

# **BIK-TZP.21 – Technologické základy počítačů**

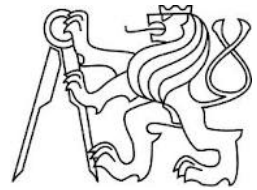
**ZS 2021/22  
2. sobota**

***doc. Ing. Kateřina Hyniová, CSc.***

***[hyniova@fit.cvut.cz](mailto:hyniova@fit.cvut.cz)***

***Katedra číslicového návrhu, FIT ČVUT v Praze  
kancelář A:1033***

# Přednáška 2B– Tranzistory

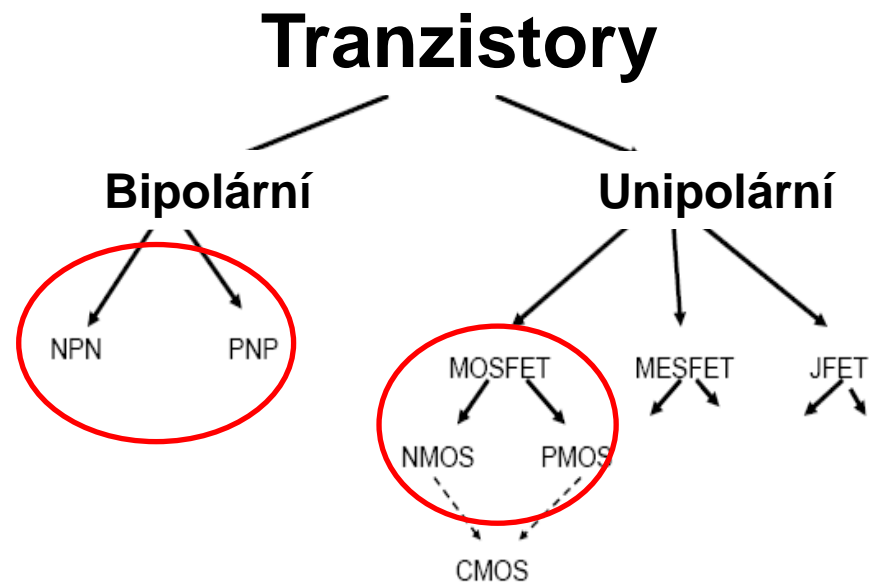


1. Úvod
2. Bipolární tranzistory
3. Analýza obvodu s tranzistorem
4. Výkonová ztráta v obvodech s bipolárními tranzistory
5. Unipolární MOS FET tranzistory
6. Výkonová ztráta v obvodech s unipolárními tranzistory

# 1. Úvod

❑ Tranzistory jsou polovodičové součástky se **3 vývody** používané zejména k **zesilování a spínání signálů**.

❑ Jako spínače mohou zaujímat 2 stavy **on** a **off**. Tato binární funkcionality tranzistorů je důvodem, proč se tranzistor stal klíčovou součástí v moderních počítačích. Umožňuje totiž pracovat s binární logikou (0 a 1).



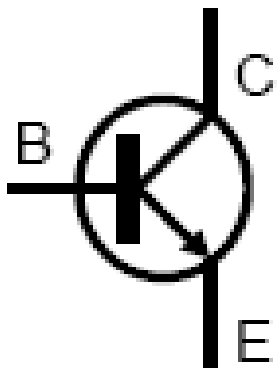
# Tranzistory

## Bipolární

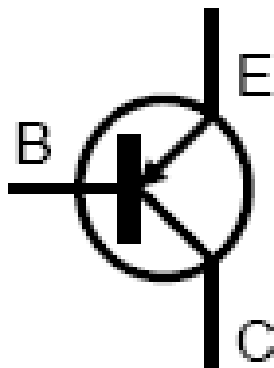
Jako proudové zdroje  
a spínače jsou **řízeny**  
**el. proudem**

## Unipolární

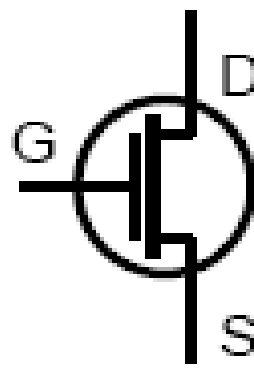
Jako proudové zdroje  
a spínače jsou **řízeny**  
**el. napětím**



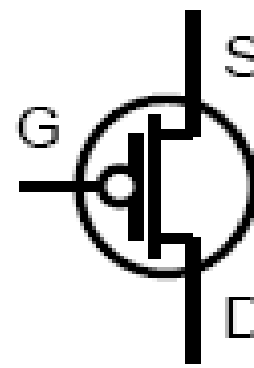
NPN



PNP



NMOS

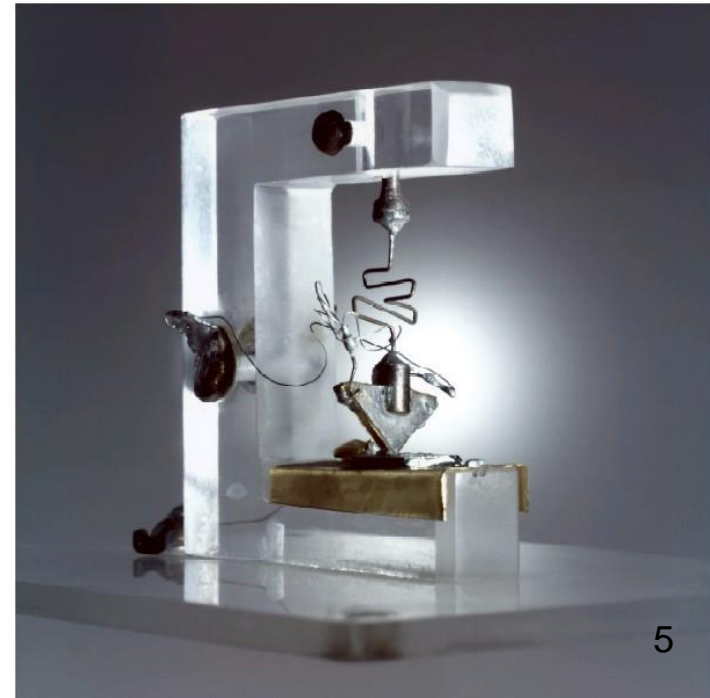


PMOS

- ❑ **Transistor** vynalezen v 1947 v Bellových laboratořích, USA
- ❑ Bardeen, Brattain, and Shockley obdrželi za vynález Nobelovu cenu v roce 1950

<https://www.ipwatchdog.com/2017/04/03/transistor-shockley-bardeen-brattain-modern-electronics/id=79427/>

- ❑ Původní tranzistor germaniový
- ❑ Dnešní tranzistory převážně vyráběny z dopovaného křemíku.



# Bipolární tranzistor

Malý el. proud tekoucí do báze B řídí velký proud tekoucí z kolektoru C do emitoru E a určuje, zda bude tranzistor pracovat jako spínač nebo jako zesilovač.

