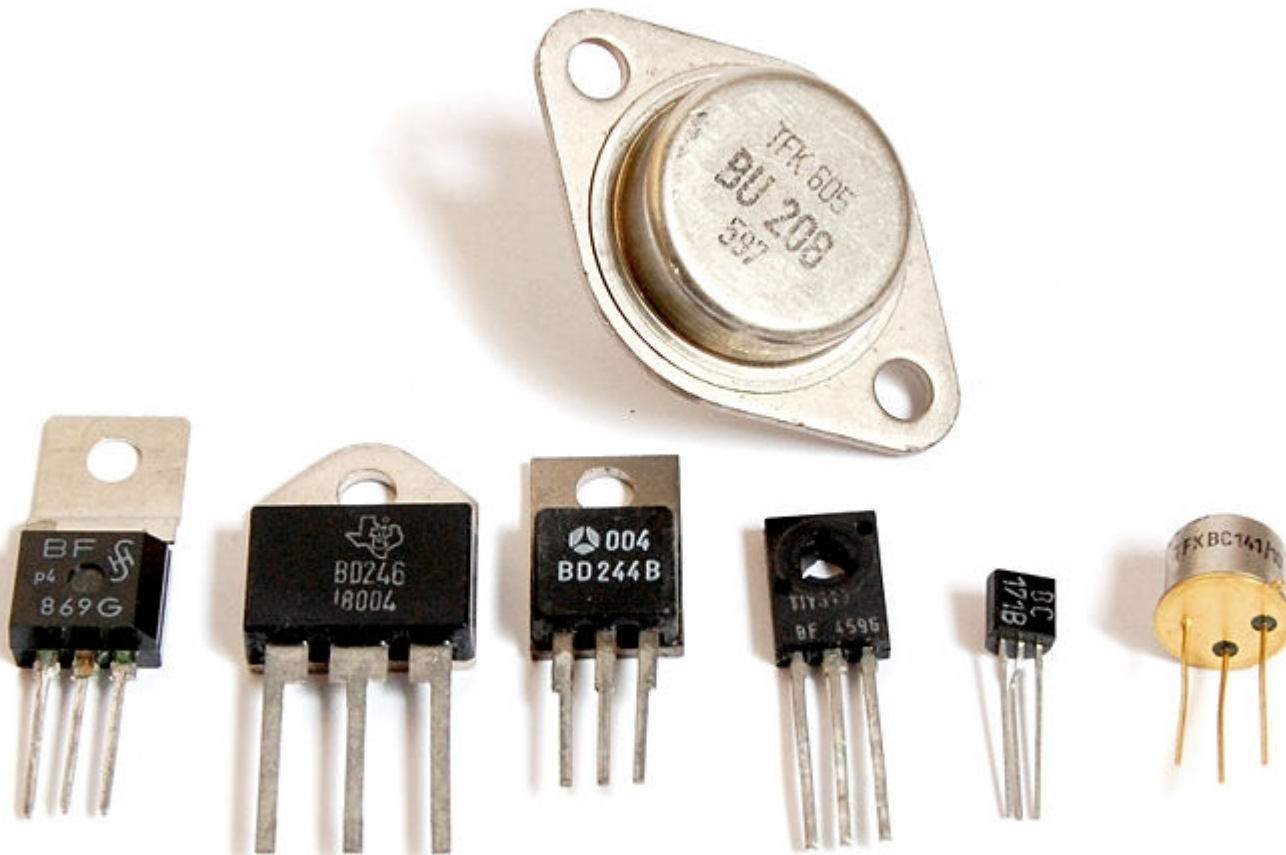


# Bipolární tranzistory



# Opakování polovodiče a úvod k tranzistorům

- [https://www.youtube.com/watch?v=K\\_h7jxrQLQI](https://www.youtube.com/watch?v=K_h7jxrQLQI)

## Co je tranzistor

- Je to polovodičová trojpólová nelineární součástka
- Malým výkonem na vstupu můžeme regulovat velký výkon na výstupu
- Do obvodu se zapojuje jako dvojbran
- každý tranzistor má(nejméně) 3 elektrody kolektor, bázi a emitor (drain, gate a source)
- Tranzistorový jev a tranzistor byly objeveny v roce 1947

## Dělení tranzistorů

### **Základní dělení:**

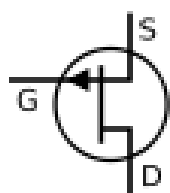
- a) Bipolární tranzistory
- b) Unipolární tranzistory

### **Další dělení, podle výkonů:**

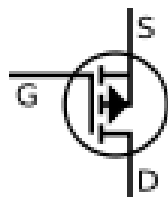
- a) NF – malý výkon, střední výkon, velký výkon
- b) VF



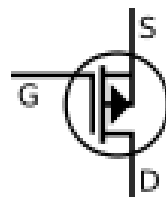
# Značení tranzistorů



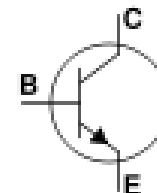
JFET



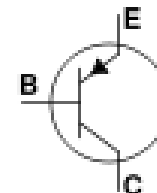
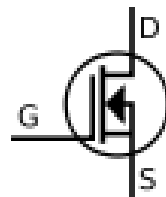
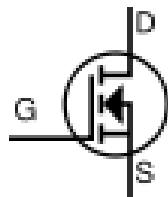
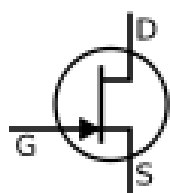
MOSFET-indukovaný kanál



MOSFET-vestavěný kanál



P-kanál(báze)

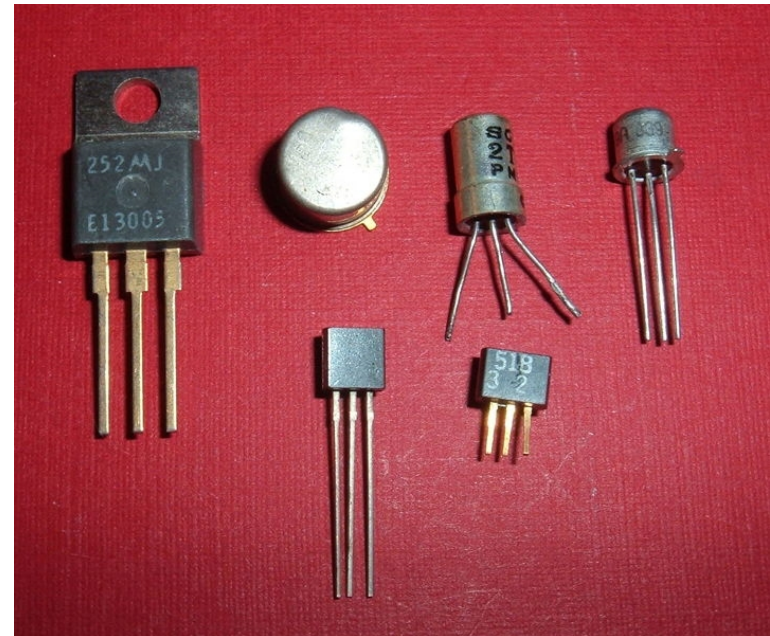
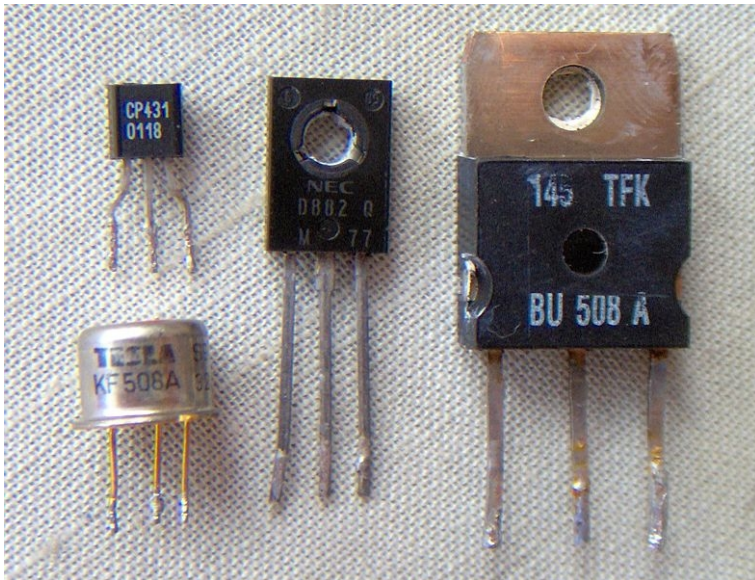


N-kanál(báze)

