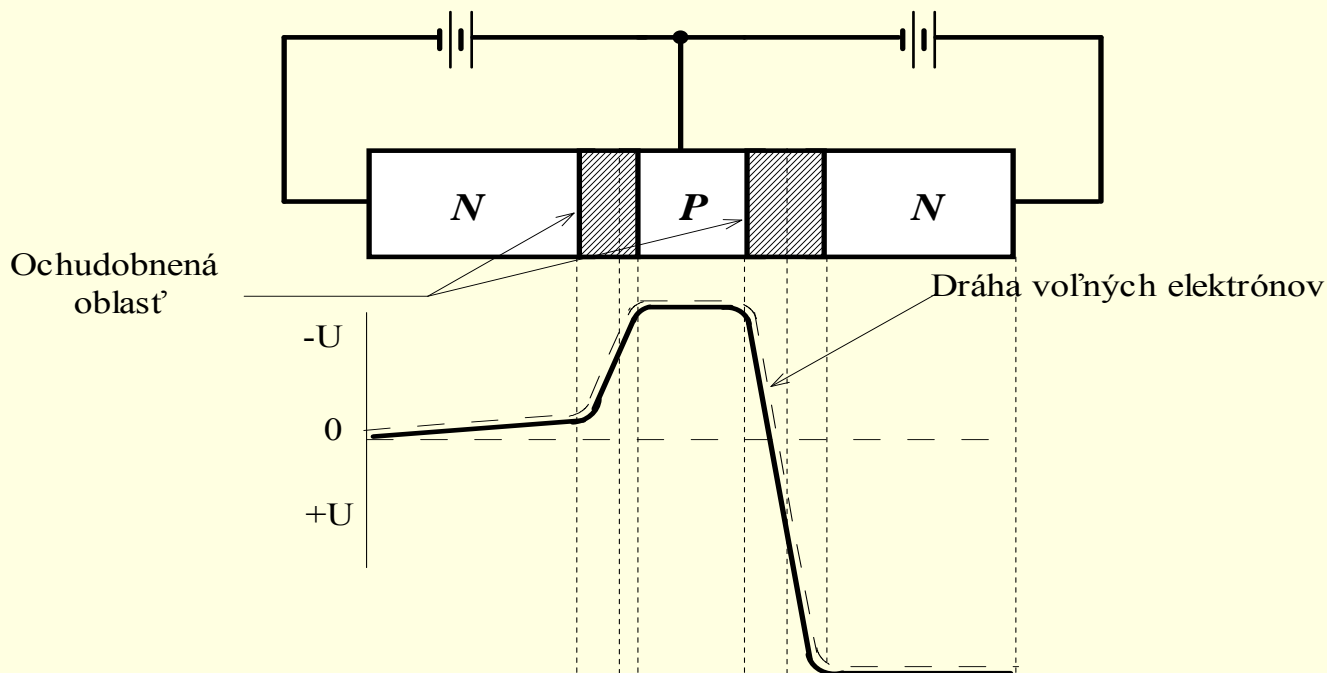
Tranzistor si teda môžeme predstaviť (ideálny pohľad) ako zapojenie dvoch diód PN proti sebe.



# 5 Bipolární tranzistor



a) Schematické značky



b) Pásmový model tranzistora

# 5 Bipolárny tranzistor

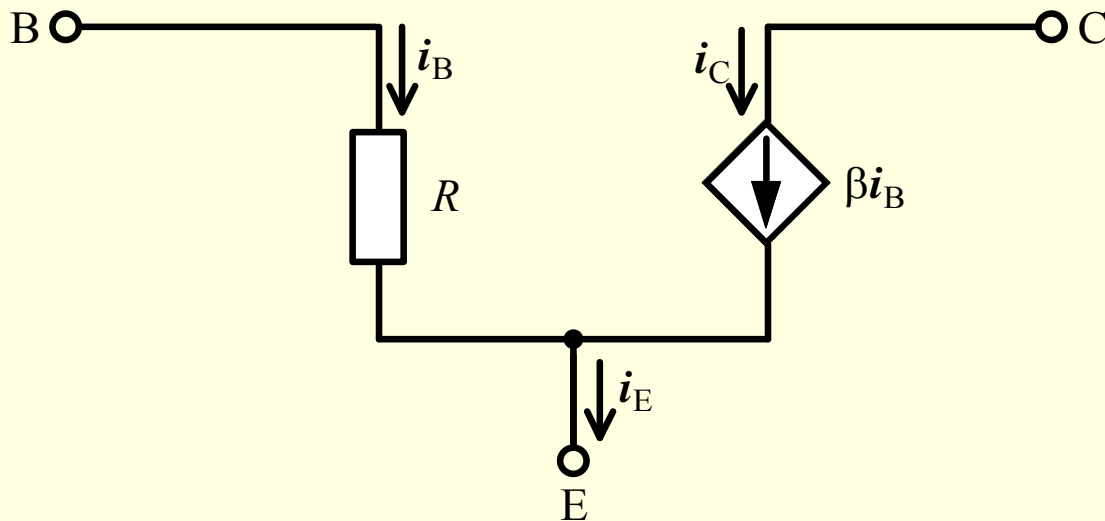
## 5.3 Činnosť tranzistora

Prechod prúdu jednotlivými oblasťami tranzistora môžeme pochopiť skúmaním správania nosičov náboja a vyprázdnených oblastí. Vyprázdnené oblasti sú vyznačené na predchádzajúcom [Obr. b](#)). Z obrázku vidno, že vyprázdnená vrstva priechodu emitor-báza je pomerne úzka vzhľadom na to, že tento priechod je v priamom smere a naopak to platí pre vyprázdnenú oblasť priechodu báza-kolektor. Veľký počet väčšinových nosičov (elektrónov) bude difundovať cez priechod báza-emitor, lebo je v priamom smere. Tieto elektróny potom vstupujú do oblasti bázy a majú dve možnosti. Buď opustia túto oblasť cez vývod k napäťovému zdroju alebo potečú ku kolektorovej oblasti cez širokú vyprázdnenú oblasť priechodu báza-kolektor, ktorý je v spätnom smere. Normálne sa očakáva, že hlavná časť tohoto prúdu potečie do zdroja. Neplatí to však v prípade, keď je oblasť bázy natoľko tenká, že tieto elektróny prejdú menšiu vzdialenosť ku priťahovanému kladnému potenciálu kolektorového kontaktu ako ku bázovému kontaktu. Okrem toho má materiál bázy nízku vodivosť, takže cesta k zdrojovému vodiču predstavuje vysoko impedančnú cestu. V skutočnosti len veľmi malá časť elektrónov opúšťa bázu cez zdrojový kontakt a väčšia časť prúdu tečie do kolektora.

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora

Bipolárny tranzistor vykazuje prúdový zisk, ktorý môžeme využiť na zosilňovanie signálov. Zjednodušený náhradný obvod NPN tranzistora je na Obr. Uvedený zjednodušený model obyčajne postačuje pre návrh a analýzu väčšiny obvodov.



$i_B$  - bázový prúd,

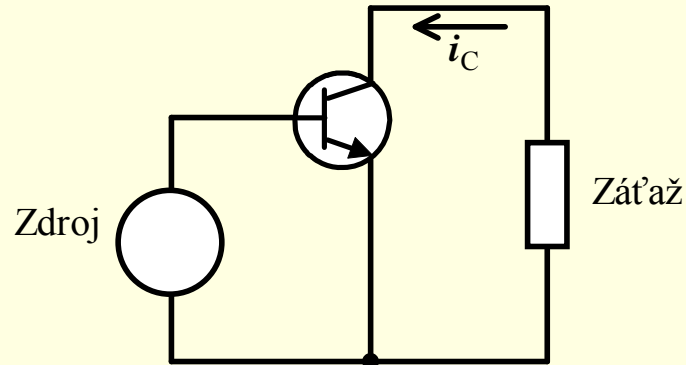
$i_C$  - kolektorový prúd,

$i_E$  - emitorový prúd

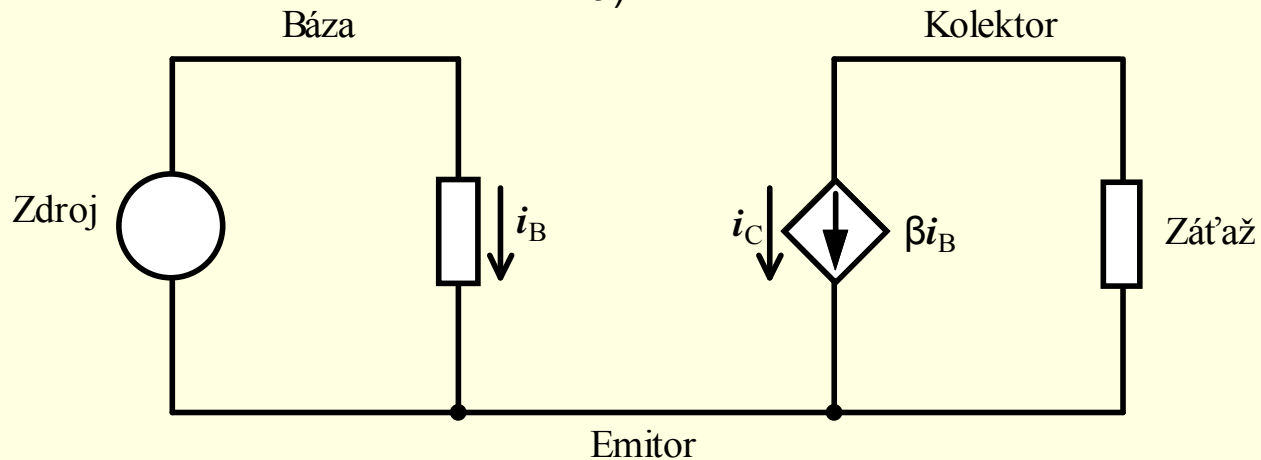
$R$  - odpor medzi bázou a emitorom

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora



a)