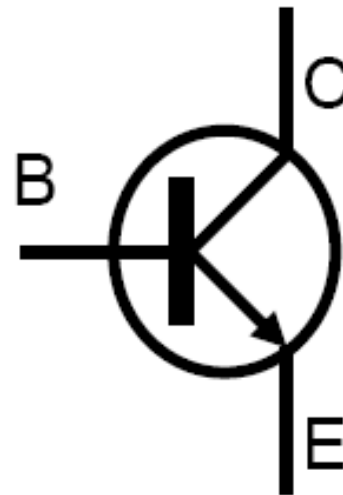
Aktivní elektronický prvek

Se 3 vývody:

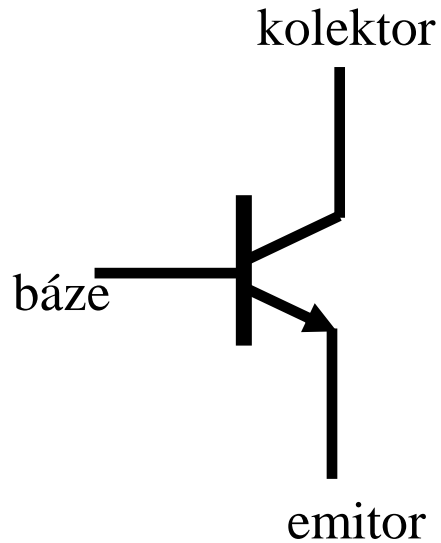
B... báze

C... kolektor

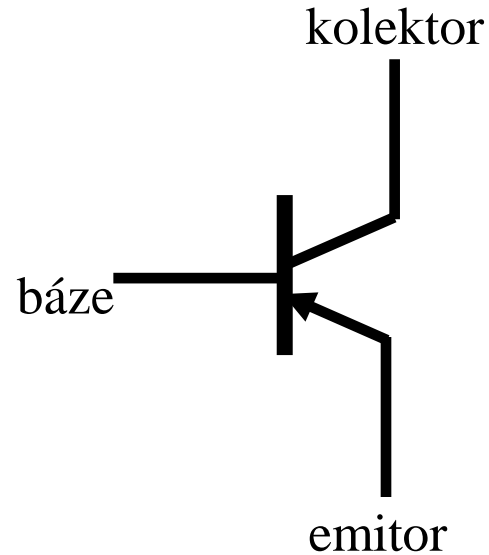
E.....emitor



# Schematické symboly



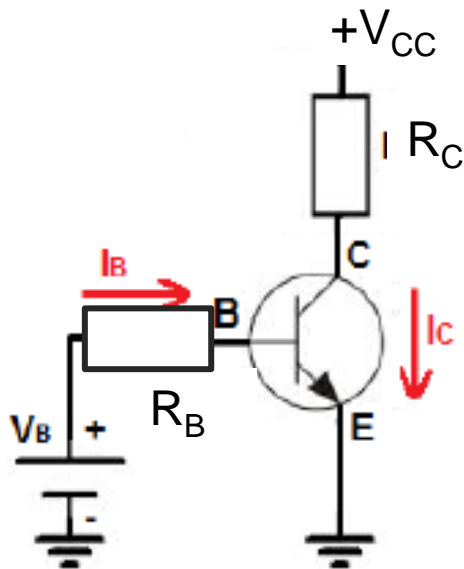
NPN tranzistor



PNP tranzistor

# NPN tranzistor

(zapojení se společným emitorem)

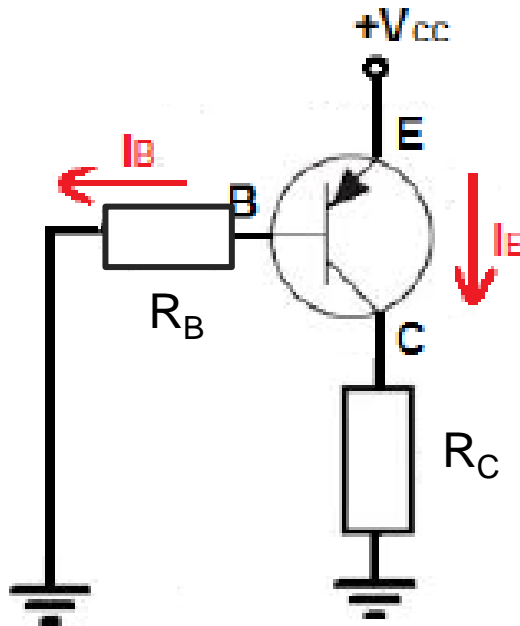


V NPN tranzistoru je napětí  $+V$  připojeno ke kolektoru a kolektorový proud  $I_C$  teče od kolektoru k emitoru. Napětí  $V_B > V_E$  otevírá tranzistor a určuje, zda bude tranzistor v režimu „zesilovač“ nebo „spínač“.  $V_C > V_B$ .



# PNP tranzistor

**NPN a PNP** jsou funkčně podobné, liší se ale opačnou polaritou: tam, kde u NPN teče proud jedním směrem, teče u PNP opačným. V následujících příkladech budeme používat NPN tranzistor, ve všech těchto zapojeních ale jde použít i PNP tranzistor, když obrátíme orientaci všech proudů i napětí v obvodu včetně polarity napájecích zdrojů.

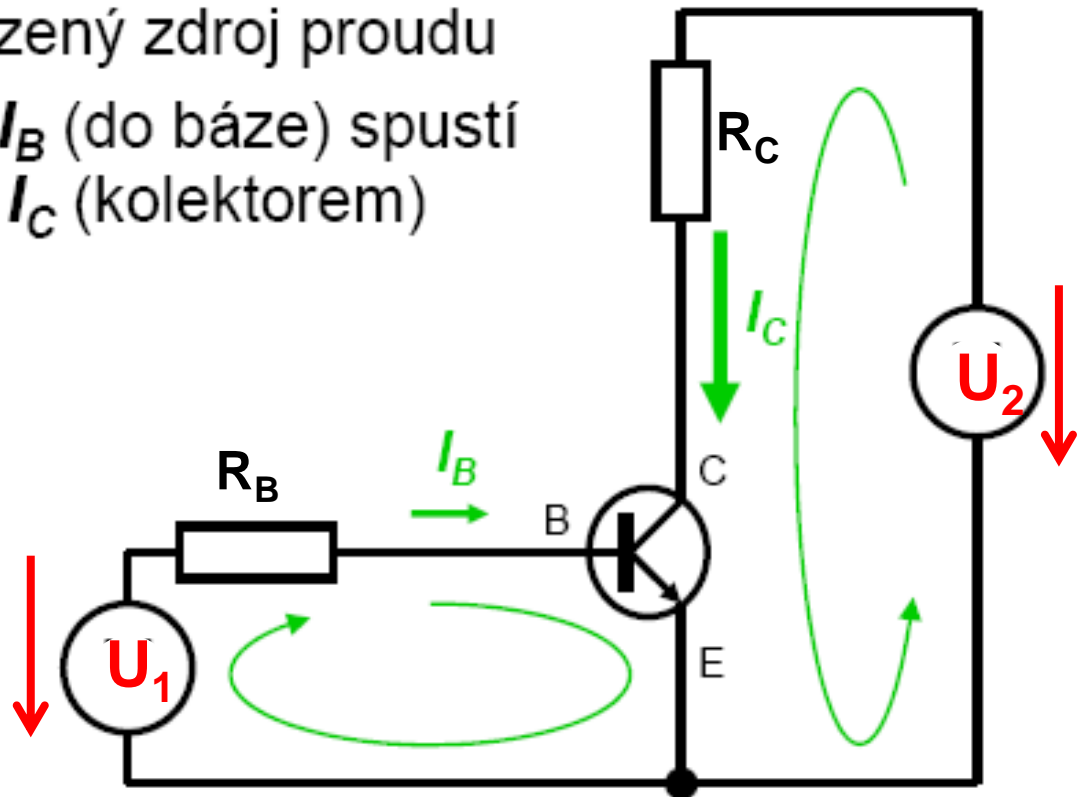


V PNP tranzistoru je napětí  $+V$  připojeno k emitoru a proud  $I_E$  teče od emitoru ke kolektoru. Proud  $I_B$  vytéká ven z báze.