Bipolární

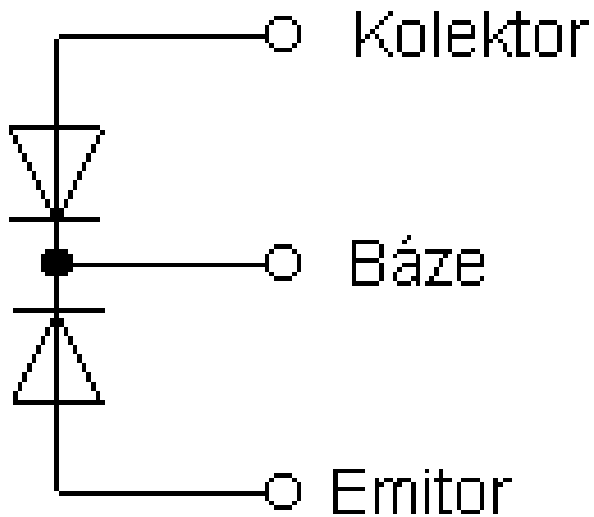


## Jak vypadají tranzistory ve skutečnosti

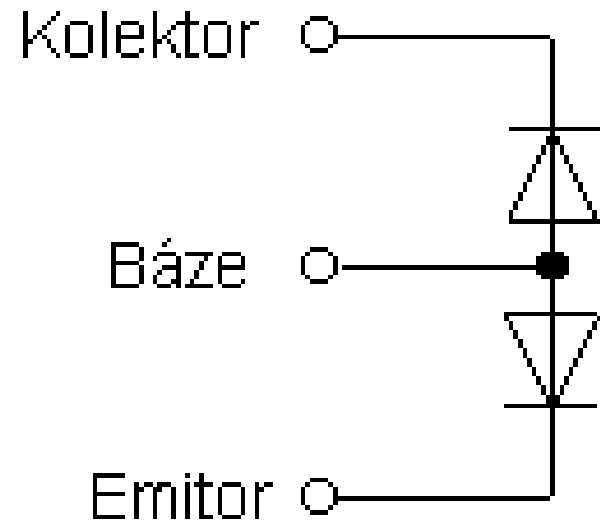


## Princip bipolárních tranzistorů

a) PNP



b) NPN

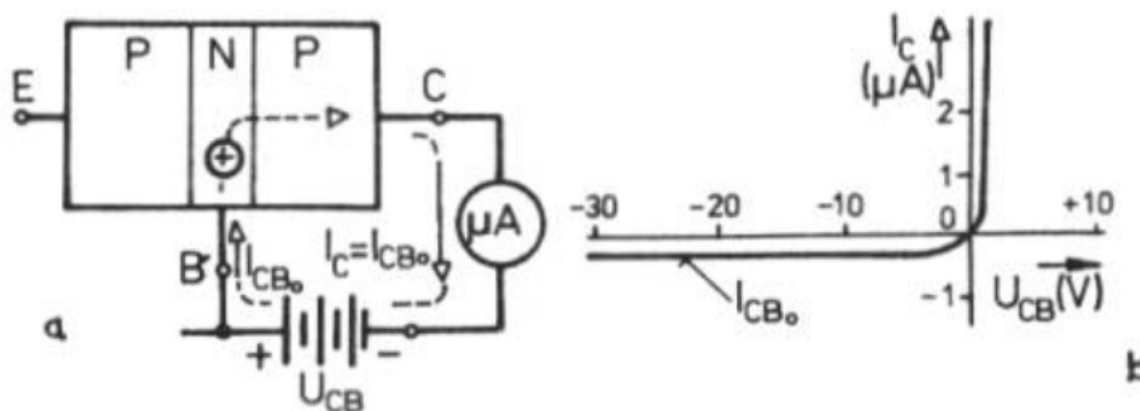


# Podmínky pro správnou funkci tranzistoru

- Tenká vrstva báze.
- Emitor dotovaný více než báze – Způsobuje převahu volných nosičů náboje z emitoru.
  - Při otevření přechodu báze-emitor se tak zachovává délka báze a elektrony vstříknuté do báze z emitoru nestíhají rekombinovat.
- Báze dotovaná více než kolektor – Čím větší je rozdíl dotací, tím větší napětí může tranzistor spínat, ale má také větší sériový odpor.
- V bipolárním tranzistoru vedou proud také díry.
  - Ty se zákonitě pohybují opačným směrem, ale plní stejnou úlohu jako elektrony. Proto se tomuto typu tranzistoru říká „bipolární“.

# Činnost tranzistoru PNP

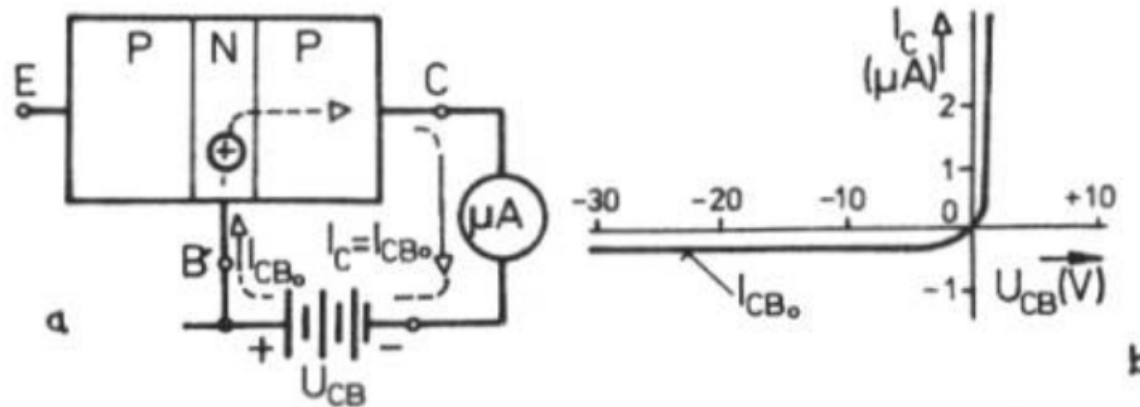
- Představme si, že tranzistor PNP je zapojen v obvodu nakresleném na obrázku 94a
- Emitor je odpojen a proto se neuplatňuje
- Přechod kolektor-báze tvoří diodu, která je polarizována napětím  $U_{CB}$  ve zpětném směru.
- Proto bude jejím obvodem procházet jen velmi malý proud minoritních nosičů náboje, který je nasycen již při napětí několik desetín voltu.
- Kdybychom změnil polaritu napětí  $U_{CB}$ , přechod kolektor-báze by se otevřel a proud v obvodu by velmi prudce vzrostl.



Obr. 94. Zpětný proud diody kolektor-báze (zbytkový proud tranzistoru)



# Činnost tranzistoru PNP

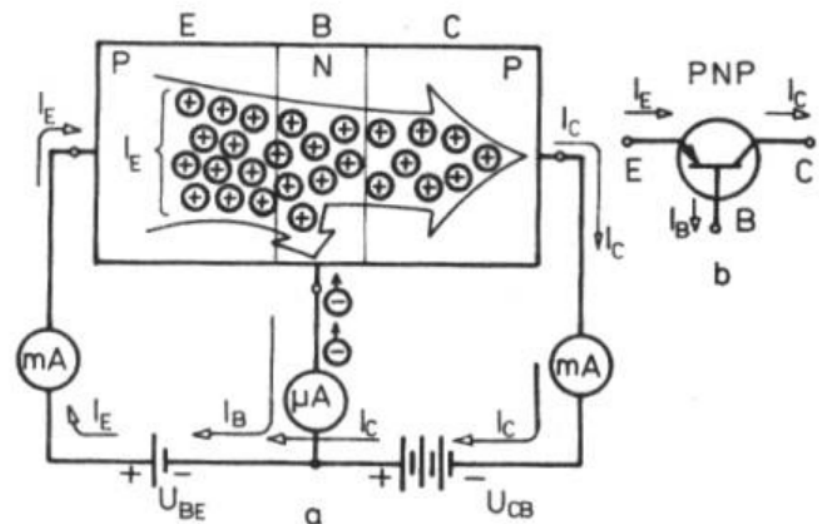


Obr. 94. Zpětný proud diody kolektor-báze (zbytkový proud tranzistoru)

- Z obr. 94 vidíme, že **popsaná závislost proudu  $I_C$  na napětí  $U_{CB}$  je voltampérovou charakteristikou diody kolektor-báze**, která se nijak neliší od voltampérové charakteristiky běžné polovodičové diody.
- Abychom zdůraznili, že při zjišťování této závislosti byl emitor odpojen, označili jsme na obr. 94 proud procházející z báze do kolektoru symbolem  $I_{CB0}$
- Z grafu je dále zřejmé, že v obvodu tranzistoru působí poměrně velké napětí (desítek voltů), avšak procházející proud je jen velmi malý (zlomky mikroampérů). Odpovídající výkon, daný součinem obou veličin, je pouze několik mikrowattů.

# Činnost tranzistoru PNP

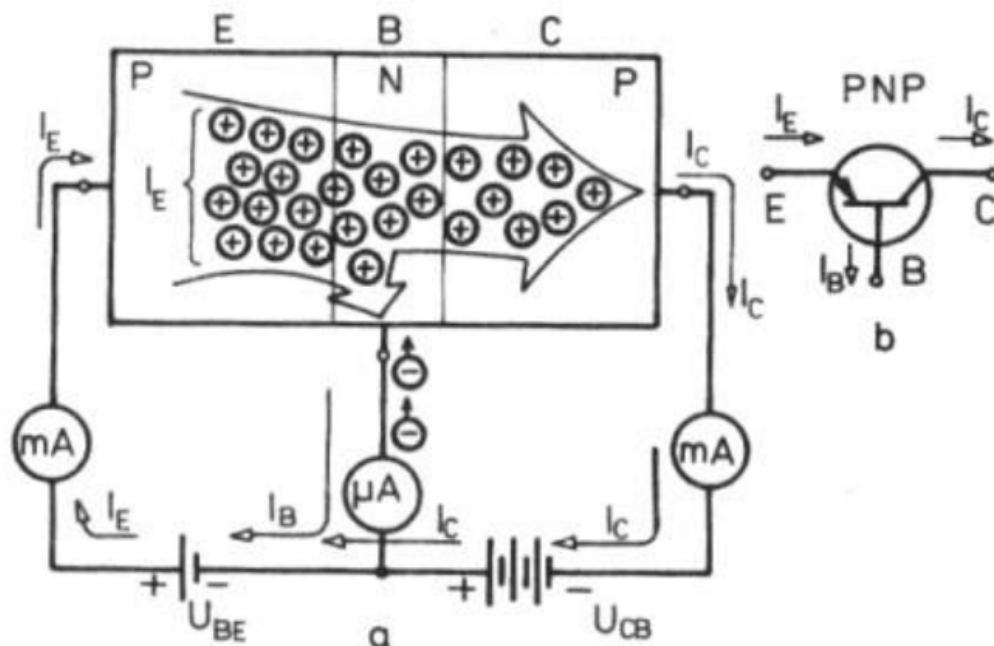
- Kdybychom chtěli tento výkon zvětšit, museli bychom zvětšit proud procházející obvodem kolektoru (tj. kolektorový proud  $I_C$ ).
  - **K tomu však potřebujeme (viz obr. 94a) zvětšit počet minoritních nosičů náboje v oblasti báze** (v tranzistoru PNP počet děr).
- Tento požadavek splníme velmi snadno - stačí, když napětím několik desetin voltu (větším než napětí  $U_{T0}$  diody) otevřeme přechod emitor-báze (obr. 95a).
- Díry, které jsou majoritními nosiči náboje v emitoru, začnou procházet ve velikém množství do oblasti báze - vytvářejí emitorový proud tranzistoru.
- V oblasti báze jsou přicházející díry minoritními nosiči a přechod báze-kolektor je pro ně otevřen.
- **Protože báze má poměrně malou tloušťku, prochází téměř celý emitorový proud až do kolektoru tranzistoru.**
- Výkon v obvodu kolek-toru dosáhne hodnoty  $I_C U_{C_B} = I_E U_{C_B}$ , tzn. že mnohonásobně stoupne.
- Velikost emitorového proudu je možné řídit napětím  $U_{B_E}$ . Podle konstrukčního provedení tranzistoru může být proud  $I_E$  několik miliampérů až několik desítek ampérů. Výkon ve výstupním obvodu pak může dosáhnout hodnoty až několik set wattů.