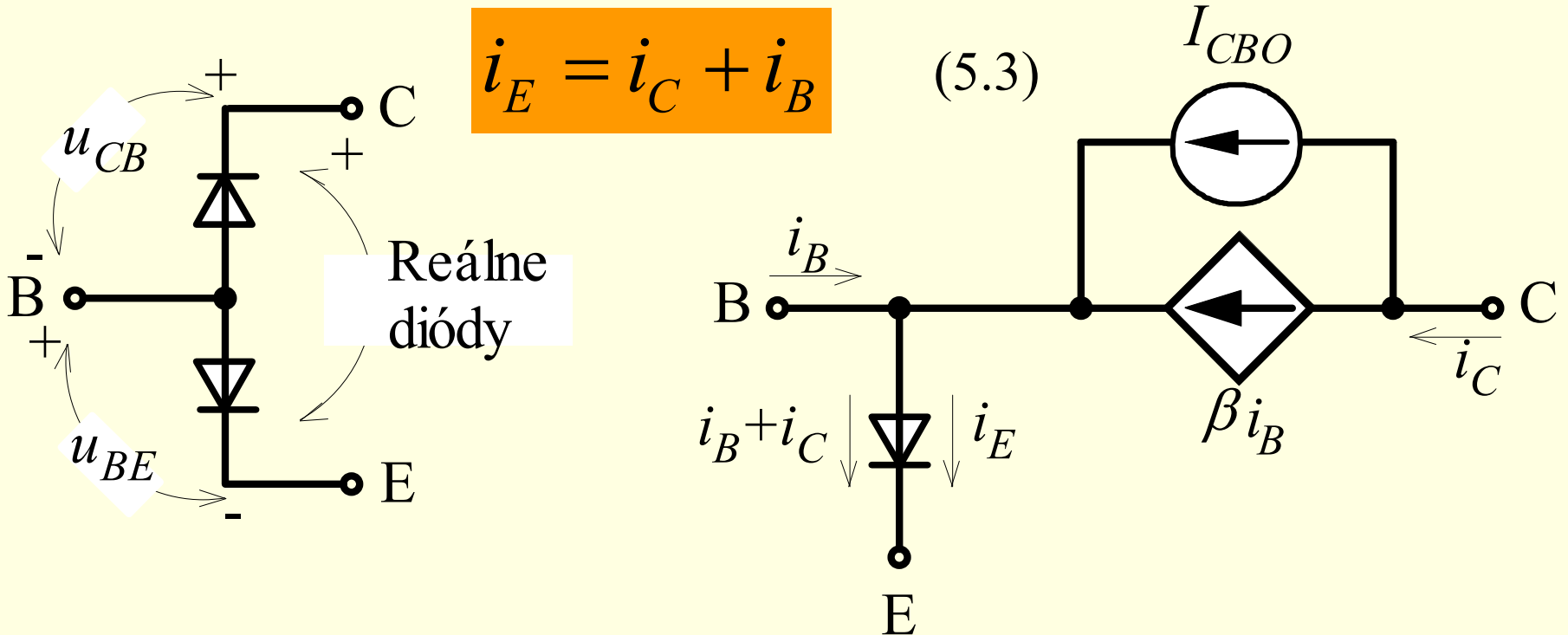
b)

Jednoduchý obvod s tranzistorom vykazujúci prúdový zisk. Kolektorový prúdový zdroj je teda závislý od bázového prúdu  $i_B$ . Keď  $i_B$  vzrastá, úmerne rastie aj kolektorový prúd  $i_C$ . Konštanta úmernosti sa označuje ako  $\beta$ .

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora

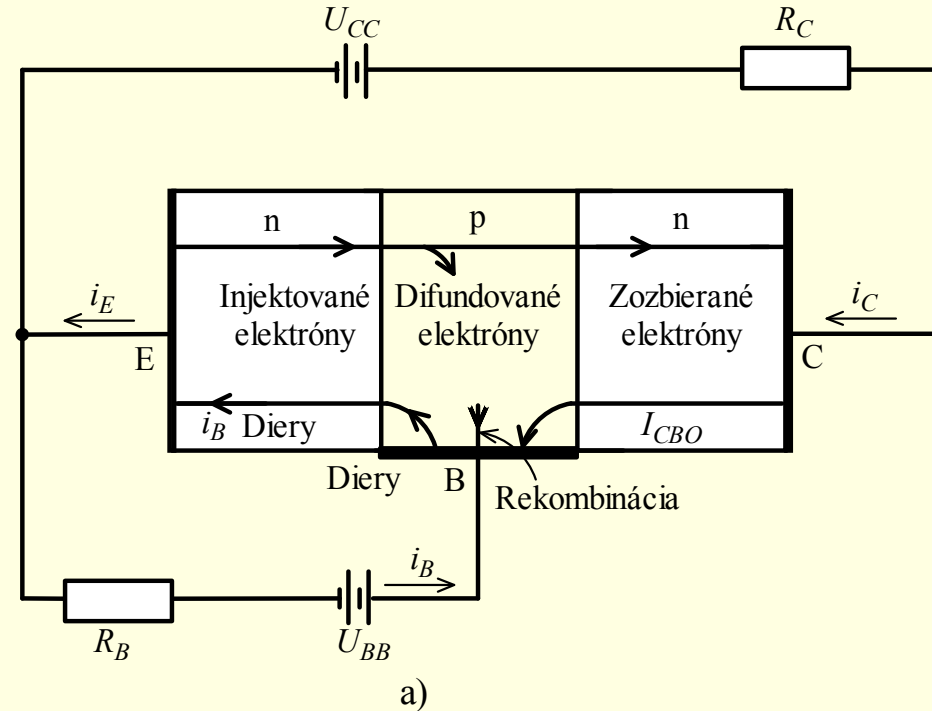
Na Obr. je zdokonalená verzia modelu, známa ako *Ebersov-Mollov model*. Priebeh báza-emitor sa chová ako dióda v priamom smere, ktorou tečie prúd  $i_B + i_C$ . Priebeh báza-kolektor je v spätnom smere a vykazuje malý zvyškový prúd  $I_{CBO}$  a väčší prúd  $\beta i_B$ . Prúd  $\beta i_B$  je vyvolaný prúdom v báze. Potom:



# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora

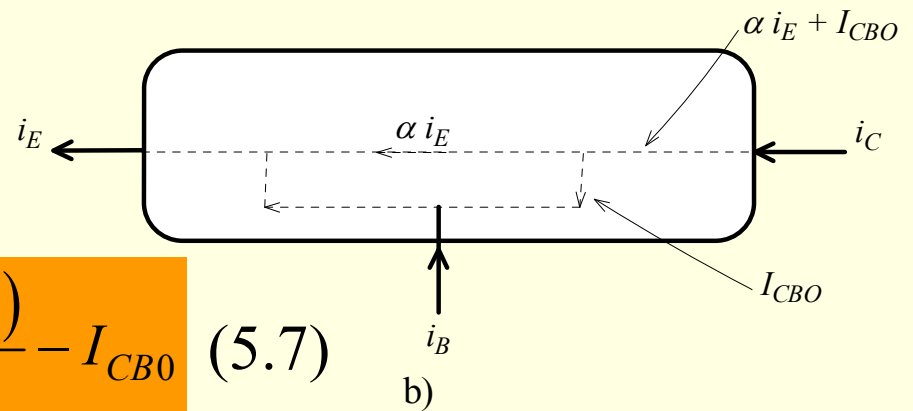
*Prúdový zosilňovací činiteľ  $\alpha$  v zapojení so spoločnou bázou (SB) je definovaný ako pomer zmeny kolektorového prúdu k zmene emitorového prúdu za predpokladu, že napätie medzi kolektorom a bázou je konštantné. Teda:*



$$\alpha = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_{u_{CB} = \text{konšt.}}$$

$$i_C = \alpha i_E + I_{CB0} \quad (5.4)$$

$$i_B = \frac{(i_C - I_{CB0})(1 - \alpha)}{\alpha} - I_{CB0} \doteq \frac{i_C(1 - \alpha)}{\alpha} - I_{CB0} \quad (5.7)$$



# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora

*Prúdový zosilňovací činiteľ*  $\beta$  v zapojení so spoločným emitorom (SE) je definovaný ako pomer zmeny kolektorového prúdu k zmene bázového prúdu. Teda:

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

Ak diferencujeme rovnicu (5.7) a preusporiadame jej členy, dostávame

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Prúdový zosilňovací činiteľ  $\beta$  nadobúda hodnoty od 10 do 600. Ak vykonáme v rovnici (5.7) substitúciu, dostávame

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} - I_{CB0}$$

Obyčajne však  $I_{CB0}$  môžeme zanedbať vzhľadom na jeho malú hodnotu. Potom

$$i_C \approx \beta i_B \quad (5.8)$$

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.3 Činnosť tranzistora

Činiteľ  $\beta$  označujeme tiež ako *zosilňovací činiteľ veľkých signálov* alebo *zosilňovací činiteľ*. V praxi nie je hodnota  $\beta$  konštantná, ale mení sa v závislosti od prúdu bázy. Teda pri návrhu obvodov s tranzistormi vznikajú problémy s tým, že  $\beta$  nie je konštantná, t.j.  $\beta$  sa mení pri zmene prúdov tranzistora.