Malý proud tekoucí bází (tj. z báze do emitoru v NPN) řídí relativně velký proud  $I_C$  z C do E.

**Zapojení se společným emitorem - zdroje napětí  $U_1$  a  $U_2$  a emitor mají společnou zem.**

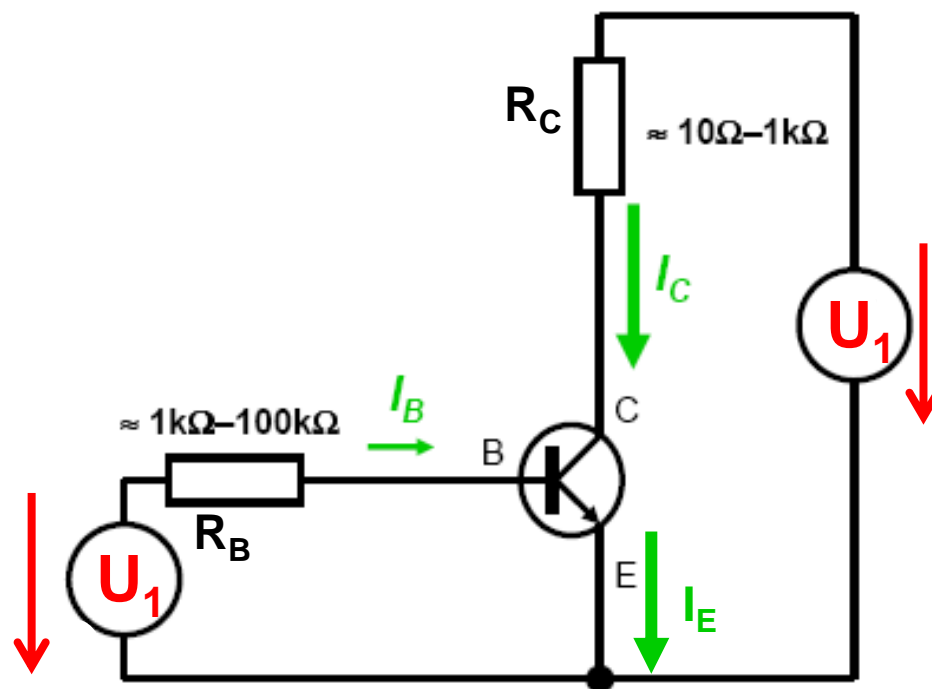
- *proudem* řízený zdroj proudu
- malý proud  $I_B$  (do báze) spustí velký proud  $I_C$  (kolektorem)



## Zesilovač se společným emitorem

K nastavení pracovního bodu tranzistoru se zapojují do báze B resp. kolektoru C odpory  $R_B$  resp.  $R_C$ .  $R_B$ , aby protékal malý proud rezistorem do báze  $R_C$ , Omezuje proud  $I_C$ , když je tranzistor sepnutý.

$$I_E = I_C + I_B$$

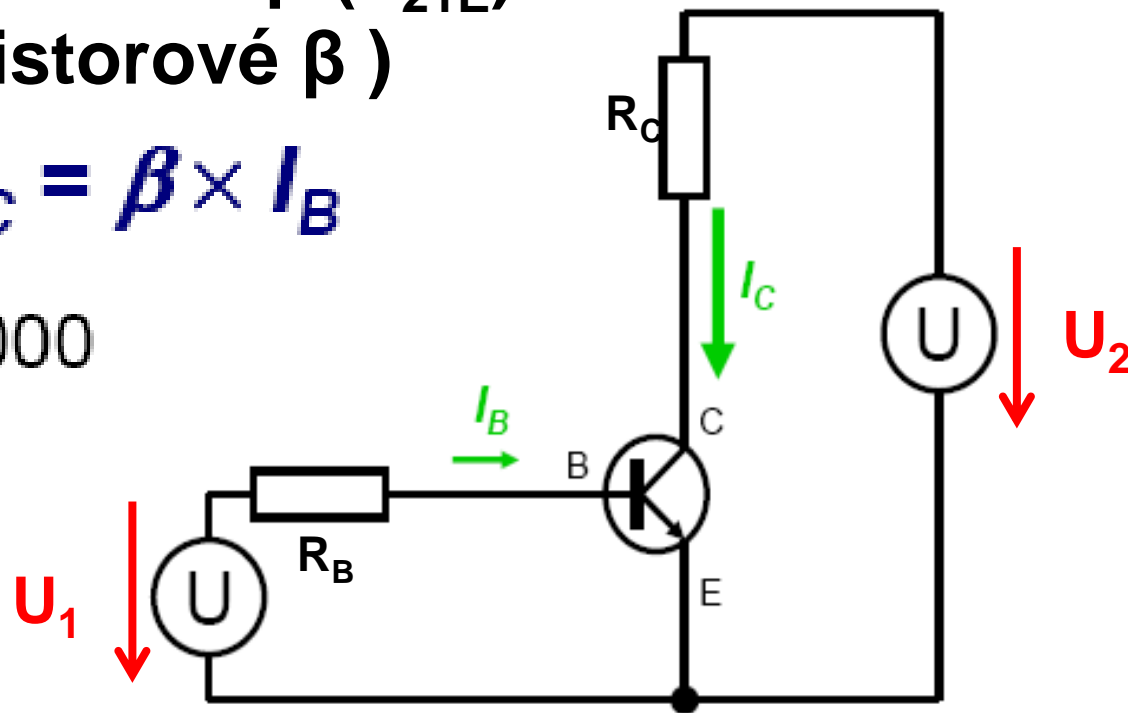


# Tranzistor NPN jako zesilovač zapojení se společným emitorem (analýza obvodu)

Zesilovací činitel  $\beta$  ( $h_{21E}$ )  
(tzv. tranzistorové  $\beta$ )