Obr. 95. Činnost a schematická značka tranzistoru PNP

# Činnost tranzistoru PNP

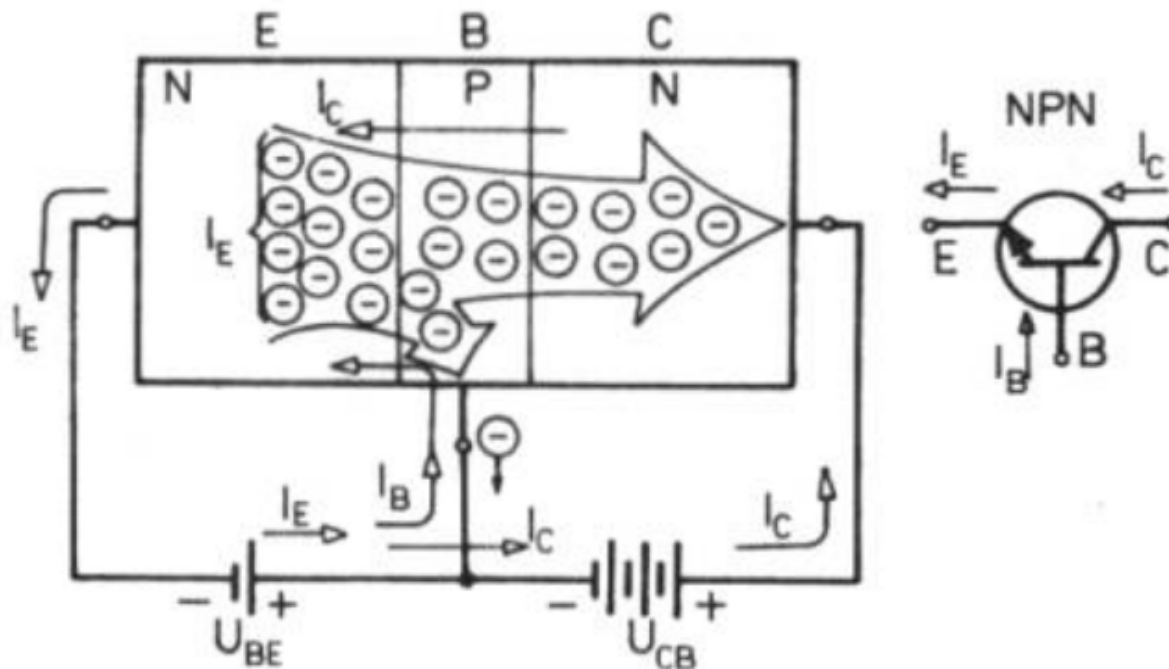
- Z celkového počtu děr přicházejících z emitoru do báze stačí v oblasti báze rekombinovat jen velmi malá část, zpravidla méně než 1 %.
- Úbytek elektronů v bázi vzniklý rekombinací s dírami je vyrovnáván proudem báze  $I_B$ , který je tvořen elektrony přiváděnými ze záporného pólu zdroje  $U_{BE}$ .
- Z obr. 95 je zřejmé, že  $I_E = I_C + I_B$
- Rozdělení emitorového proudu na proud kolektoru a báze bere v úvahu též schématická značka tranzistoru PNP nakreslená na obr. 95b.



Obr. 95. Činnost a schématická značka tranzistoru PNP

# Činnost tranzistoru NPN

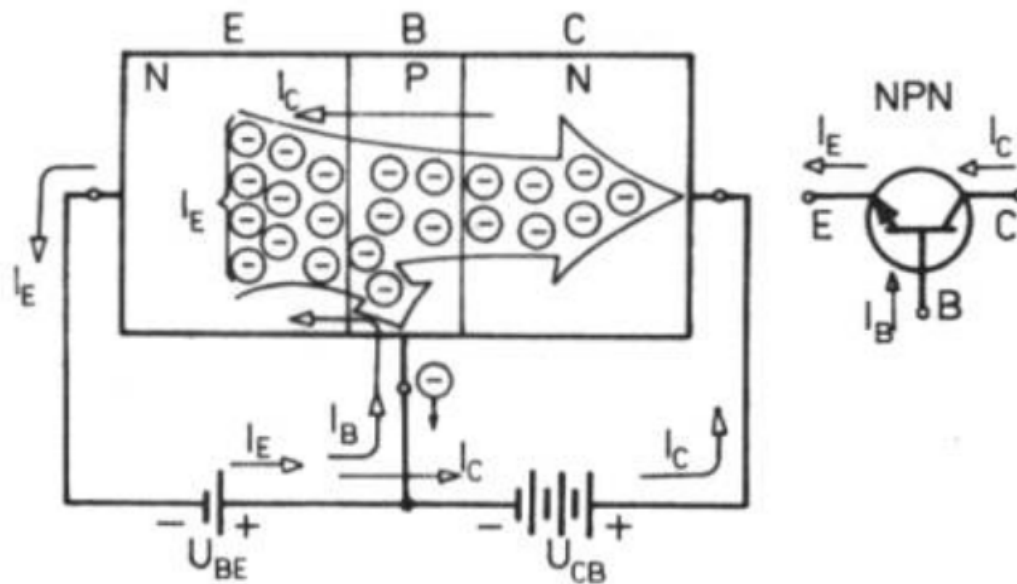
- Podobným způsobem, kterým jsme vysvětlili činnost tranzistoru PNP, můžeme vysvětlit též činnost tranzistoru NPN.
- **Dioda kolektor-báze je opět polarizována ve zpětném směru**, aby z báze do emitoru mohli procházet jen minoritní nosiče náboje.
- V tomto případě jsou to však elektrony a technický směr proudu se označuje proti směru jejich pohybu.
- O to jsou v tranzistoru NPN představy složitější..



Obr. 97. Činnost tranzistoru NPN a jeho schematická značka

# Činnost tranzistoru NPN

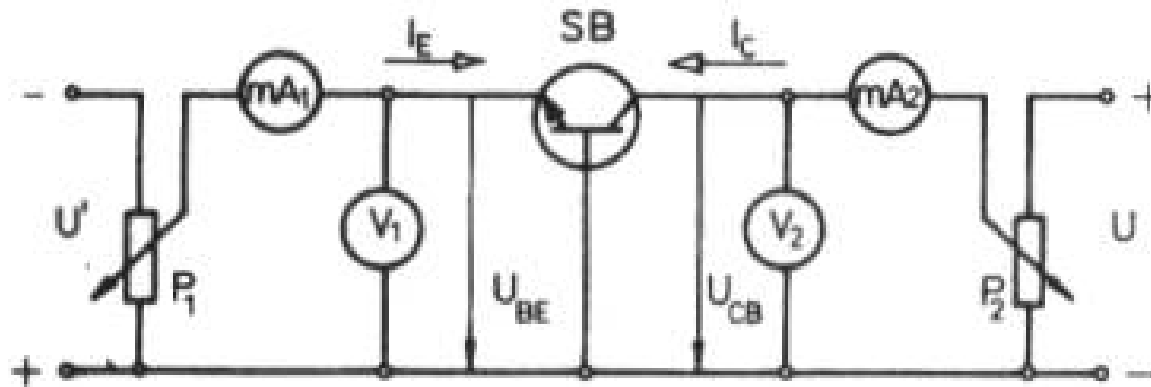
- Stejně jako v tranzistoru PNP prochází i zde výstupním obvodem při proudu  $I_E = 0$  pouze nepatrný proud.
- **Otevřeme-li napětím  $U_{BE}$  přechod báze-emitor, přivedeme do oblasti báze z emitoru elektrony, jejichž převážná část pokračuje do kolektoru, kde vytvoří výstupní proud  $I_C$ .**
- Jen malá část z počtu přicházejících elektronů se uzavírá přívodem k bázi.
- Z obrázků 95 a 97 vidíme, že oba druhy tranzistorů se liší polaritou působících napětí a směry procházejících proudů.
  - To bere též v úvahu značka NPN nakreslená na obr. 97b.



Obr. 97. Činnost tranzistoru NPN a jeho schematická značka

# Základní zapojení tranzistoru

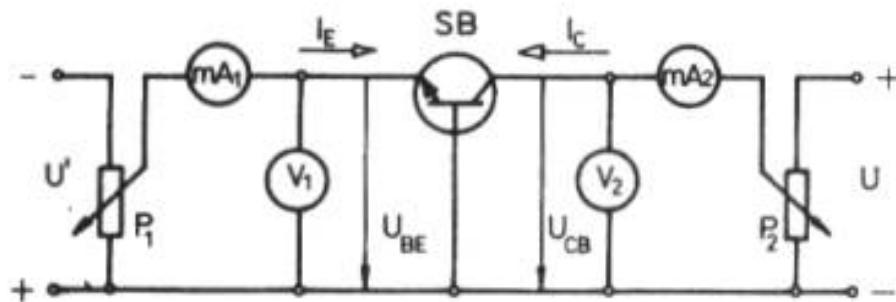
- Tranzistor může být v obvodu zapojen třemi základními způsoby:
  - se společnou bází (SB),
  - se spol. emitorem (SE),
  - se spol. kolektorem (SK).
- Je samozřejmé, že způsob zapojení nemůže mít vliv na vnitřní činnost tranzistoru.
- Různé chování tranzistoru v jednotlivých základních zapojeních je způsobeno využitím různých jeho elektrod ve vstupním a ve výstupním obvodu.
- V dalším výkladu porovnáváme nejdůležitější vlastnosti tranzistoru NPN v těchto základních zapojeních.
- Veškeré závěry platí také pro tranzistory PNP.
- V zapojeních i v grafech je však nutné pro tranzistor PNP změnit polaritu všech napětí i smysly proudů.



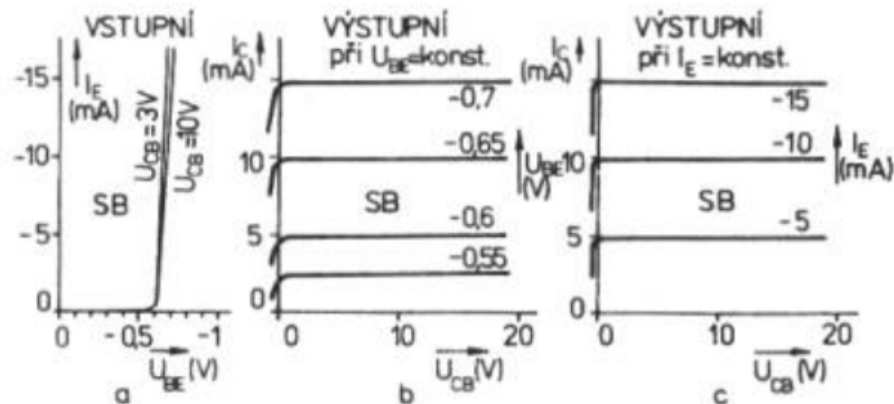
Obr. 98. Měření statických charakteristik tranzistoru se společnou bází

# Základní zapojení tranzistoru

- Budeme-li udržovat napětí  $U_{CB}$  konst. (např.  $U_{CB} = 10V$ ) a budeme-li registrovat potenciometr  $P_1$  zapojením ve vstupním obvodu, získáme **závislost proudu  $I_E$  na napětí  $U_{BE}$ , kterou nazýváme vstupní charakteristika**.
- Její průběh pro křemíkové tranzistory je na obr.99a a odpovídá voltampérové charakteristice diody polarizované v přímém směru.
- Opakujeme-li měření při jiné hodnotě  $U_{CB}$  (např.  $U_{CB} = 3V$ ), zjistíme, že průběh vstupní charakteristiky závisí na vstupním napětí  $U_{CB}$  jen velmi málo.
- Závislost vstupních proudů  $I_C$  na výstupním napětí  $U_{CB}$  nazýváme **výstupní charakteristika**.
  - Můžeme ji určit při konstantním napětí  $U_{BE}$  (obr.99b) nebo při konst. proudu  $I_E$  (obr 99c).