Naviac zmena hodnoty  $\beta$  sa vyskytuje aj v rámci jedného výrobného cyklu tranzistora. To znamená, že dva tranzistory vyrobené v tom istom čase budú mať rozdielne hodnoty  $\beta$  pri tých istých prúdových hodnotách. To viedlo k odvodeniu takej procedúry návrhu obvodov s tranzistormi, ktorá zabezpečuje, aby hodnota kolektorového prúdu bola pomerne nezávislá od  $\beta$ .

Ďalšie zjednodušenie, ktoré sa robí pri návrhu obvodov s tranzistormi je, že kolektorový prúd je približne rovný emitorovému prúdu, pretože  $I_{CB0}$  je malý v porovnaní s  $i_C$  a  $\alpha$  sa pohybuje v intervale 0,9 až 0,9999 a teda z rovnice (5.4) dostávame:

$$i_C \approx i_E \quad (5.9)$$



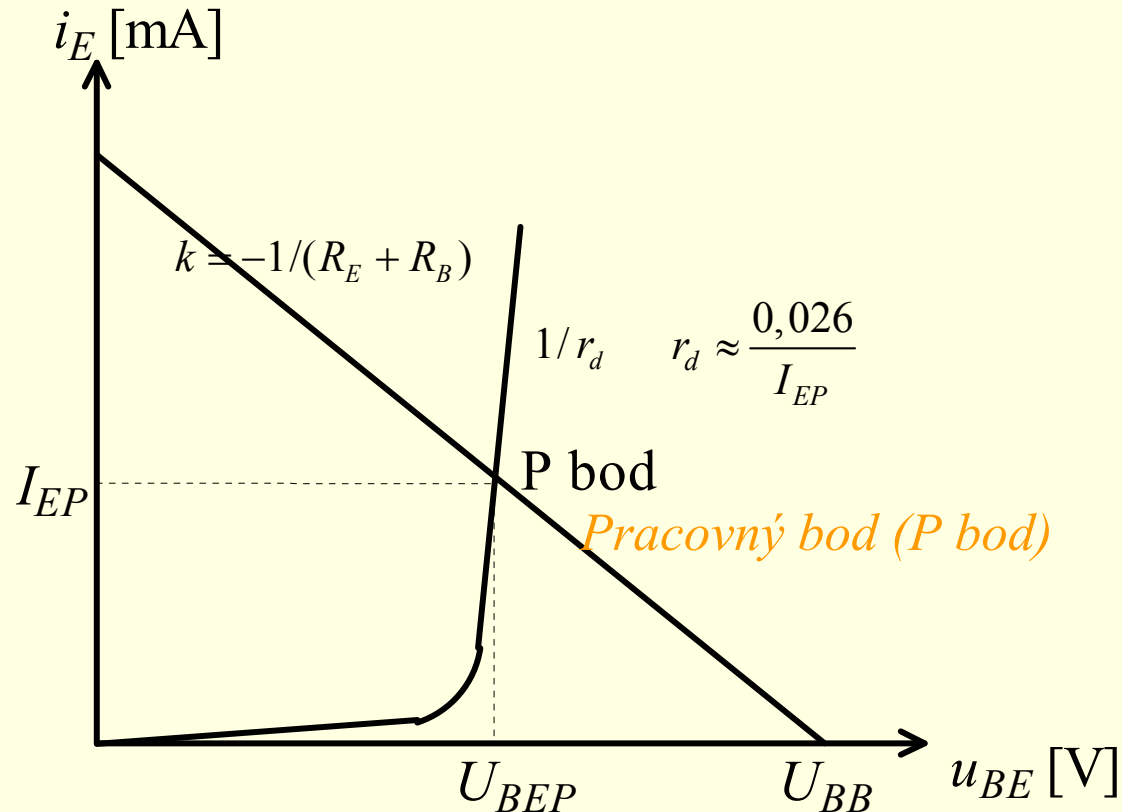
# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.4 Tranzistorové obvody - 5.4.2 Charakteristiky tranzistora

Pretože tranzistor je nelineárny prvok, jeden zo spôsobov, ako môžeme definovať jeho činnosť je použitie charakteristík tranzistora rovnako, ako to bolo v prípade diód v predchádzajúcej kapitole. Rovnice však v tomto prípade budú obsahovať najmenej tri premenné. Obyčajne sa na opis správania tranzistora používajú *parametrické krivky*.

Priamym predĺžením charakt. krivky by sme dostali priesečník s osou  $u_{BE}$  pri

- 0,7V pre kremíkové tranzistory,
- 0,2V pre germániové tranzistory a
- 1,2 V pre gálium arzenidové tranzistory.



$$i_B = \left( \frac{I_0}{\beta} \right) \exp\left( \frac{u_{BE}}{nU_T} \right)$$

a) vstupné charakteristiky tranzistora

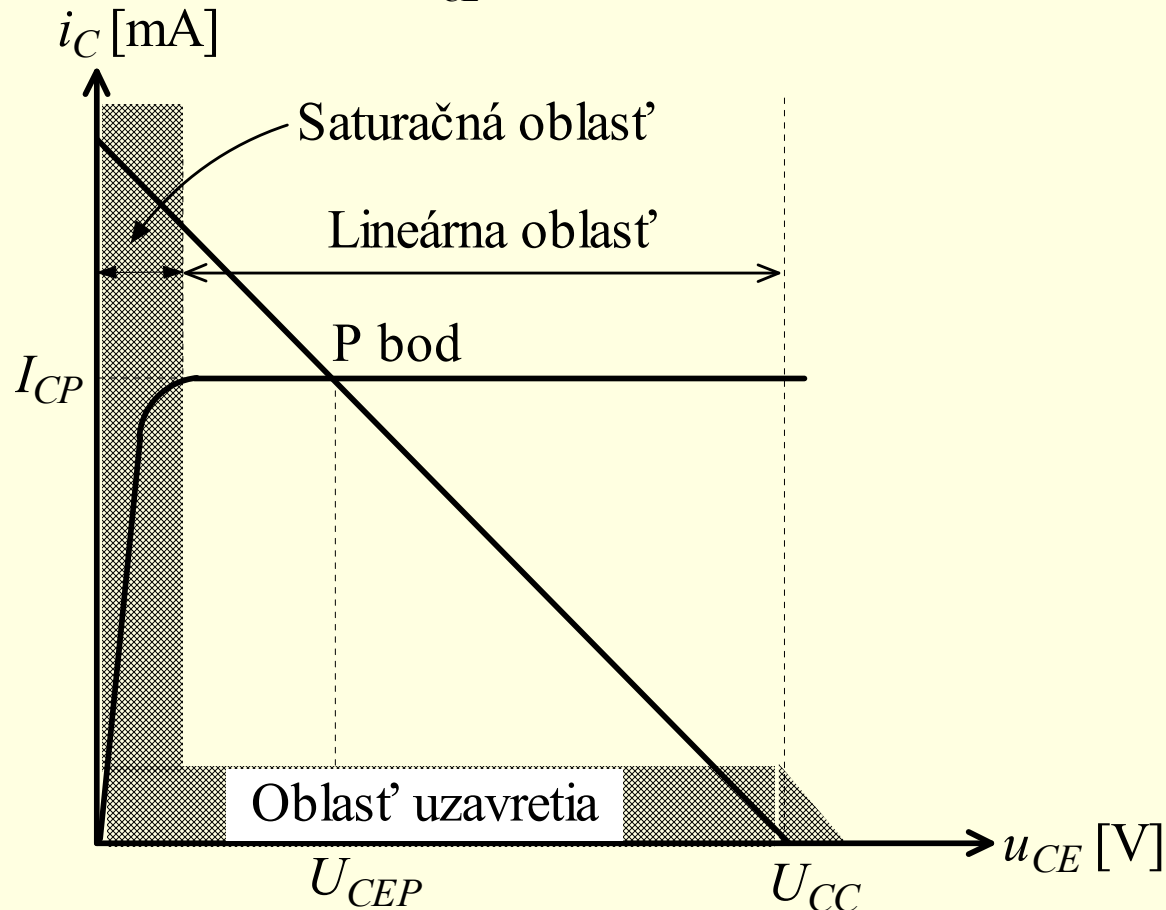
# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.4 Tranzistorové obvody - 5.4.2 Charakteristiky tranzistora

Ak prúd  $i_B$  bude konštantný, potom priechod kolektor-emitor bude charakterizovaný krivkou  $i_C(u_{CE})$  zobrazenej na Obr. b. Ako vidieť z tejto charakteristiky, kolektorový prúd takmer nezávisí od napätia medzi kolektorom a emitorom  $u_{CE}$  v „*lineárnej oblasti*“ činnosti tranzistora.

Keď sa  $i_B$  blíži k nule,  $i_C$  sa približuje k nule nelineárnym spôsobom. Tento režim tranzistora sa označuje ako činnosť v *oblasti uzavretia*.