$$I_C = \beta \times I_B$$

$$\beta \approx 10 - 1000$$

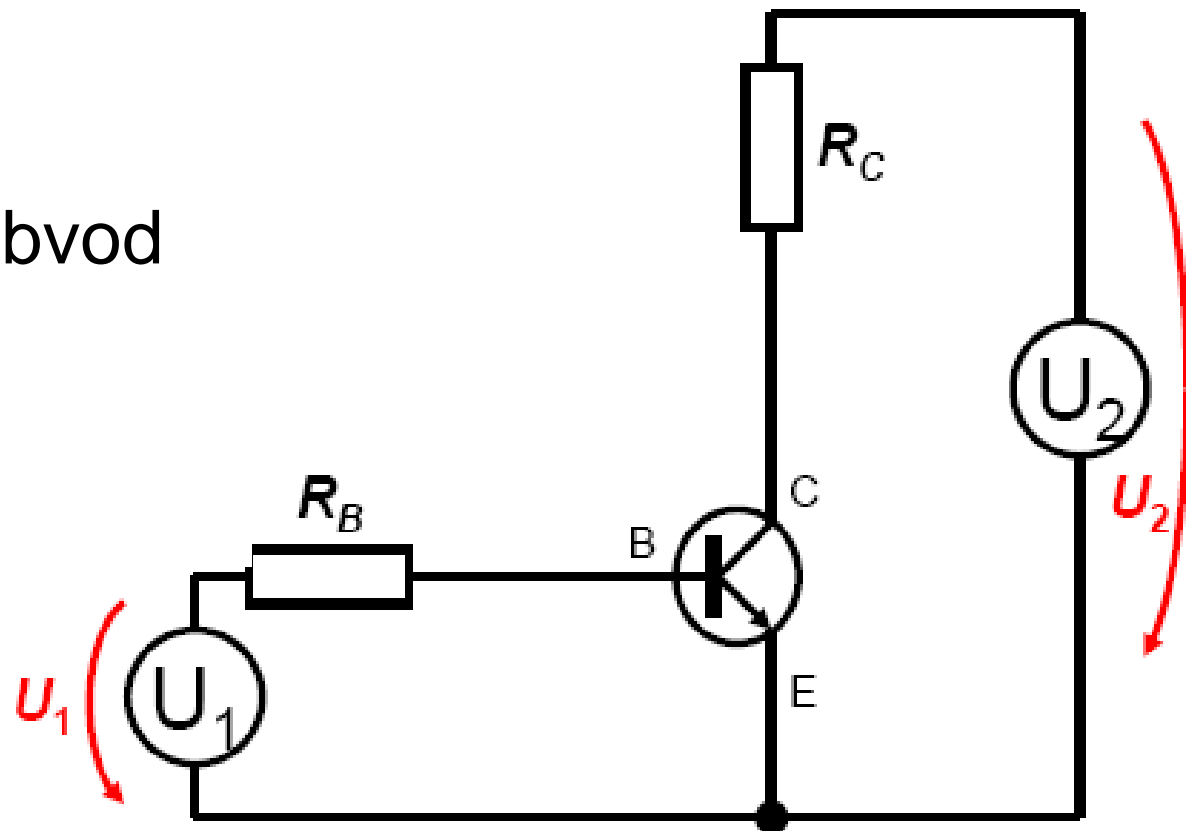


# 3. Analýza obvodu s tranzistorem

## Příklad #1:

Analyzujte obvod s tranzistorem NPN-zapojení se společným emitorem. Obvod pracuje v zesilovacím režimu.

$$U_1 = 5V, U_2 = 5V, \\ R_B = 50k\Omega, R_C = 200\Omega, \\ \beta = 100$$

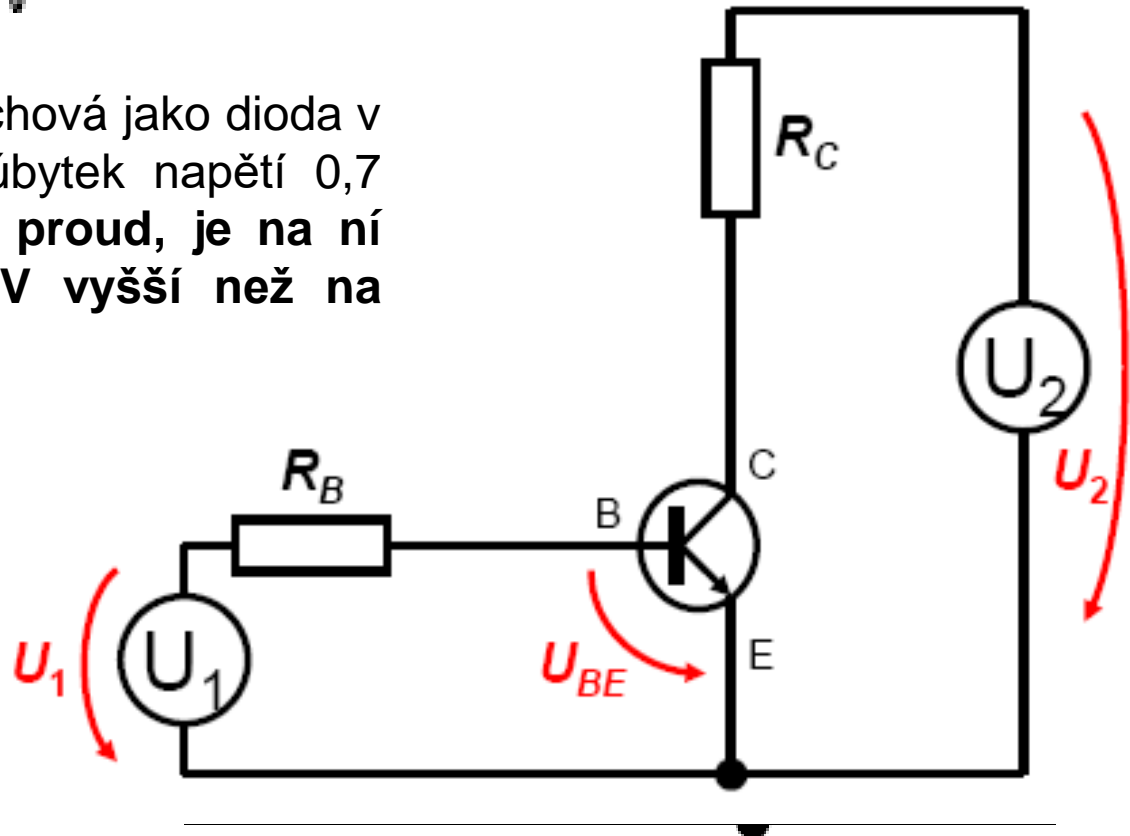


# Příklad #1

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

■  $U_{BE}=0,7V$

přechod báze-emitor se chová jako dioda v otevřeném směru: má úbytek napětí 0,7 V. **Pokud bází protéká proud, je na ní vždy potenciál o 0,7 V vyšší než na emitoru.**