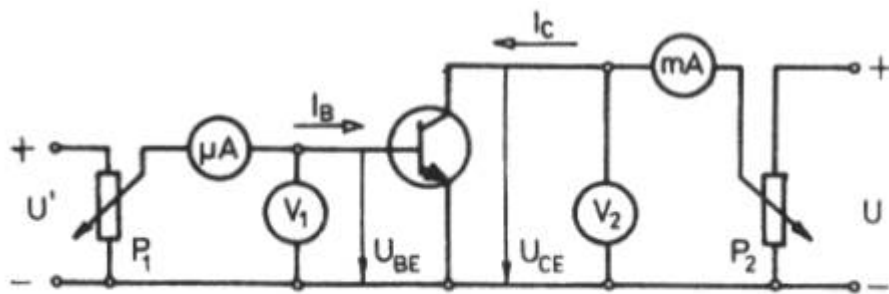
Obr. 98. Měření statických charakteristik tranzistoru se společnou bází



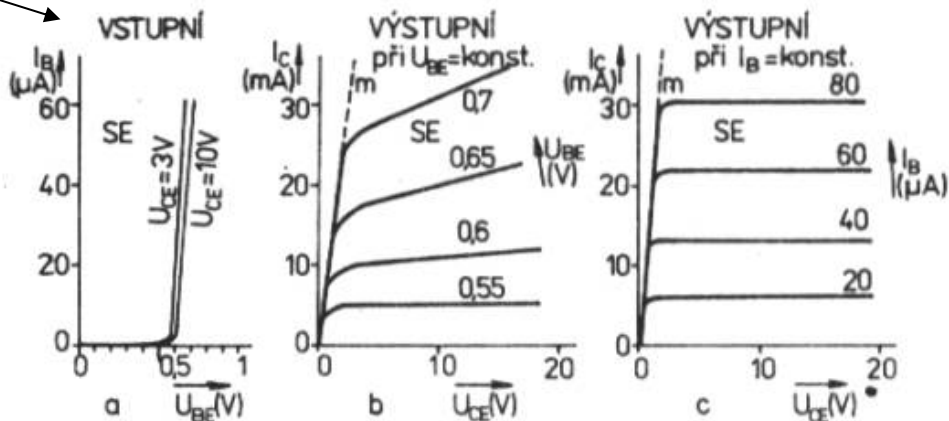
Obr. 99. Charakteristiky tranzistoru NPN se společnou bází

# Základní zapojení tranzistoru

- Pro tranzistor se SE získáme statické charakteristiky v zapojení podle obr.100.
- Vstupní charakteristiku představující závislost vstupního napětí na vstupním proudu naměříme stejně jako v zapojení SB, budeme-li udržovat konstantní výstupní napětí.
- Průběhy jsou nakresleny na obr.101a.
- Jejich závislost na vstupním napětí je podobně jako v zapojení SB velmi malá.



Obr. 100. Měření statických charakteristik tranzistoru se společným emitorem

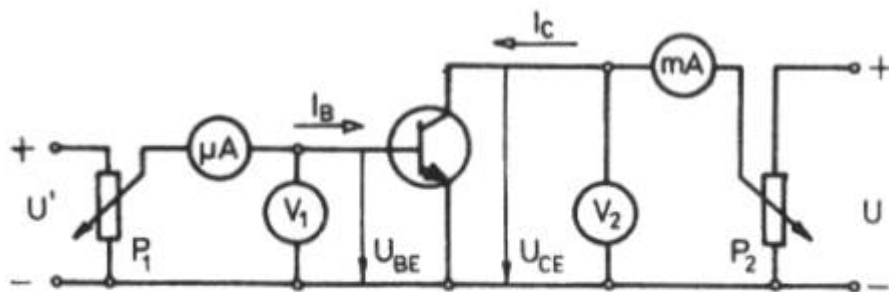


Obr. 101. Charakteristiky tranzistoru NPN se společným emitorem

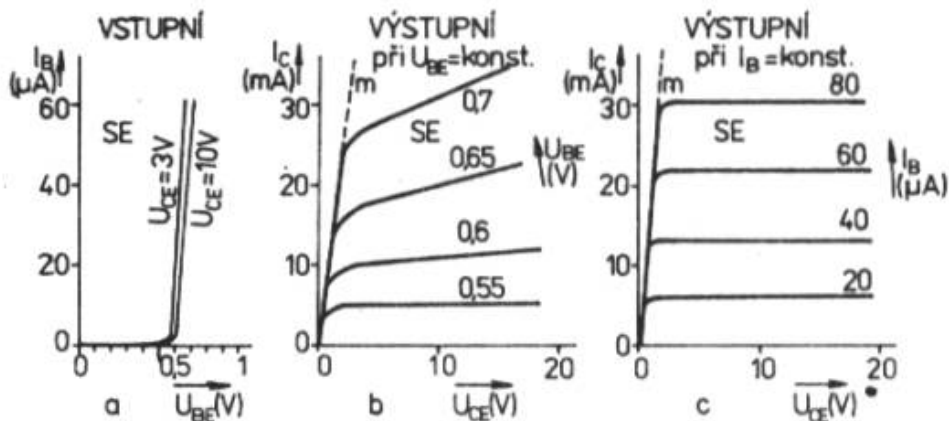


# Základní zapojení tranzistoru

- Výstupní charakteristiky se měří opět při konst. vstupním napětí obr.101b nebo při konst. vstupním proudu obr 101c.
- Všimněte si, že výstupní charakteristiky se objevují od tzv. *mezní přímky m* tranzistoru, která prochází počátkem souřadnic a směřuje prudce vzhůru.
- Pro zapojení SK se statistické charakteristiky neuvádějí, neboť všechny údaje, které bychom jejich pomocí mohli určit, je možné stanovit též z charakteristik platných pro zapojení SE.



Obr. 100. Měření statických charakteristik tranzistoru se společným emitorem



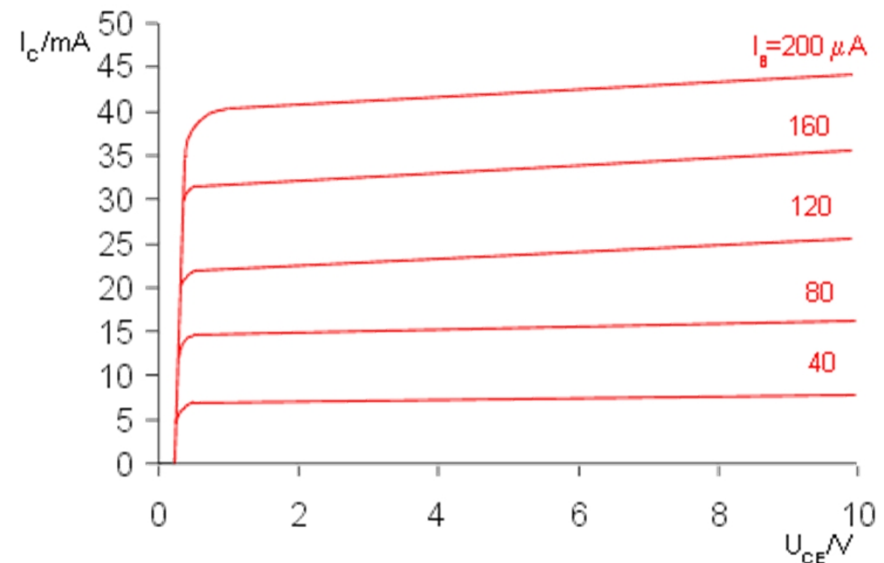
Obr. 101. Charakteristiky tranzistoru NPN se společným emitorem

# Použití (zejména SE)

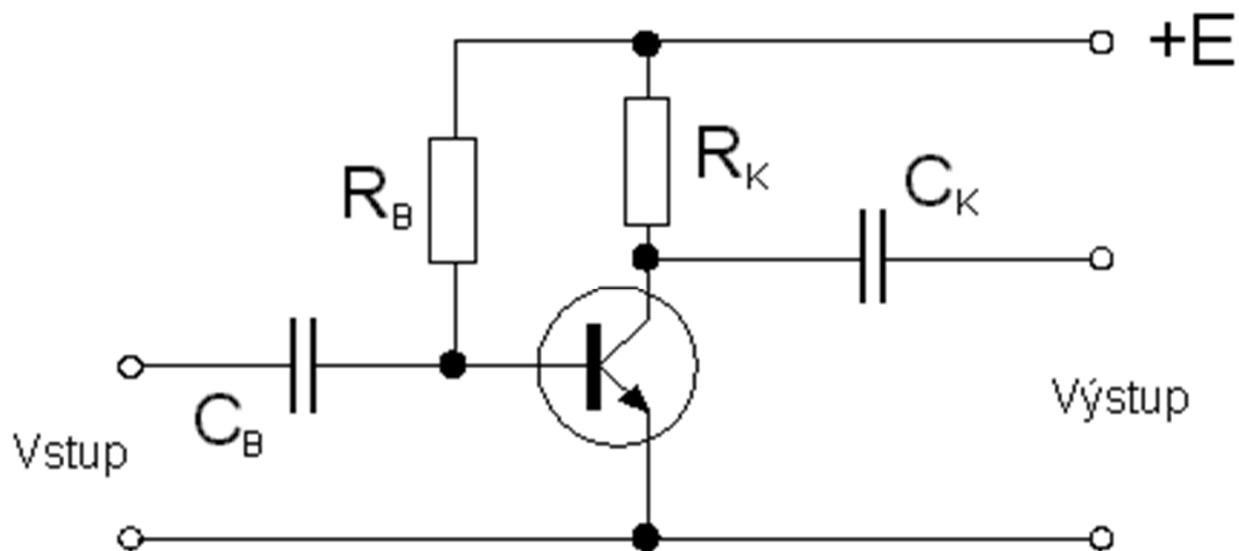
- **1. Jako zesilovač signálu** - na bazi se přivádí malý řídicí proud, kterým se ovládá velký proud v kolektorovém obvodu - zapojení viz obr. 8.
- **2. Jako spínač** - neprochází-li proud bazí, je tranzistor zavřený a funguje jako rozepnutý spínač. Při průchodu určitého proudu bazí se tranzistor otevírá a funguje jako sepnutý spínač.
- **3. V logických obvodech**  
a některých pamětech.