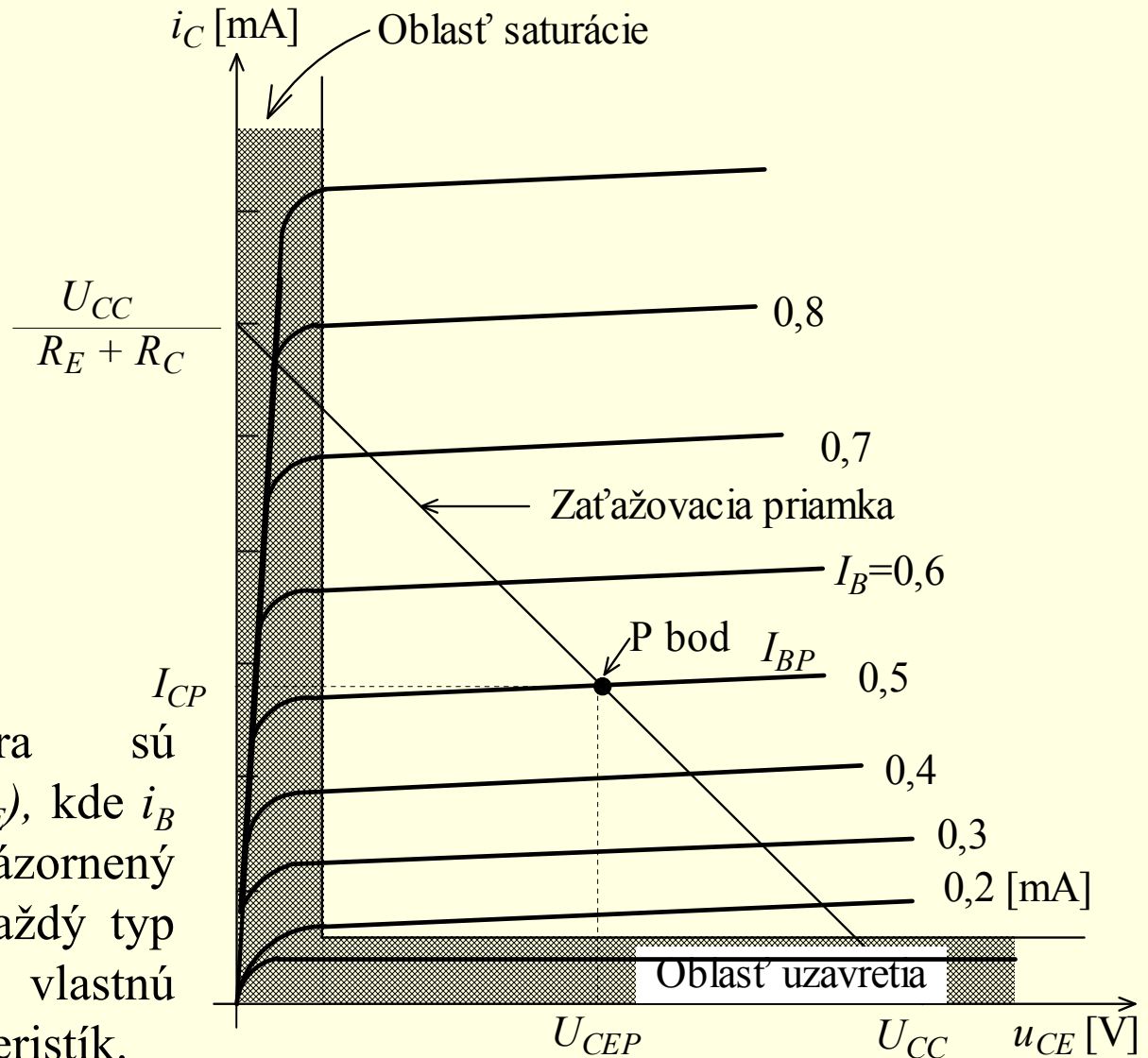
V oblasti charakteristiky, kde  $u_{CE}$  je skoro nulové, dosahuje  $i_C$  svoje maximum. Táto oblasť je známa ako *saturačná oblasť* a z dôvodu nelineárneho priebehu je nevhodná na zosilňovanie.



b) výstupné charakteristiky tranzistora

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.4 Tranzistorové obvody - 5.4.2 Charakteristiky tranzistora



Charakteristiky tranzistora sú parametrické krivky  $i_C = f(u_{CE})$ , kde  $i_B$  je parameter. Na Obr. je znázornený príklad takýchto kriviek. Každý typ tranzistora má svoju vlastnú jednoznačnú sústavu charakteristík.

# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.4 Tranzistorové obvody - 5.4.2 Charakteristiky tranzistora

Použitím II. KZ pre slučku kolektor-emitor dostaneme

$$U_{CC} = i_C R_C + u_{CE} + i_E R_E \quad (5.10)$$

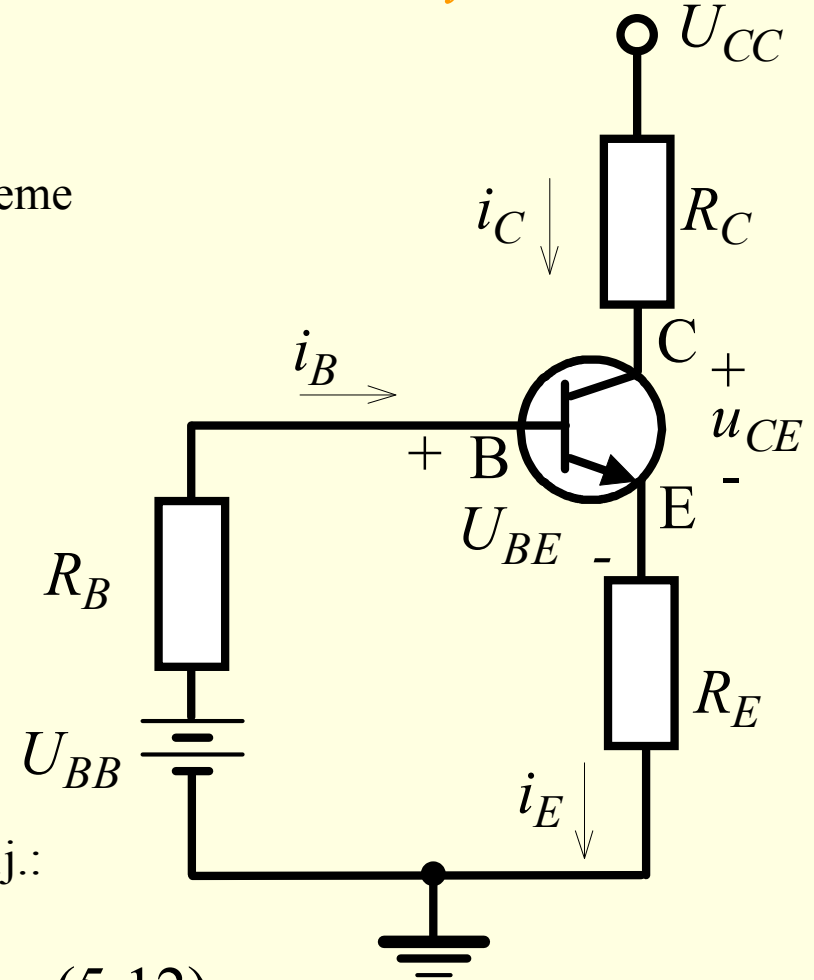
rovnica sa dá zjednodušiť

$$U_{CC} = i_C (R_C + R_E) + u_{CE} \quad (5.11)$$

Rovnica (5.11) definuje závislosť medzi  $i_C$  a  $u_{CE}$ , t.j.:

$$i_C = \frac{U_{CC} - u_{CE}}{R_C + R_E} = -\frac{u_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{U_{CC}}{R_C + R_E} \quad (5.12)$$

$$i_C = 0 \quad \Rightarrow \quad u_{CE} = U_{CC}, \quad u_{CE} = 0 \quad \Rightarrow \quad i_C = U_{CC} / (R_C + R_E)$$