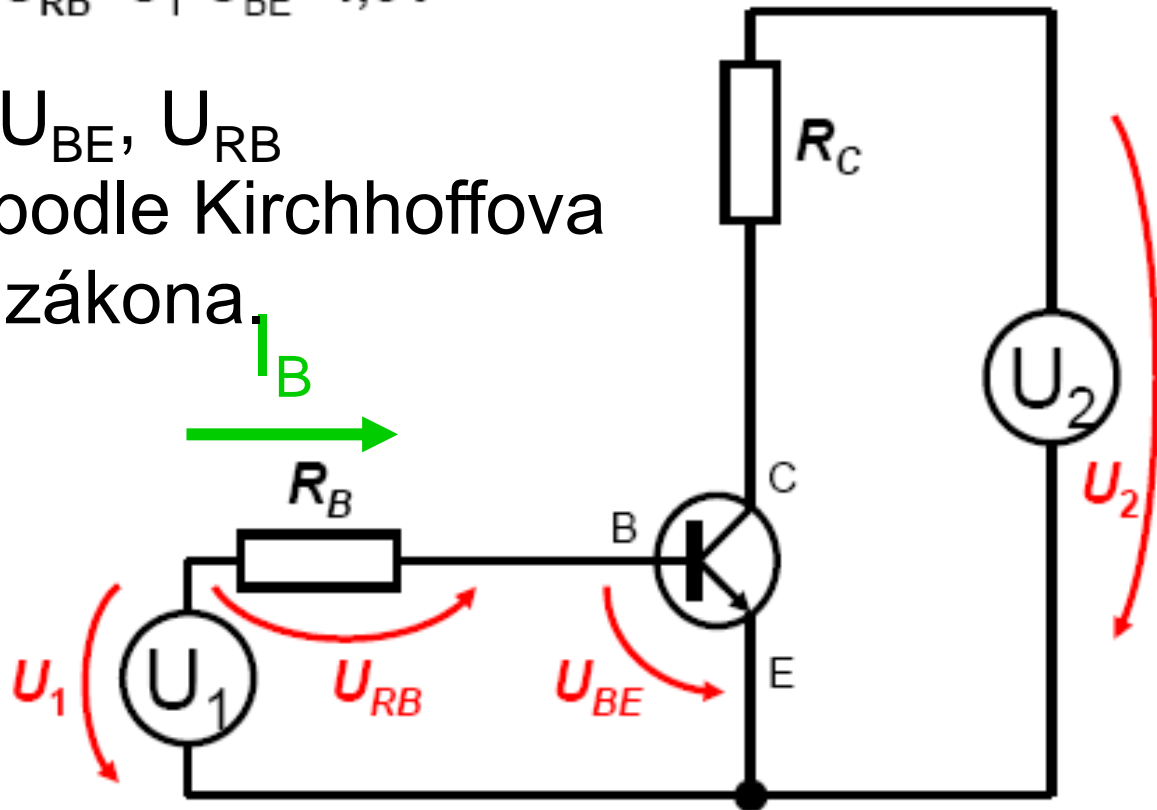


## Příklad #2

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

$$\blacksquare U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$$

Známe  $U_1$  a  $U_{BE}$ ,  $U_{RB}$   
vypočítáme podle Kirchhoffova  
napěťového zákona.

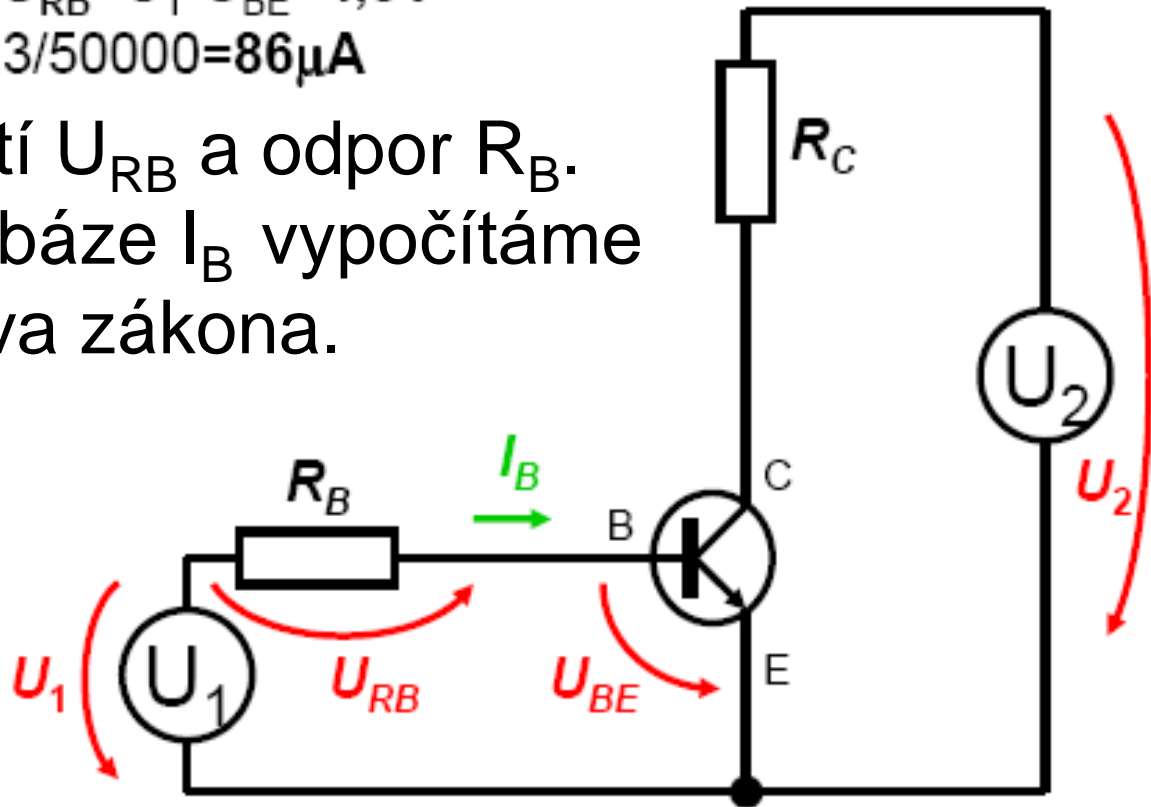


## Příklad #2

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$

Známe napětí  $U_{RB}$  a odpor  $R_B$ .  
El. proud do báze  $I_B$  vypočítáme  
podle Ohmova zákona.



Nyní již známe hodnoty všech el. veličin v bázové smyčce.  
Pokračujeme výpočtem veličin v kolektorové smyčce.