# Zesílení tranzistoru

- Zavádí se tzv. proudový zesilovací činitel  $h_{21e}$ , nebo také  $\beta$
- Jedná se přibližně o poměr kolektorového proudu a proudu tekoucího do báze
- $\beta = I_C / I_B$



# Jednostupňový zesilovač





## Základní zapojení tranzistoru

se společnou bází  
se společným emitorem - nejpoužívanější  
se společným kolektorem

Veličina	Zapojení se společným emitorem	Zapojení se společnou bází	Zapojení se společným kolektorem
Vstupní odpor	malý až střední	značně malý	velmi velký
Výstupní odpor	velký	velmi velký	velmi malý
Napětové zesílení	velké	značně velké	menší než 1
Proudové zesílení	velké	menší než 1	velké
Výkonové zesílení	značně velké	malé až střední	malé až střední
Schéma zapojení			



## Výhody X nevýhody tranzistorů

### **Výhody (vůči elektronkám)**

- malé rozměry
- nepotřebují žhavení
- dlouhá životnost
- otřesuvzdornost

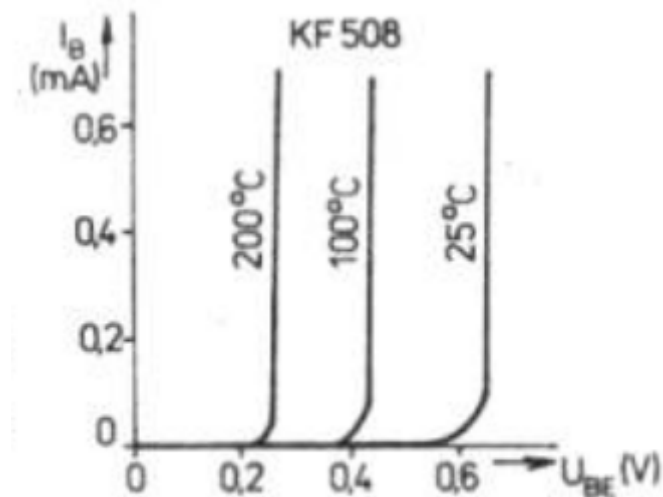
### **Nevýhody (vůči elektronkám)**

- parametry jsou závislé na teplotě
- náchylné na přetížení
- zbytkový proud
- při jaderném ozáření ztrácejí funkčnost



# Parametry závislé na teplotě

- Při zvyšování teploty se zvyšuje vlastní vodivost polovodiče. Nevlastní vodivost se nemění. Rostoucí vlastní vodivost polovodičového materiálu při vzrůstu teploty se v tranzistoru projevuje především těmito příznaky:
  - Růstem zbytkového proudu, z toho plynoucím zvětšováním proudu kolektoru, zkreslováním průběhu výstupních charakteristik a zmenšováním dovolených napětí mezi elektrodami.
  - Zmenšováním napětí báze-emitor. Tím dochází ke zkreslování tvaru vstupní charakteristiky.
  - Změnou vlastností tranzistoru pro změny napětí a proudů (změnou dynamických vlastností). Dochází např. k růstu proudového zesilovacího činitele  $h_{21E}$ .



Obr. 108. Vliv teploty na napětí báze-emitor tranzistoru

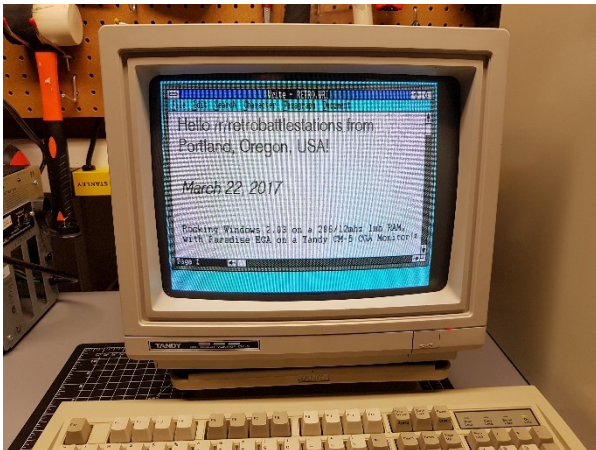
# Ztráta funkce při radiaci

- Nejdůležitějším mechanismem radiačního poškození v bipolárních tranzistorech (BJT) je zhoršování stejnosměrného zesílení při nízkých proudech, což má za následek degradaci proudového zesilovacího činitele  $\beta_{DC}$
- <https://youtu.be/MWGpXotLFVQ?t=3416>



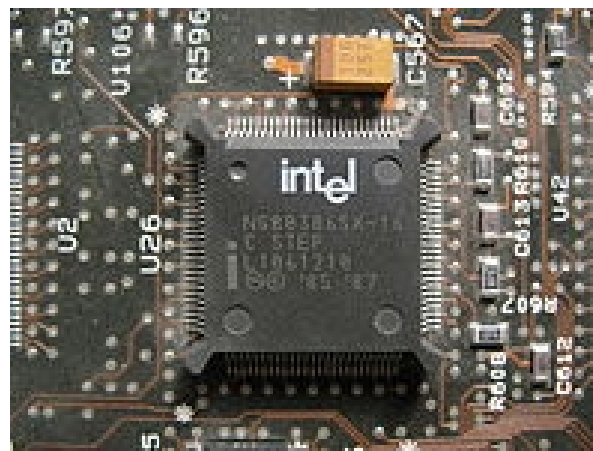
# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel 80286
  - 1982
  - 4 – 25 MHz (s chladičem), 16 bit
  - 1,5  $\mu\text{m}$  technologie
  - 134 000 tranzistorů



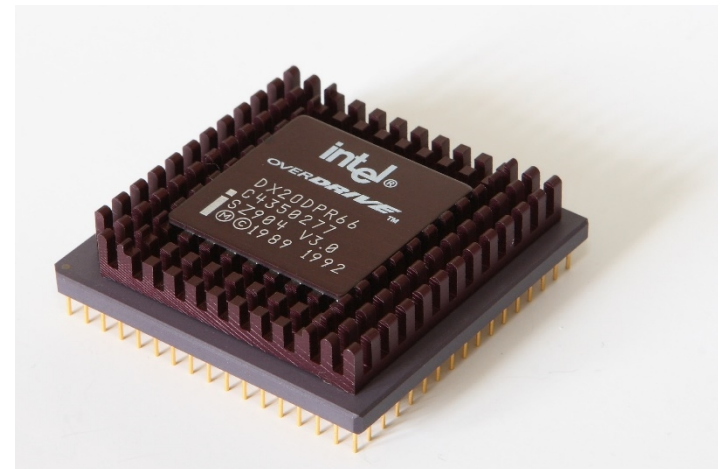
# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel 80386
  - 1985
  - 12 – 40 MHz, 32 bit
  - 1,5 a 1  $\mu\text{m}$  technologie
  - 275 000 tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel 80486
  - 1989
  - 16 – 50 MHz, 32 bit
  - 1  $\mu\text{m}$  technologie
  - 1,2 milionu tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Pentium
  - 1993
  - 60 – 300 MHz, 32 bit
  - 600 nm technologie
  - 3,1 milionu tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Pentium II
  - 1997
  - 233 – 500 MHz, 32 bit
  - 350 - 180 nm technologie
  - 7,5 milionu tranzistorů





# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Pentium III
  - 1999
  - 450 MHz – 1,4 GHz, 32 bit
  - 250 - 130 nm technologie
  - 9,5 milionu tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Pentium 4
  - 2000
  - 1,3 – 3,8 GHz, 32 i 64 bit
  - 180 - 64 nm technologie
  - 42 - 125 milionu tranzistorů
- ráj overclockerů
- <https://www.youtube.com/watch?v=z0jQZxH7NgM>



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Core 2
  - 2006
  - 1 – 3,33 GHz, 32 i 64 bit
  - 65 - 45 nm technologie
  - 230 – 800 milionu tranzistorů
- ráj overclockerů
- <https://www.youtube.com/watch?v=z0jQZxH7NgM>





# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Core i7 (Nehalem)
  - 2008
  - 2,67 – 3,33 GHz, 64 bit
  - 45 nm technologie
  - 731 milionu tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Core i7 (Sandy Bridge)
  - 2012
  - 3,6 – 3,8 GHz, 64 bit
  - 32 nm technologie
  - 1,27 miliardy tranzistorů



# Vývoj počtu tranzistorů v CPU

- Intel Core i9 (Coffee Lake)
  - 2019
  - 3,6 – 5 GHz, 64 bit
  - 14 nm technologie
  - 3,052 miliardy tranzistorů



# Stabilizátory napětí

- udržují konstantní výstupní napětí při změnách napájecího napětí a zátěže
- umisťují se mezi filtrační obvod (omezuje zvlnění napětí) a zátěž (napájené elektronické zařízení)
- předřazený filtr změkčuje zdroj

Ke změnám vstupního napětí může docházet v důsledku:

- kolísání napájecí sítě 230V – tolerance  $\pm 10\%$
- změn zatěžovacího proudu (odporu) = úbytku na vnitřním odporu zdroje

# Stabilizátory se dělí:

a) Podle stabilizované veličiny na:

- stabilizátory **napětí**
- stabilizátory **proudu**

b) Podle principu na:

- **pasivní** (parametrické) - využívají nelineární prvek, nejčastěji Zenerovu (stabilizační) diodu, pro malé výkony lze použít i LED diody
- **aktivní** - používají zpětnovazební obvod ovládající aktivní prvek - NPN tranzistor

nebo:- **spojité** - malá účinnost - do 50%

- **s pulzní regulací** - vyšší účinnost - 65-80%

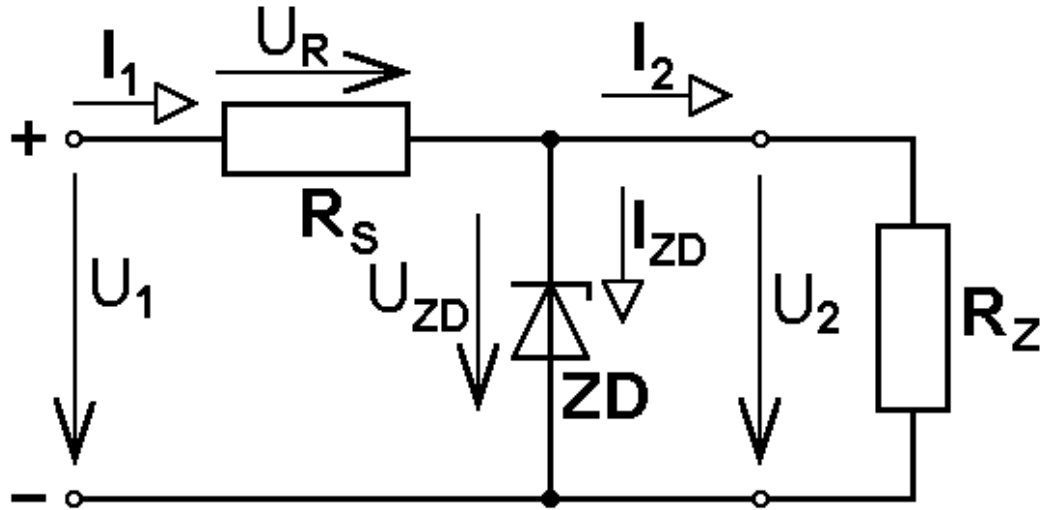
# Činitel stabilizace

Vyjadřuje kolikrát stabilizátor zmenší poměrné kolísání výstupního napětí při kolísání napětí vstupního při konstantním odporu zátěže



$$k = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}}$$

# Parametrický (pasivní, paralelní) stabilizátor napětí



$$I_1 = I_{ZD} + I_2$$

$$U_1 = U_R + U_{ZD}$$

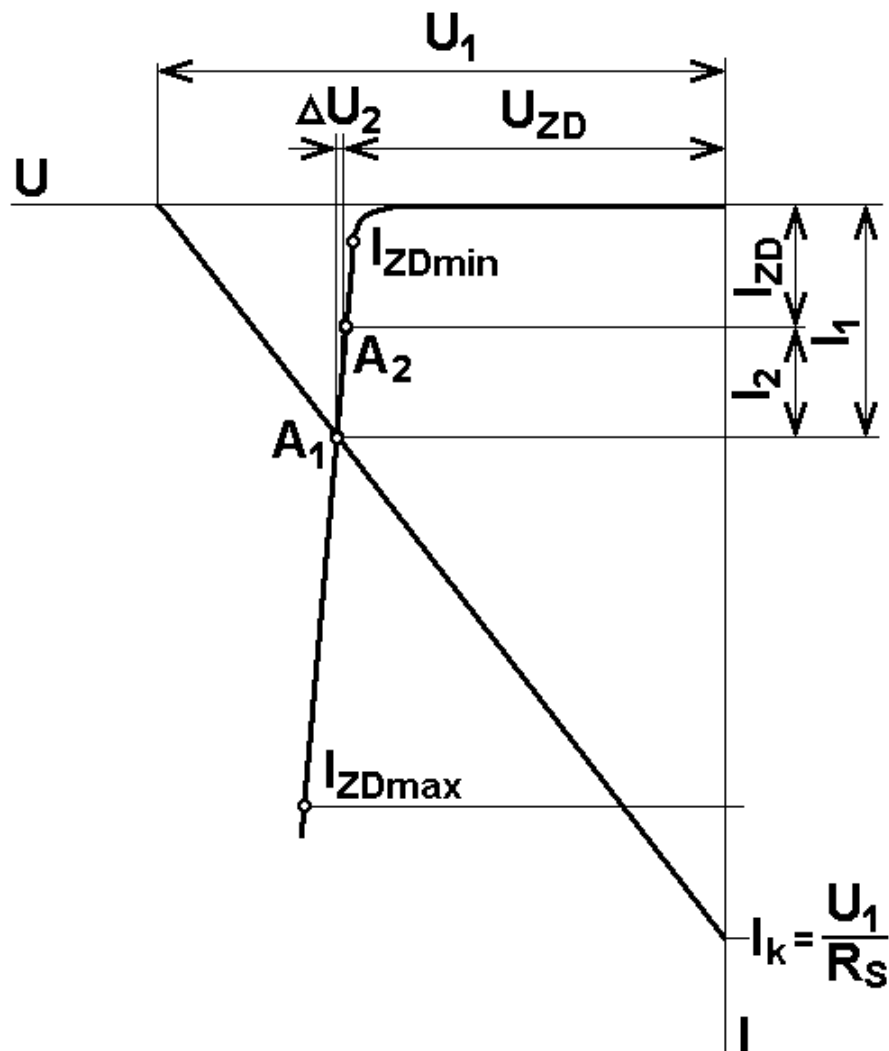
$$U_2 = U_{ZD}$$

$$U_R = R_S \cdot I_1$$

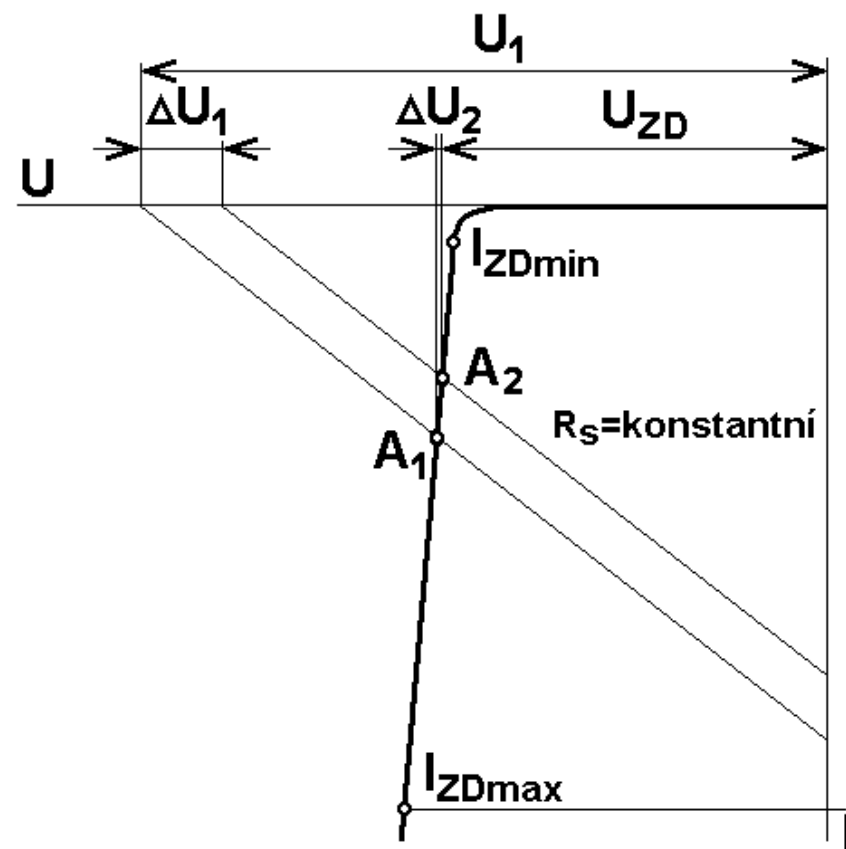
$$R_S = \frac{U_{1\max} - U_{ZD}}{I_{ZD\min} + I_{2\max}}$$

- pro  $I_{ZD} > I_{ZD\min}$  udržuje stabilizační dioda přibližně konstantní výstupní napětí
- stabilizace se realizuje úbytkem napětí na rezistoru  $R_S$
- $I_{ZD\min}$  počátek lineární části V-A charakteristiky stabilizační diody

# VA charakteristiky parametrického stabilizátoru



Pracovní body nezatíženého  
a zatíženého stabilizátoru



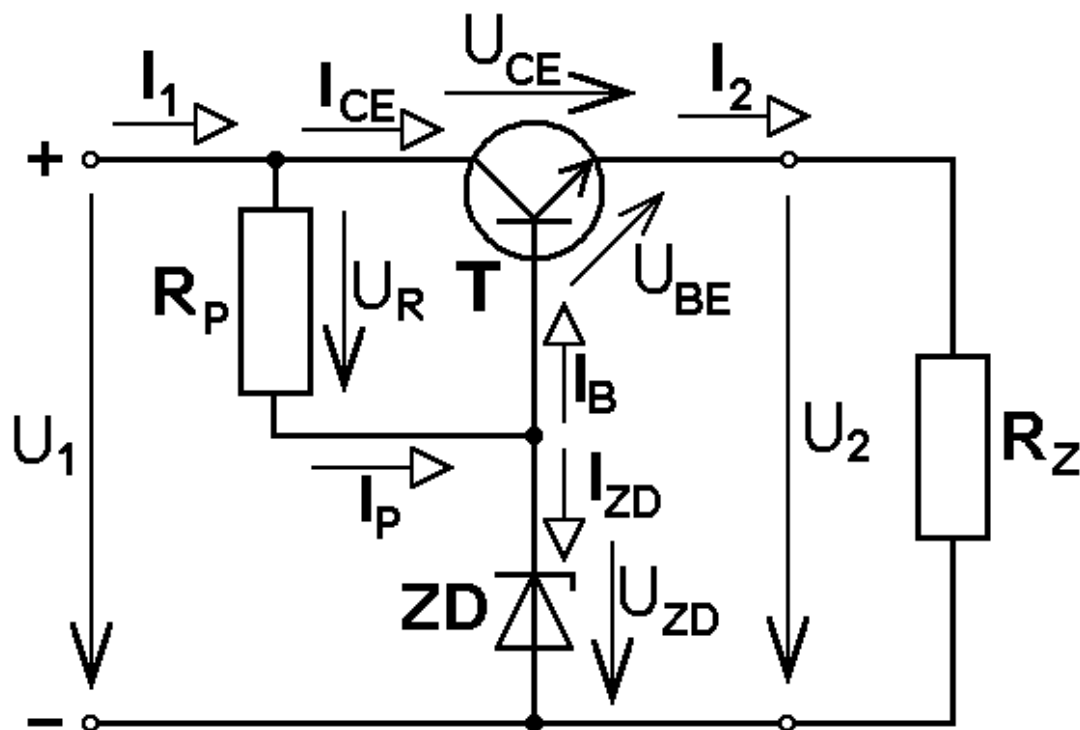
Vliv změny napájecího napětí  
na pracovní bod stabilizátoru



# Vlastnosti paralelního stabilizátoru

- + jednoduchost návrhu i realizace
- + zkratová odolnost  $U_{ZD}=U_2=0$
- malá účinnost - zahřívání způsobí změnu pracovního bodu
- nepřesnost diod způsobuje velký rozptyl výstupního napětí
- nízký činitel stabilizace
- naprázdno jsou ztráty 100% - diodou teče maximální proud  $I_1=I_{ZD}$