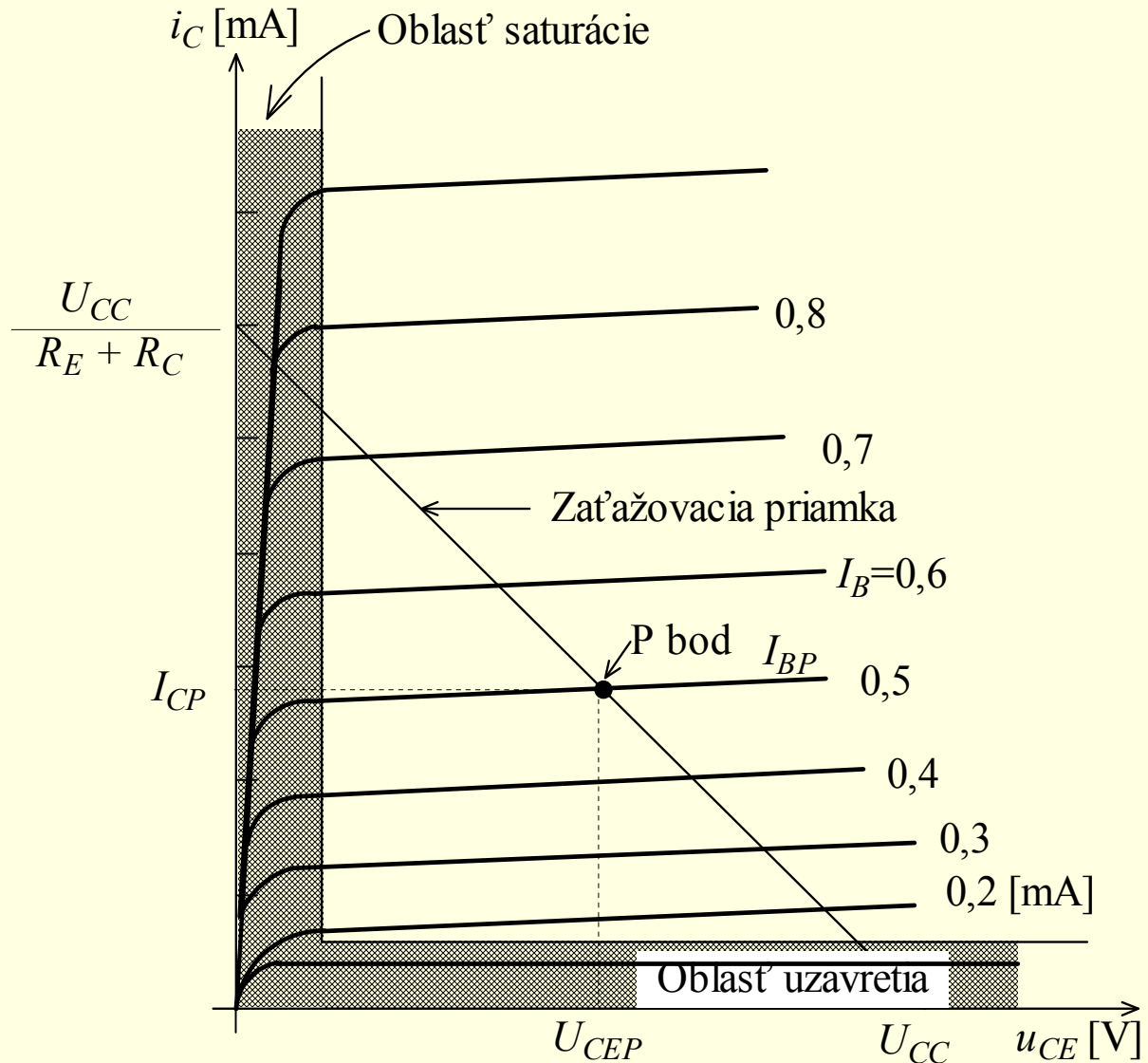


# 5 Bipolárny tranzistor

## 5.4 Tranzistorové obvody - 5.4.2 Charakteristiky tranzistora

Táto jednosmerná zaťaž. priamka je zakreslená do charakteristík na Obr. Keď sa budeme zaoberať návrhom obvodov, ukážeme si, ako správne vybrať parametre obvodu, aby sme dostali požadovanú polohu **pracovného bodu**. Teraz budeme predpokladať, že **pracovný bod (P bod)** môže ležať na ľubovoľnom mieste zaťažovacej priamky.

**Pracovný bod** definuje jednosmerné hodnoty, teda stav bez budenia signálom.



# 5.11 Tranzistor ako spínací prvok

## 5. 11.1 Charakteristiky tranzistora

Na to, aby tranzistor mohol vykonávať funkciu spínača, musí spĺňať nasledovné vlastnosti :

- vo vodivom stave musí mať minimálny odpor,
- v nevodivom stave jeho odpor musí byť veľký,
- prechod z jedného stavu do druhého musí byť rýchly.

Tranzistor, podobne ako spínač má byť zopnutý (môže ním pretekať veľký prúd), alebo rozopnutý (netečie žiaden prúd).

Na základe toho tranzistor použitý ako spínač, môže pracovať v dvoch pracovných oblastiach:

- v uzavretej oblasti, kde obidva PN priedchody sú polarizované v spätnom smere,
- v oblasti nasýtenia, kde PN priedchody sú polarizované v priamom smere.

# 5.11 Tranzistor ako spínací prvok

## 5. 11.1 Charakteristiky tranzistora

Tranzistor je možné použiť ako spínací prvok v troch základných zapojeniach:

- so spoločnou bázou (SB)
- so spoločným emitorom (SE)
- so spoločným kolektorom (SC)

Pri návrhu spínača je potrebné zoznámiť sa so *statickými* a *dynamickými* charakteristikami tranzistora. Pri statickom návrhu je potrebné poznať parametre, ktoré popisujú správanie tranzistora v oblasti zvyškových prúdov a v oblasti nasýtenia. Vplyv parametrov v oblasti zvyškových prúdov je pri kremíkových tranzistoroch veľmi malý.

Na vlastnosti spínača majú najväčší vplyv tzv. saturačné parametre. Hranica saturácie je definovaná vzťahom  $U_{CB}=0$ . Za touto hranicou je kolektorový priechod tranzistora otvorený. Pre hranicu nasýtenia (saturácie) sú definované dva parametre:

- jednosmerný prúdový zosilňovací činiteľ  $\beta$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (5.38)$$

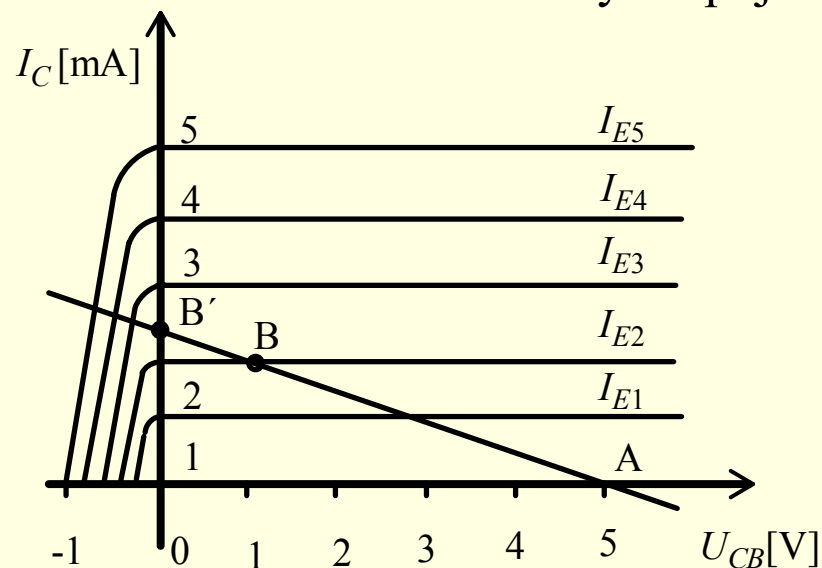
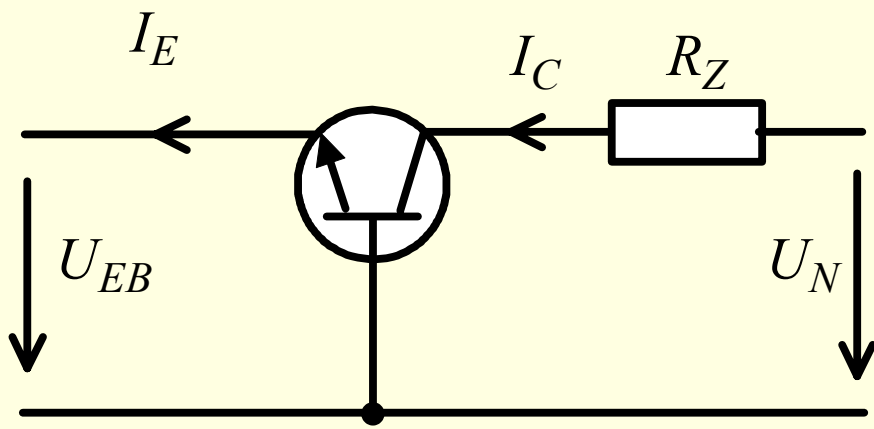
- napätie báza-emitor  $U_{BES}$ , pri danom prúde  $I_E$  a  $U_{CB}=0$ .

Ako tretí spínací parameter sa udáva saturačné kolektorové napätie  $U_{CES}$  pri daných hodnotách  $I_C$  a  $I_B$ .

## 5.11.2 Statické charakteristiky tranzistora

### 5.11.2.1 Zapojenie so spoločnou bázou

V zapojení so spoločnou bázou sa vstupný signál privádza na emitor a bázu a výstupný sa odoberá medzi kolektorom a bázou. Riadiacim prúdom je emitorový prúd  $I_E$ . Pretože kolektorový prúd je menší nemôže tranzistor v tomto zapojení zosilňovať. Medzi bázou a emitorom je PN priedchod, ktorý v podstate vytvára diódu polarizovanú v priamom smere. Ak vstupné napätie prekročí prahové napätie diódy, dióda sa otvorí, v dôsledku čoho emitorový prúd najprv pomaly a potom s veľkou strmost'ou rastie. Prúdové zosilnenie sa blíži k jednej a prúd kolektora sa približne rovná prúdu emitora. Statické charakteristiky zapojenia sú uvedené na obrázku





## 5.11.2 Statické charakteristiky tranzistora

### 5.11.2.1 Zapojenie so spoločnou bázou

Zaťažovací odpor  $R_Z$  určuje priamku (*zaťažovacia priamka*) pretínajúcu charakteristiky tranzistora. Po tejto priamke sa pohybuje pracovný bod tranzistora.

*Pracovný bod* je priesečník zaťažovacej priamky s charakteristikou pre príslušný  $I_E$ .

V bode A je emitorový prúd  $I_E=0$ , emitor a kolektor sú polarizované v spätnom smere. Obvodom kolektora a emitora pretekajú iba zvyškové prúdy – *tranzistor je zatvorený*.

Medzi bodmi A a B' je tzv. *aktívna oblasť*.