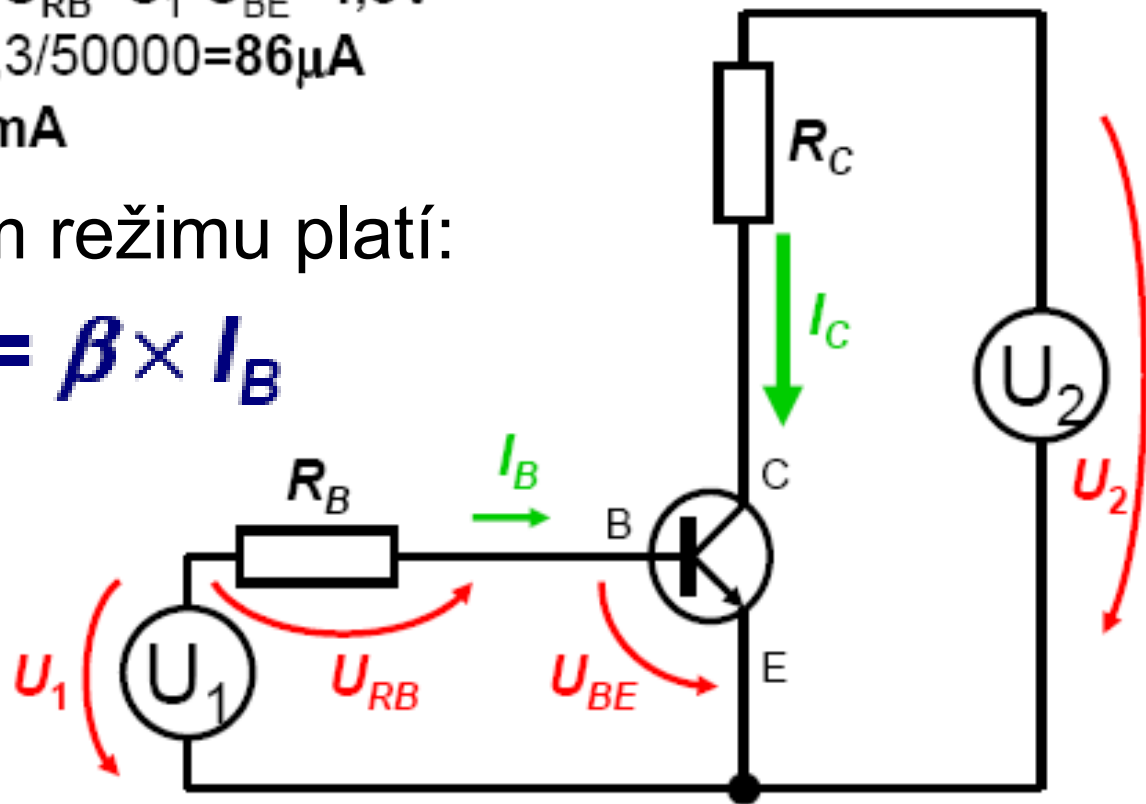
## Příklad #2

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$

V zesilovacím režimu platí:

$$I_C = \beta \times I_B$$

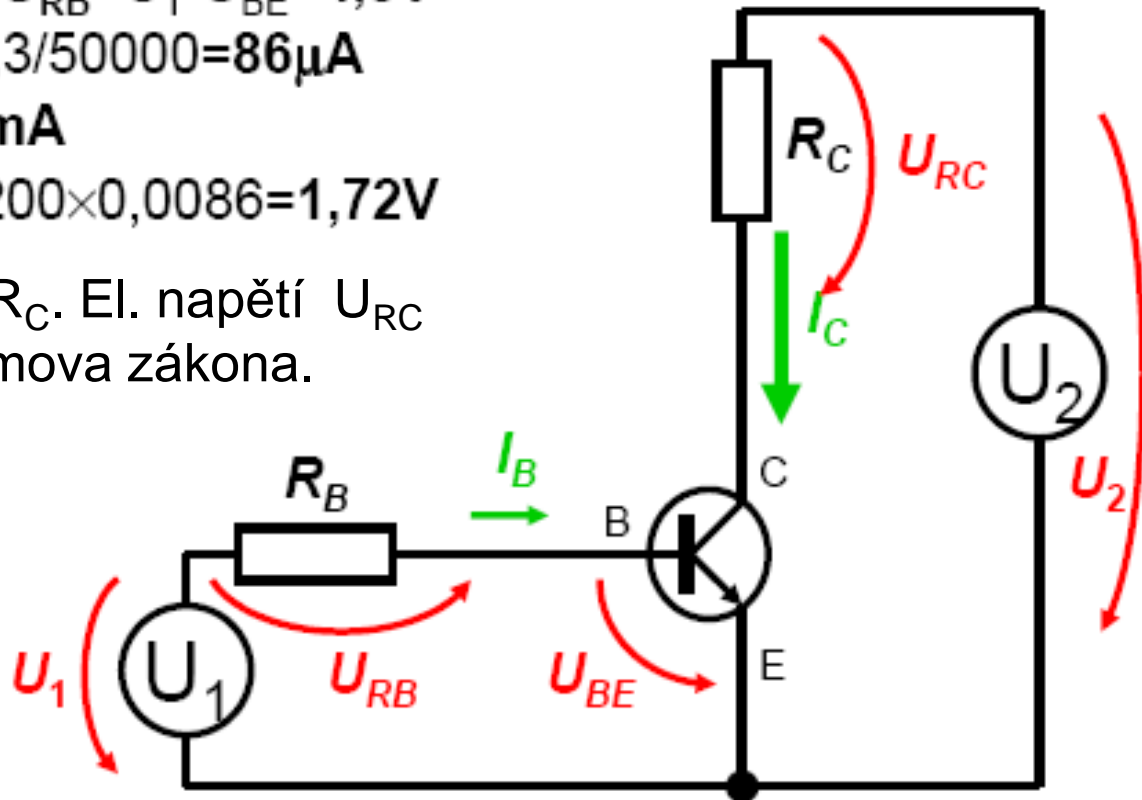


## Příklad #2

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,0086=1,72V$

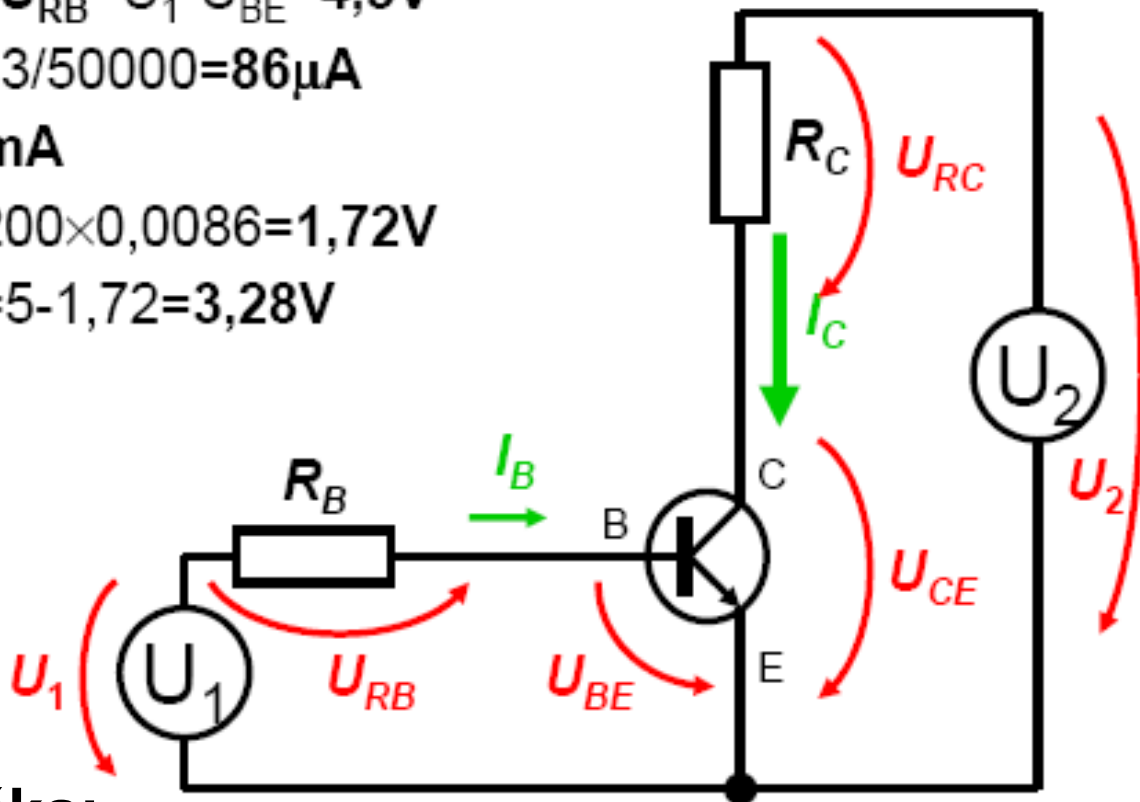
Známe el.  $I_C$  a odpor  $R_C$ . El. napětí  $U_{RC}$  vypočítáme podle Ohmova zákona.