# Sériový (aktivní) stabilizátor napětí



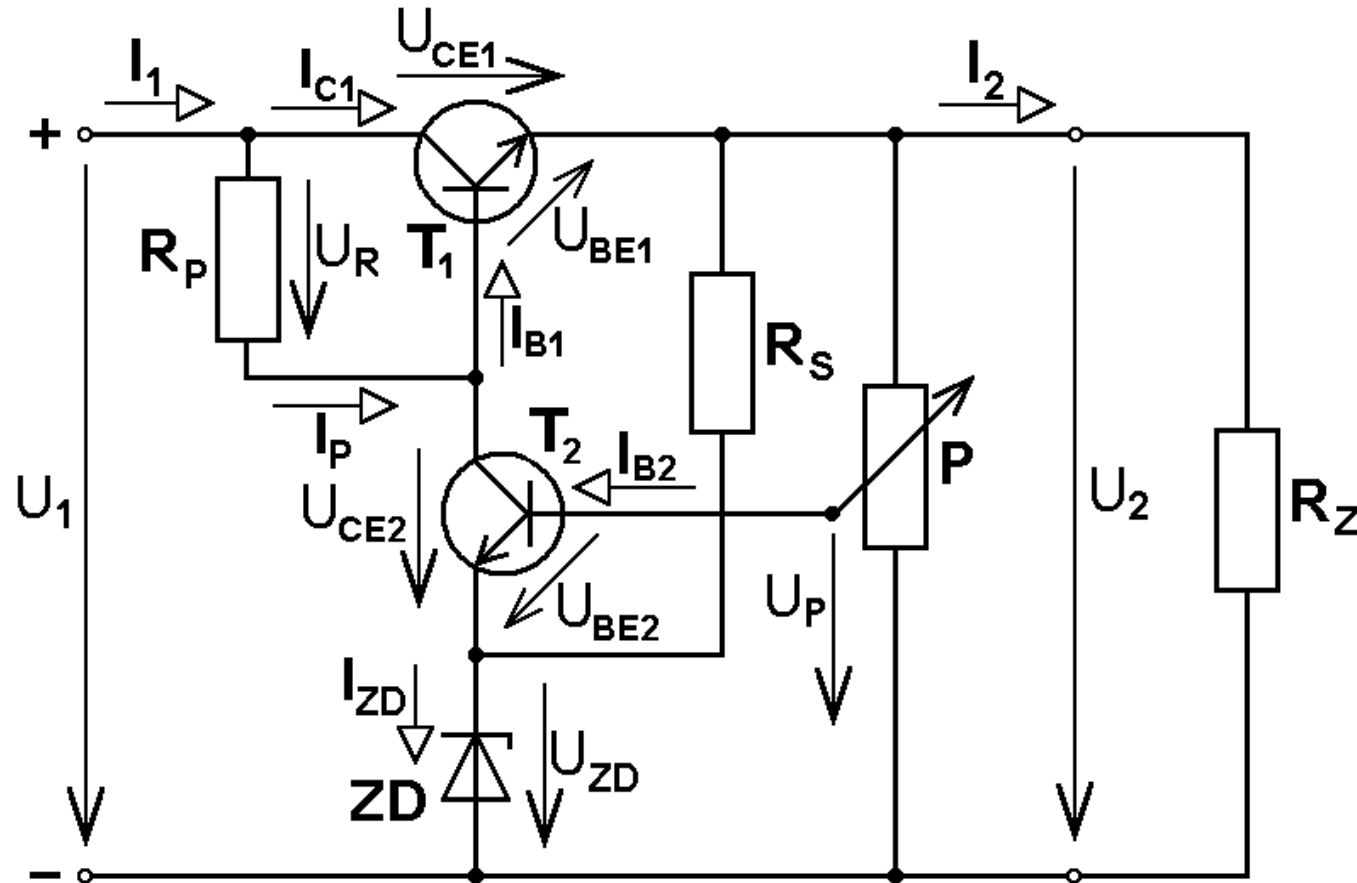
Stabilizační dioda udržuje konstantní napětí na bázi tranzistoru

$$U_2 = U_{ZD} - U_{BE}$$
$$U_{BE} \approx 0,7V$$

# Vlastnosti sériových stabilizátorů:

- + menší rozptyl hodnot - vyšší stálost napětí
- + vyšší účinnost
- + vyšší činitel stabilizace
- není zkratu odolný !
- složitější realizace
- $U_1$  musí být nejméně o 3V vyšší než  $U_2$
- naprázdno je výstupní napětí o  $U_{CE}$  ( $\cong 0,7V$ ) vyšší než jmenovité ! - nedoporučuje se provozovat naprázdno

# Regulovatelný stabilizovaný zdroj napětí



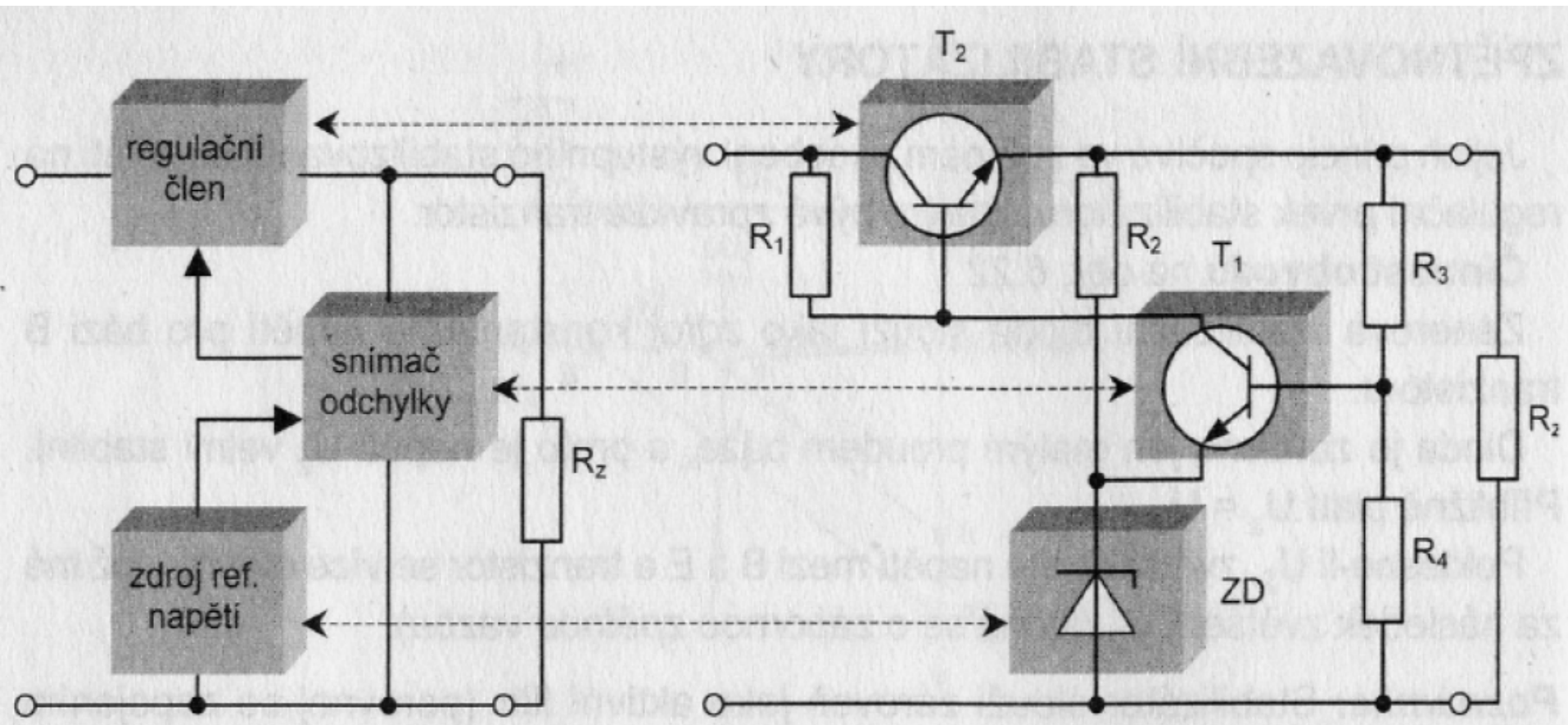
Princip:  $U_2 \downarrow \rightarrow U_P \downarrow \rightarrow U_{BE2} \downarrow$   
 $\Rightarrow T_2$  se přivře  $\rightarrow U_{CE2}$   
 $\Rightarrow$  napětí na bázi  $T_1 \uparrow \Rightarrow U_2 \uparrow$