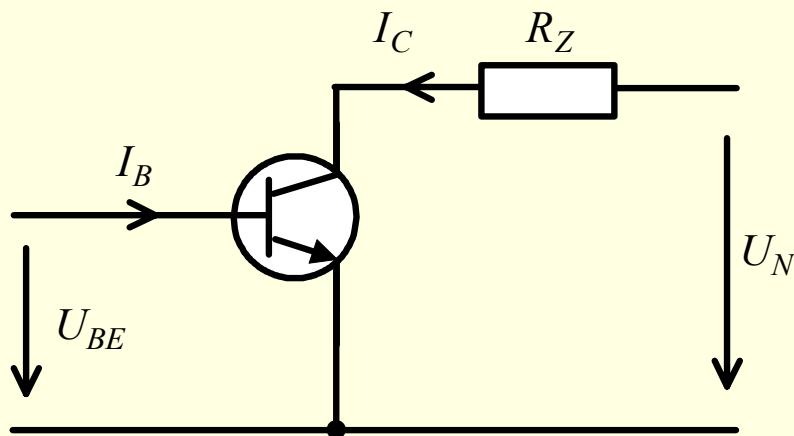
Za bodom B' je tranzistor vo vodivom stave v tzv. *oblasti nasýtenia*. Emitor a kolektor sú polarizované v priamom smere a kolektorový prúd sa zväčšuje iba nepatrne (analógia so zopnutým kontaktom). Tranzistor je otvorený, t.j. vo vodivom stave. Tranzistor v zapojení so spoločnou bázou sa veľmi blíži k *ideálnemu spínaču*.

## 5.11.2 Statické charakteristiky tranzistora

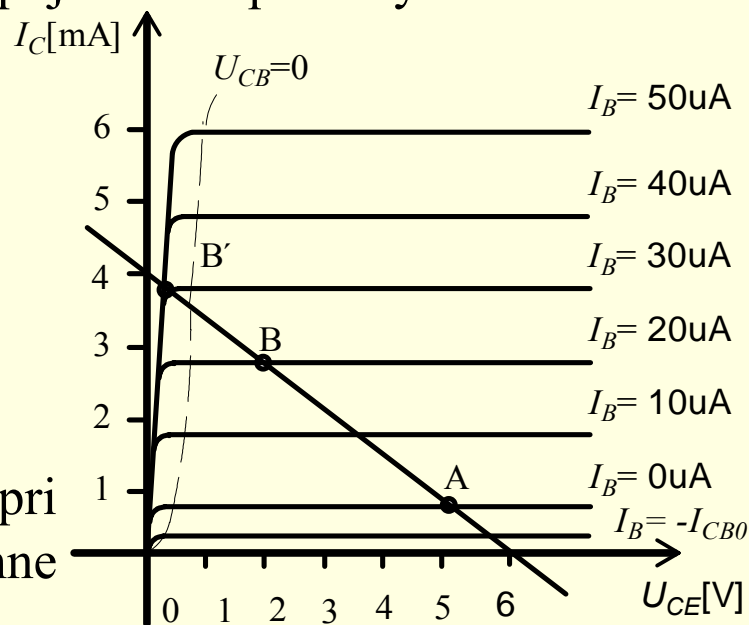
### 5.11.2.2 Zapojenie so spoločným emitorom

V praxi sa najčastejšie vyskytuje zapojenie tranzistora so spoločným emitorom. Vstupný signál sa privádza medzi kolektor a emitor. Aby prechodom báza–emitor prechádzal riadiaci prúd  $I_B$ , je potrebný pomerne malý rozdiel potenciálov medzi bázou a emitorom. Úbytok je okolo 0,5-0,7 [V], takže je podstatne menší ako napájacie napätie, ktoré býva okolo 10 až 100 [V].

V zapojení so spoločným emitorom je možné malým prúdom a napätím riadiť na výstupe tranzistora veľký prúd  $I_C$  a meniť výstupné napätie. Z tohto dôvodu sa v spínacích obvodoch používa skoro výhradne zapojenie so spoločným emitorom.



Na rozdiel od zapojenia so spoločnou bázou sa pri zapojení so spoločným emitorom nikdy nedosiahne ideálny stav, t.j.  $U_{CE}$  sa nikdy nerovná nule.



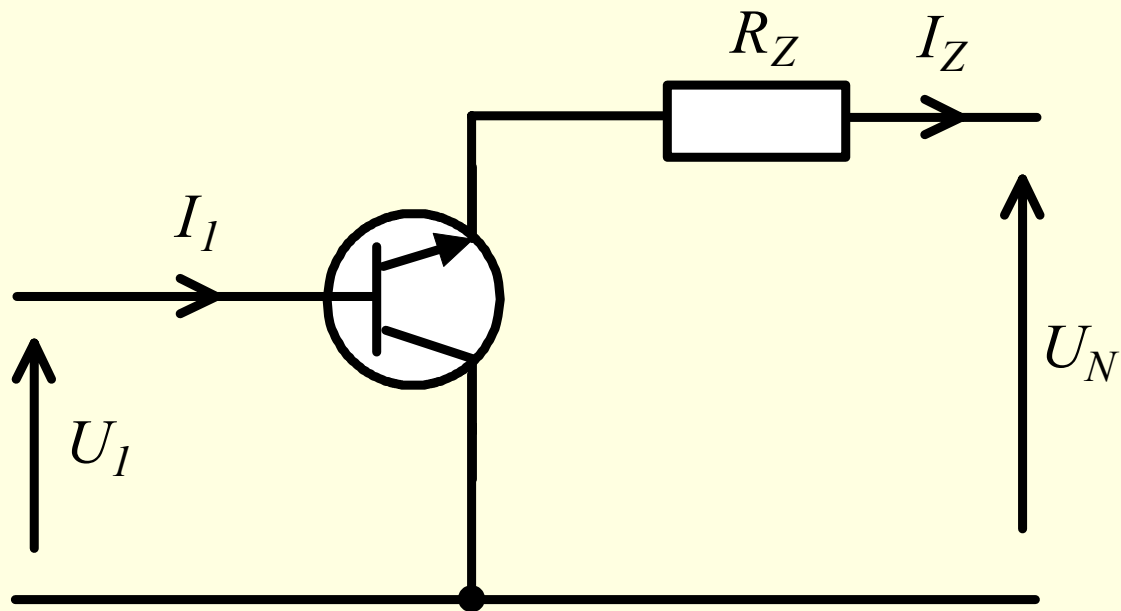
## 5.11.2 Statické charakteristiky tranzistora

### 5.11.2.2 Zapojenie so spoločným kolektorom – emitorový sledovač

V tomto zapojení je vstupné napätie pripojené medzi bázou a kolektorom. Riadiacim prúdom je bázový prúd. Napät'ové zosilnenie tranzistora je menšie ako 1, t.j.  $A_U < 1$ .

Na zopnutie je potrebné väčšie napätie ako je výstupné.

Používa sa tam, kde je potrebný veľký vstupný odpor, napr. v zosilňovačoch.



### 5.11.3 Nevodivý stav tranzistora

Z rozboru charakteristík vyplynulo, že v zapojení SB prechádza kolektorovým, t.j. spínaným obvodom v nevodivom stave iba zvyškový prúd  $I_{CB0}$ . Tento prúd je pri germániových tranzistoroch niekoľko  $\mu\text{A}$  a pri kremíkových tranzistoroch o dva rády menší. Zvyškový prúd sa zväčšuje s teplotou, avšak aj za nepriaznivého stavu nie je obyčajne taký veľký, aby mohol ovplyvniť činnosť spínaného obvodu. Pri závernom predpätí vstupného obvodu sa zvyškový prúd zmenší iba nepatrne, takže ho môžeme považovať za najmenší dosiahnuteľný prúd v nevodivom stave. Výhodou tohoto javu je veľké prípustné napätie  $U_{CB}$ .

Menej priaznivá situácia je v zapojení SE pri  $I_B=0$ . Spínaným obvodom preteká zvyškový prúd  $I_{CB0}$ . Tento prúd je podstatne väčší ako  $I_{CB0}$  pretože platí  $I_{CE0}=(1+\beta)I_{CB0}$ . Pri germániových tranzistoroch s  $\beta\sim 200$  môže byť  $I_{CE0}$  až 1 mA a s teplotou sa bude ďalej zvyšovať. Zapojenie SE a podmienka je pre germániové tranzistory *nepoužiteľná*. Možno ho použiť iba pre kremíkové tranzistory.

Ak privedieme na bázu malé záverné predpätie  $U_{BE}$ , zmenší sa  $I_E$  na nulu a kolektorový prúd  $I_C$  na veľkosť  $I_{CB0}$ . Pri ďalšom zväčšovaní záporného predpätia sa  $I_C$  znižuje nepatrne. Takto sa zapojenie SE vyrovná zapojeniu SB pri  $I_E=0$ . Bázou musí pretekať záverný prúd  $|I_B|=|I_{CB0}|$ .

## 5.11.4 Vodivý stav tranzistora

Vo vodivom stave prechádza tranzistorom prúd, ktorého veľkosť je obmedzená iba súčiastkami vonkajšieho obvodu (hlavne  $R_Z$ ). V zapojení SB sa zmenší  $U_{CB}$  na nulu alebo dosiahne malú hodnotu opačnej polaroty. V zapojení SE sa zmenší napätie na  $U_{CES}$ .