## Příklad #2

$$U_1=5V, U_2=5V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,0086=1,72V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=5-1,72=3,28V$



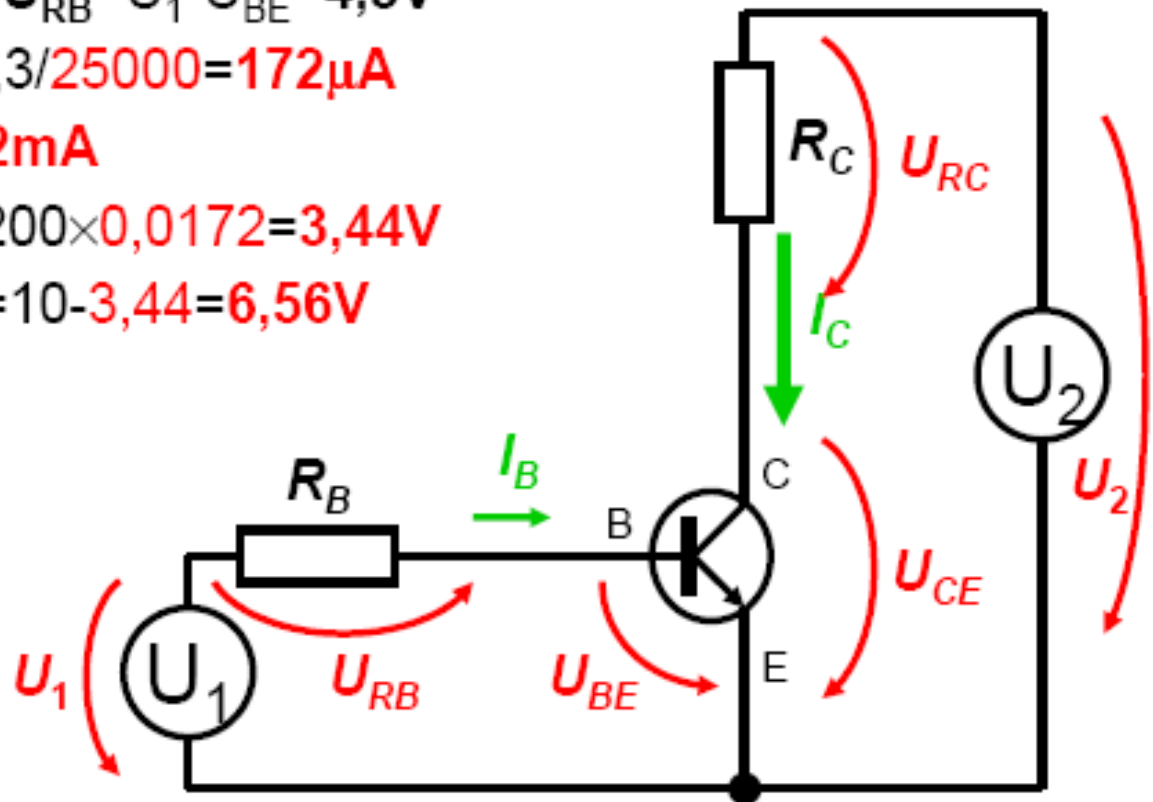
### Kolektorová smyčka:

Známe napětí  $U_2$  a  $U_{RC}$ , napětí  $U_{CE}$  mezi kolektorem a emitorem vypočítáme podle Kirchhoffova napětového zákona.

## Příklad #2

$U_1=5V$ ,  $U_2=10V$ ,  
 $R_B=25k\Omega$ ,  $R_C=200\Omega$ ,  
 $\beta=100$

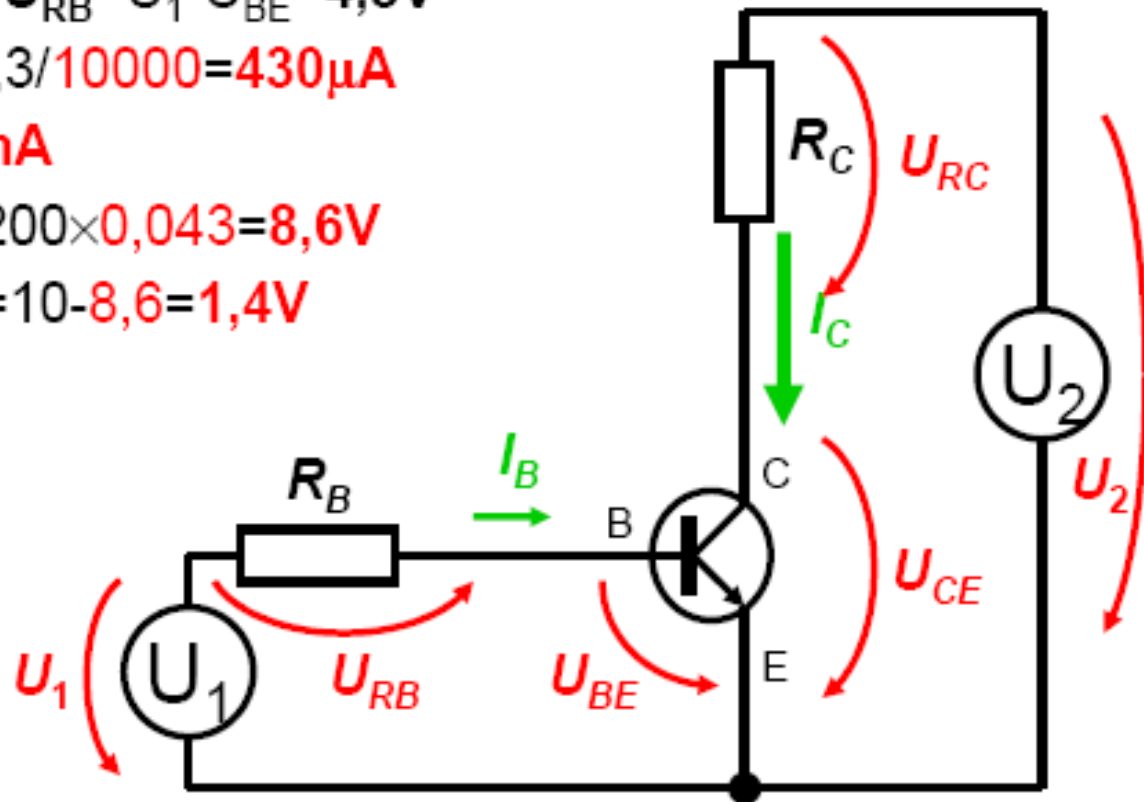
- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/25000=172\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=17,2mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,0172=3,44V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=10-3,44=6,56V$