$$U_2 = U_1 - U_{CE1}$$

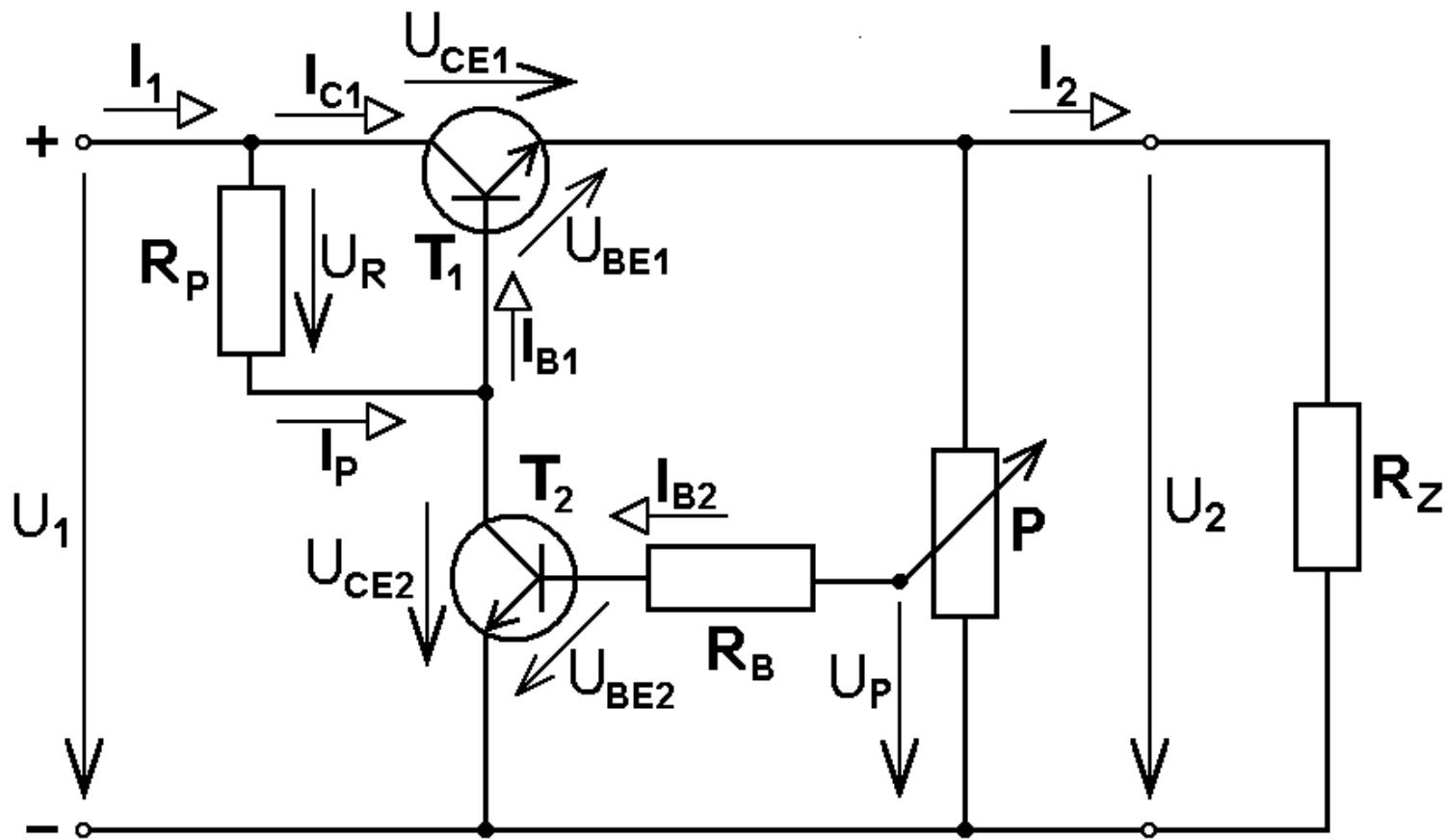
$$U_{BE2} = U_P - U_{ZD}$$

$$U_2 = U_{CE2} + U_{ZD} - U_{BE1}$$

# Regulovatelný stabilizovaný zdroj napětí



# Regulovatelný stabilizovaný zdroj napětí bez stabilizační diody

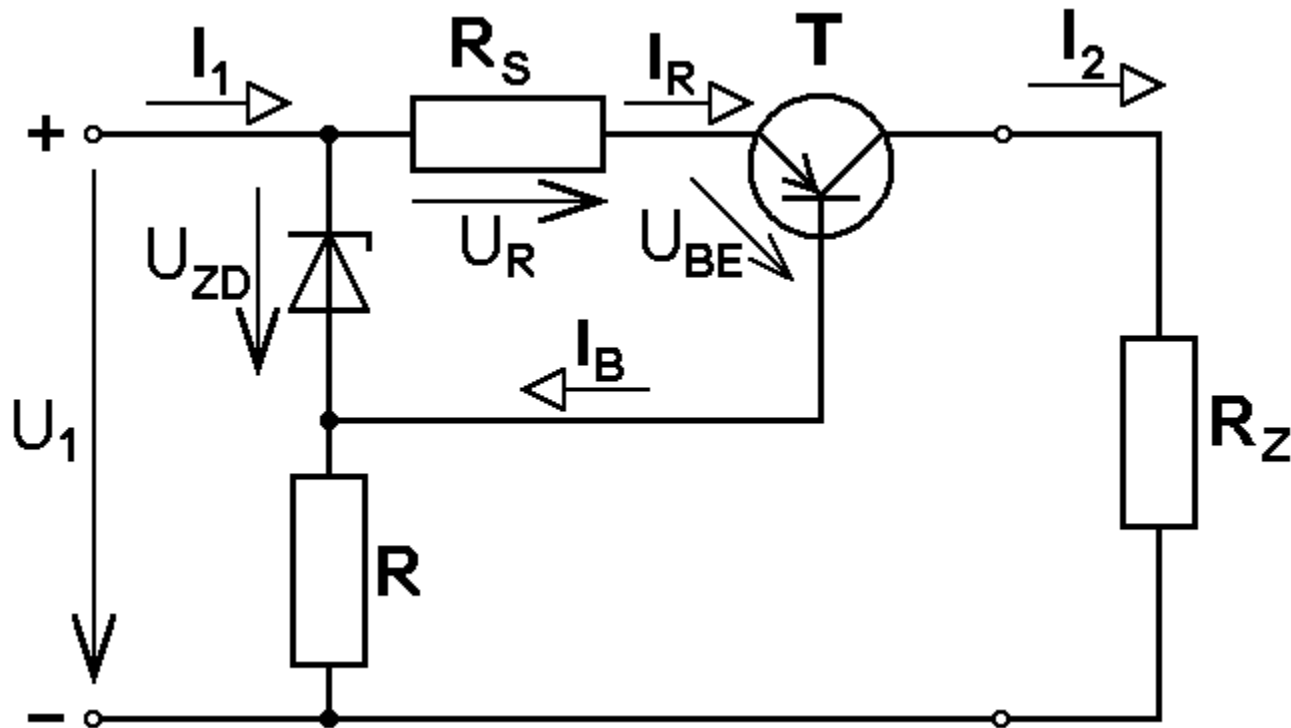


Princip:  $U_2 \downarrow \rightarrow U_P \downarrow \rightarrow U_{BE2} \downarrow$   
 $\Rightarrow T_2$  se přivře  $\rightarrow U_{CE2}$   
 $\Rightarrow$  napětí na bázi  $T_1 \uparrow \Rightarrow U_2 \uparrow$

$$U_2 = U_1 - U_{CE1}$$

$$U_2 = U_{CE2} - U_{BE1}$$

# Zdroj proudu



## Princip:

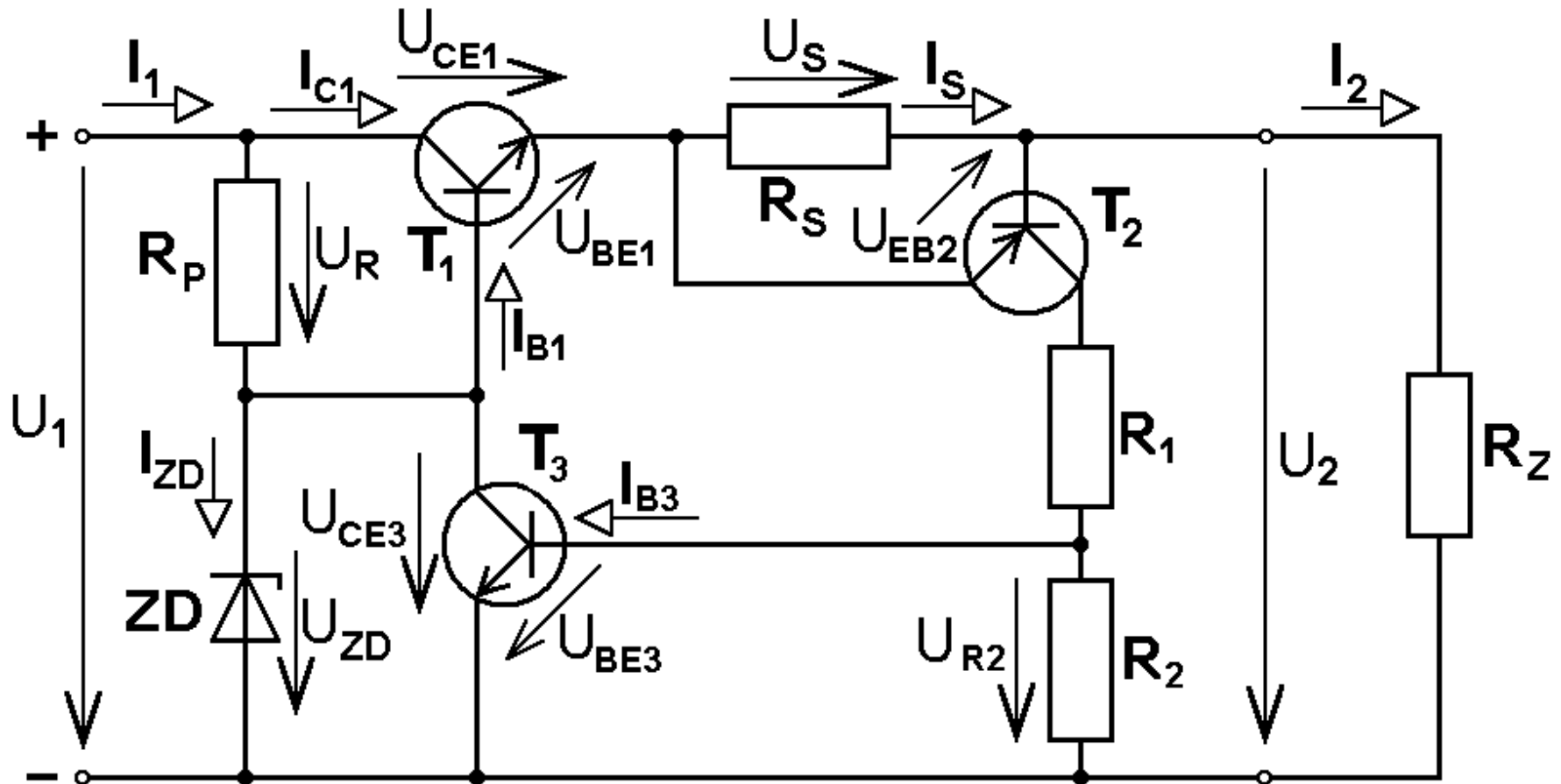
Hodnota proudu vychází z konstantního napětí na rezistoru  $R_S$

$$U_R = U_{ZD} - U_{BE}$$

$$U_{BE} \approx 0,7V \quad U_{ZD} \approx \text{konst.}$$

$$I_R = U_R / R_S$$

# Stabilizátor napětí s proudovou ochranou



Princip nadproudové ochrany:  $I_2 \uparrow \Rightarrow U_S \uparrow \Rightarrow T_2$  se otevře  
 $U_{BE3} \uparrow \Rightarrow T_3$  se otevře  $\Rightarrow U_{CE3} \downarrow \Rightarrow$  napětí na bázi  $T_1 \downarrow \Rightarrow$   
 $U_2 \downarrow$  maximální hodnota proudu  $I_{2MAX} = U_{EB2} / R_S$



# Integrované stabilizátory

- zjednodušují realizaci napájecích zdrojů
- vyrábí se jako stabilizátory:
  - a) pevně nastavených
    - 1) kladných napětí
    - 2) záporných napětí
  - b) nastavitelné stabilizátory
- dále jako stabilizátory s proudovým omezením a jako stabilizátory symetrického napětí ( $+U$  a  $-U$  s vyvedenou zemí)
- většinou se jedná o sériové stabilizátory  $\Rightarrow$  napájecí napětí musí být o cca 3V vyšší než výstupní