Stanovenie pracovných podmienok pre tranzistor vo vodivom stave spočíva v určení potrebného prúdu bázy  $I_B$  a závisí iba od  $\beta$  tranzistora. Keďže  $I_C = U_N / R_C$  a  $I_C = \beta I_B$ , musí platiť  $I_B = I_C / \beta$ . Pri návrhu treba počítať s tým, že  $\beta$  v tejto časti charakteristiky bude menšia ako v aktívnej oblasti, z tohto dôvodu sa volí  $\beta/2$ .

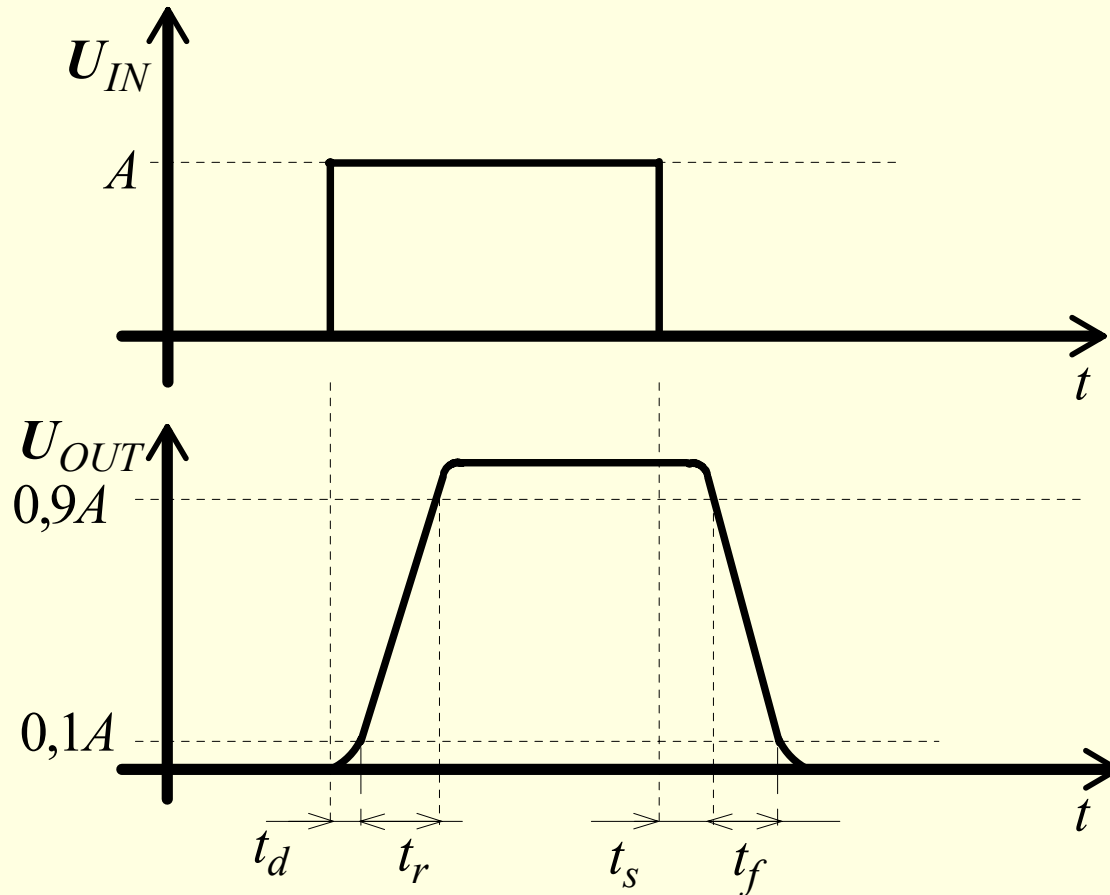
Je možné rozlíšiť trojaký vodivý stav tranzistora:

- stav na hranici nasýtenia ( $U_{CB} = 0$ )
- stav v aktívnej oblasti pred hranicou nasýtenia (pred  $U_{CB} = 0$ ),
- stav v oblasti nasýtenia (za  $U_{CB} = 0$ ).

Najpoužívanejší je stav v oblasti nasýtenia, ktorý dovoľuje väčšie tolerancie súčiastok a napätí.

## 5.11.5 Dynamické charakteristiky tranzistora

Vplyvom konečnej rýchlosti s akou prebiehajú vnútorné deje v tranzistore je priebeh výstupného tvaru impulzu odlišný od vstupného tvaru



## 5.11.5 Dynamické charakteristiky tranzistora

Definujeme nasledujúce časové parametre:

- *Oneskorenie impulzu*  $t_d$  - čas medzi privedením budiaceho impulzu na vstupné prírody tranzistora otvárajúceho sa z nevodivého do vodivého stavu a dosiahnutím 10% maximálnej hodnoty amplitúdy impulzu na výstupných vývodoch tranzistora.
- *Čas nábehu impulzu*  $t_r$  - nárast impulzu z hodnoty 10% na 90% menovitej hodnoty  $A$ , ktorú impulz nadobúda po ustálení
- *Čas dobehu (tylu)*  $t_f$  - čas nutný na pokles z 90% na 10% menovitej hodnoty  $A$ .
- *Presah impulzu*  $t_s$  - čas medzi ukončením budiaceho impulzu a poklesom amplitúdy na výstupe na 90% nominálnej hodnoty.

## 5.11.5 Dynamické charakteristiky tranzistora

Presah impulzu a iné časové parametre sú dané parazitnými kapacitami jednotlivých elektród tranzistora a kapacitami priechodov.

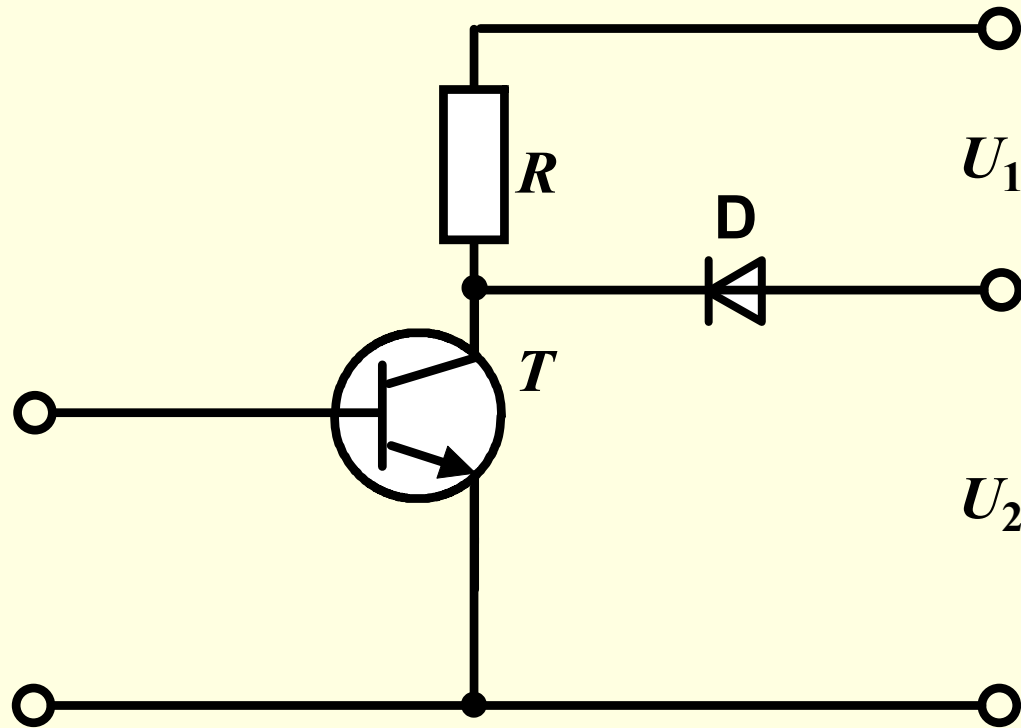
Kapacity priechodov sú rádovo 1÷10 nF. Je možné dokázať, že zvýšenie budiaceho prúdu skracuje nábeh impulzu. Uplatňuje sa však *presah* často dlhší ako tyl impulzu. Pre rýchle spínacie obvody je potrebné používať obvodové zapojenia, ktoré zabraňujú nasýteniu tranzistora alebo lepšie tranzistory s vyššou hraničnou frekvenciou (menšie parazitné kapacity).

Ako už bolo uvedené, nasýtenie tranzistora predlžuje presah impulzu (čas zotavenia). Používajú sa preto pomocné obvody, ktoré dovoľia otvoriť tranzistor dostatočne veľkým prúdom bázy a súčasne zabránia alebo zmenšia presýtenie vo vodivom stave.



## 5.11.5 Dynamické charakteristiky tranzistora

V nevodivom stave ( $U_{CE} \approx U_1 > U_2$ ) je dióda zatvorená a uplatní sa iba záťaž  $R$ . Ak sa zväčšuje  $I_B$ , zväčšuje sa  $I_C$ , a teda rastie úbytok na  $R$ . Ak je  $U_1 - RI_C = U_2$ , dióda sa otvorí a jej malý odpor  $R_D \ll R$  sa uplatní paralelne k  $R$ . Tým sa zaistí, že  $U_{CE} > 0$ . Podstatné zlepšenie však nenastane, lebo  $I_C$  sa zväčšuje bez obmedzenia až k hodnote  $\beta I_B$ . Napätie na kolektore sa takmer nemení, kým prúd neklesne pod hodnotu  $(U_1 - U_2) / R$ .



## 5.11.5 Dynamické charakteristiky tranzistora

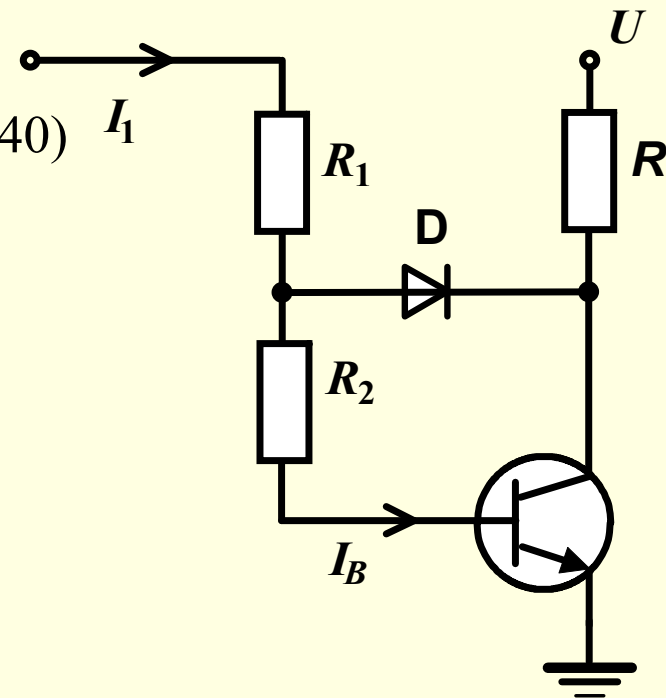
Lepšie výsledky dáva zapojenie podľa nasledujúceho obrázku. Dióda je zapojená do odbočky  $R_1, R_2$ , ktorou prechádza prúd  $I_1$ , resp.  $I_B$ . Ak sa zníži napätie kolektora pod napätie odbočky, dióda sa otvorí a odvedie do kolektora časť budiaceho prúdu, a tým zabráni ďalšiemu zväčšovaniu  $I_C$  pôsobením  $\beta$ . Úbytok napätia na odpore  $R_2$  je približne

$$U_{R2} \approx \frac{I_C}{\beta} \cdot R_2 \quad (5.39)$$

Pretože úbytok na vodivej dióde je rovný približne úbytku na emitorovom priedehode, napätie kolektora pri otvorení diódy je rovné

$$U_C \approx \frac{I_C}{\beta} \cdot R_2 = \frac{U}{R} \cdot \frac{R_2}{\beta} \quad (5.40)$$

keďže  $I_C = U/R$ .



## 5.11.6 Spínanie indukčnej záťaže

Vzhľadom na to, že cievka je schopná akumulovať energiu, je zrejmé, že obvod na Obr. sa bude správať ináč ako pri spínaní odporovej záťaže. Nabíjanie a vybíjanie obvodu prebieha podľa exponenciálnych kriviek. Pri zapnutí (otvorení) tranzistora možno určiť prúd kolektora (vplyv indukčnosti sa prejaví pomalším zväčšovaním  $I_C$ )

$$I_C = \frac{U}{R_L} \cdot (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (5.41)$$

kde

$$\tau_1 = \frac{L}{R_L + R_T}$$

$R_L$  - odpor cievky

$R_T$  - vnútorný odpor tranzistora v zopnutom stave

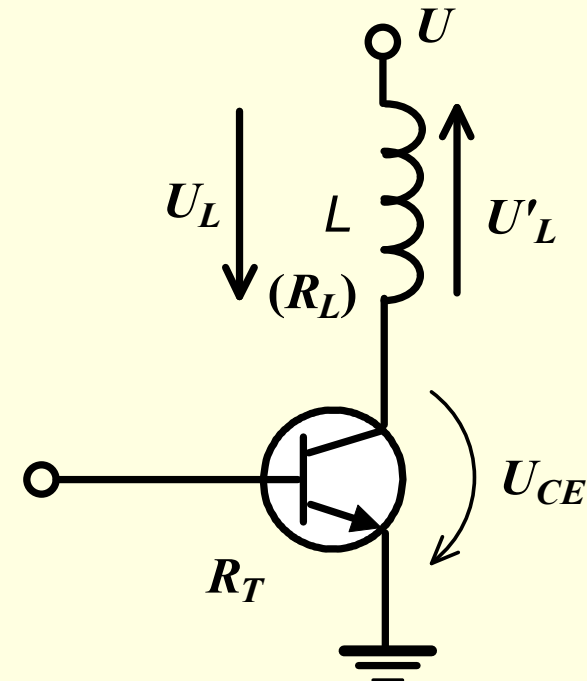
Pri uzavretí tranzistora platí pre priebeh  $I_C$  vzťah

$$I_C = \frac{U}{R_L} \cdot e^{-t/\tau_2} \quad (5.42)$$

kde

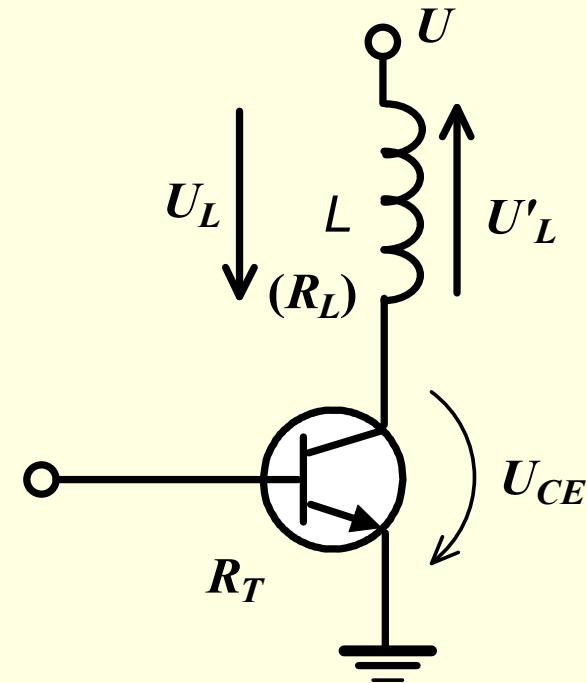
$$\tau_2 = \frac{L}{R_L + R'_T}$$

$R'_T$  - vnútorný odpor tranzistora v zatvorenom stave



## 5.11.6 Spínanie indukčnej záťaže

Pretože  $R'_T$  je veľký, hodnota  $\tau_2$  je malá a kolektorový prúd sa zmenší veľmi rýchlo na nulu. Súčasne sa však indukuje  $U'_L$ , ktoré sa snaží zabrániť tomuto zániku.  $U'_L$  je obvykle väčšie ako  $U$  a väčšinou väčšie ako  $U_{CE\max}$  daného tranzistora. Aby nedošlo k zničeniu tranzistora je nutné toto napätie obmedziť. Obyčajne sa to robí diódou, ktorá obmedzí indukované napätie na hodnotu  $U$ . Zapojenie diódy paralelne k cievke trochu spomalí zánik  $I_C$ , pretože v čase keď dióda vedie, neuplatní sa  $R_L$  (skratuje ho dióda).



## 5.11.6 Spínanie kapacitnej záťaže

Pri prechode tranzistora do vodivej oblasti, bude ním prechádzať prúd

$$i_C = \frac{U}{R_C} = \frac{U}{R_T} \cdot e^{-t/\tau_1} \quad (5.43)$$

kde

$$\tau_1 = R_T C$$

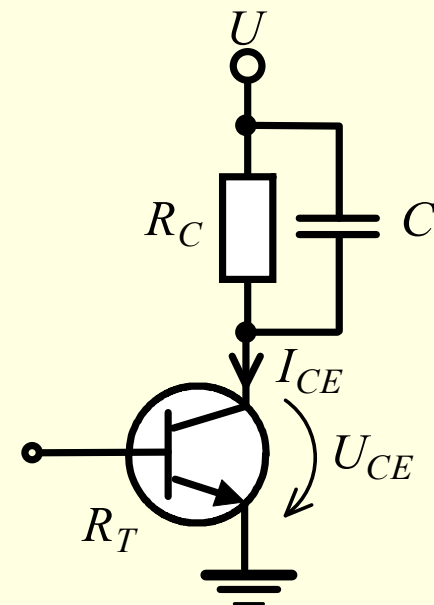
Pretože vnútorný odpor  $R_T$  je malý, bude malá i časová konštanta  $\tau_1$  a prúdový náraz bude veľmi krátky. Aj tak je nutné skontrolovať, či ním nemôže byť poškodený tranzistor a prípadne ho treba obmedziť malým odporom v prívode  $U$ . Pri uzavretí tranzistora  $I_C$  zanikne a  $C$  sa začne vybíjať cez  $R_C$ .

Napätie na kolektore sa bude zväčšovať pomaly podľa vzťahu

$$U_C = U \cdot (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (5.41)$$

kde

$$\tau_2 = R_C C$$



## 5.11.6 Spínanie kapacitnej záťaže

Častejšie sa používa takéto zapojenie. V nevodivom stave je kondenzátor  $C$  nabitý na hodnotu  $U$ . Po prechode do zopnutého stavu sa vybíja cez  $R_T$  s časovou konštantou  $\tau_1 = R_T C$ . Napätie na kolektore sa znižuje podľa

$$U_{CE} = U \cdot e^{-t/\tau_1}$$

Po prechode do nevodivého stavu sa kondenzátor  $C$  nabíja cez  $R_C$ , a napätie na kolektore tranzistora sa zväčšuje podľa vzťahu

$$U_{CE} = U \cdot (1 - e^{-t/\tau_2})$$

kde

$$\tau_2 = R_C C$$