# Příklad #3

$U_1=5V$ ,  $U_2=10V$ ,  
 $R_B=10k\Omega$ ,  $R_C=200\Omega$ ,  
 $\beta=100$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/10000=430\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=43mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,043=8,6V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=10-8,6=1,4V$

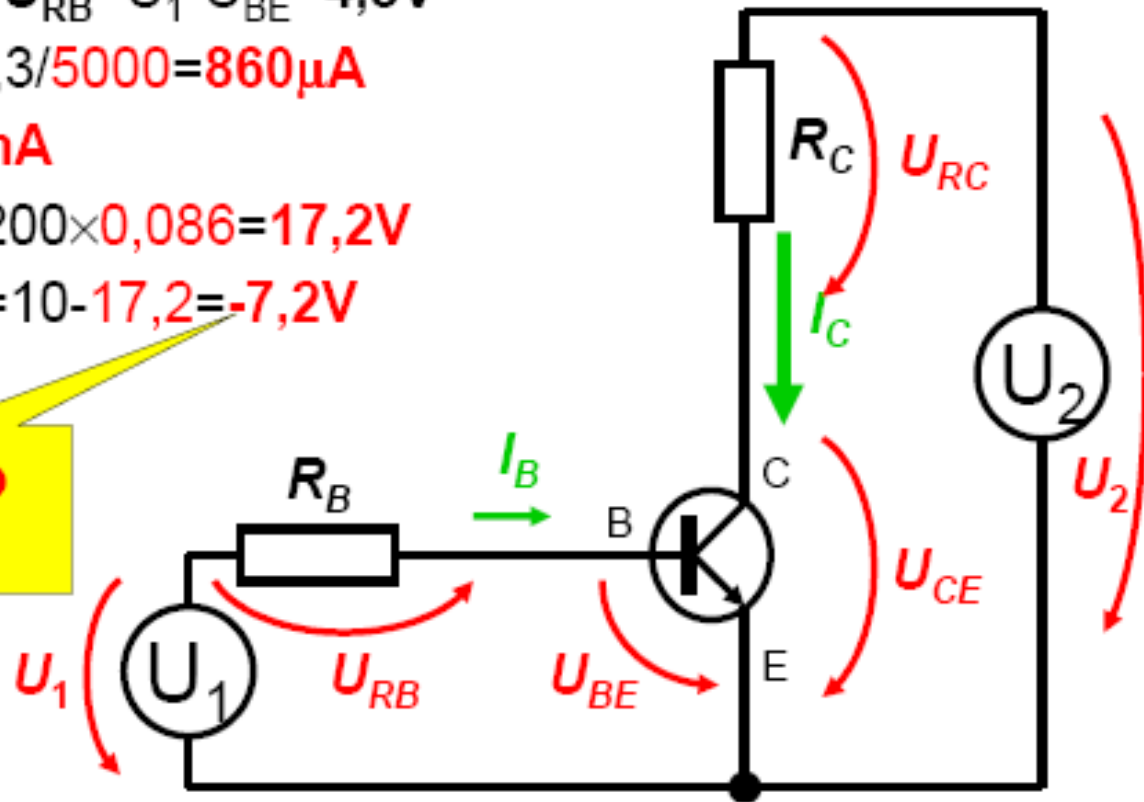


# Příklad #4

$U_1=5V$ ,  $U_2=10V$ ,  
 $R_B=5k\Omega$ ,  $R_C=200\Omega$ ,  
 $\beta=100$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/5000=860\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=86mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,086=17,2V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=10-17,2=-7,2V$

???



# Příklad #4

$$U_1=5V, U_2=10V, \\ R_B=5k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

$$U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$$

$$I_B=U_{RB}/R_B=4,3/5000=860\mu A$$

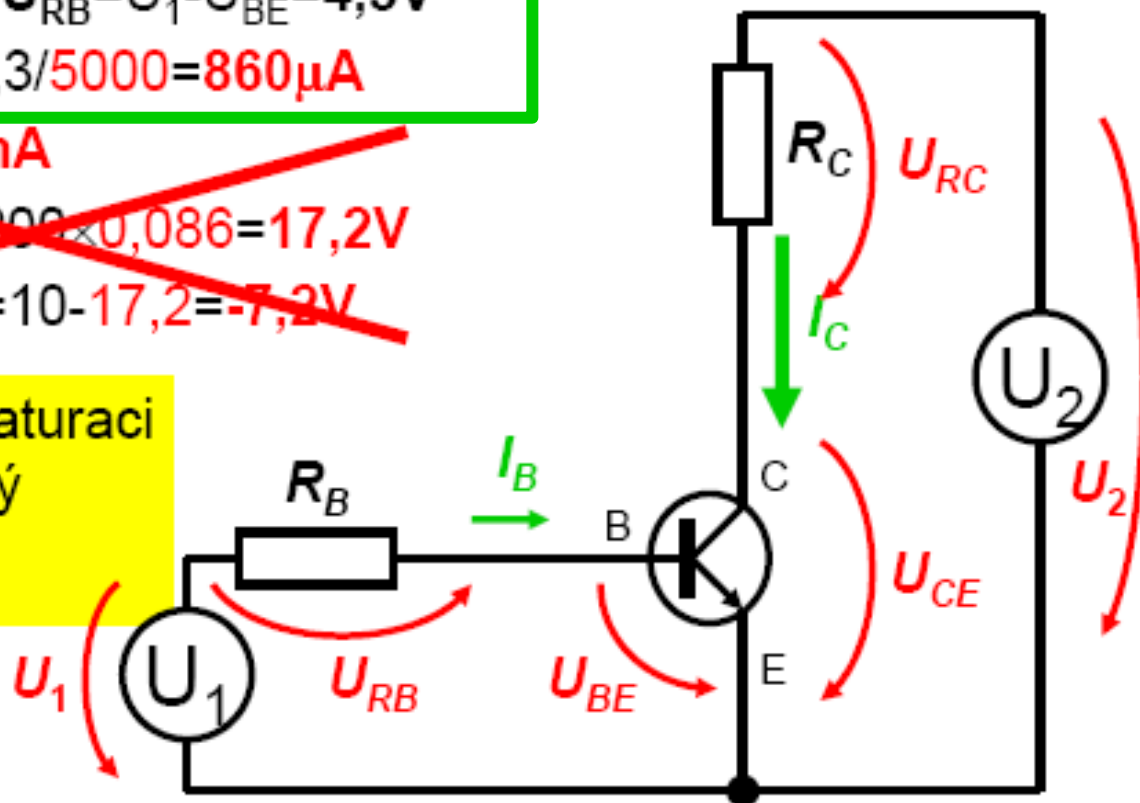
$$I_C=\beta \times I_B=86mA$$

$$U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,086=17,2V$$

$$U_{CE}=U_2-U_{RC}=10-17,2=-7,2V$$

tranzistor je v saturaci  
= zcela otevřený

$$U_{CE}=0,2V$$



V režimu saturace neplatí:  $I_C = \beta \times I_B$   
Musíme postupovat jinak.

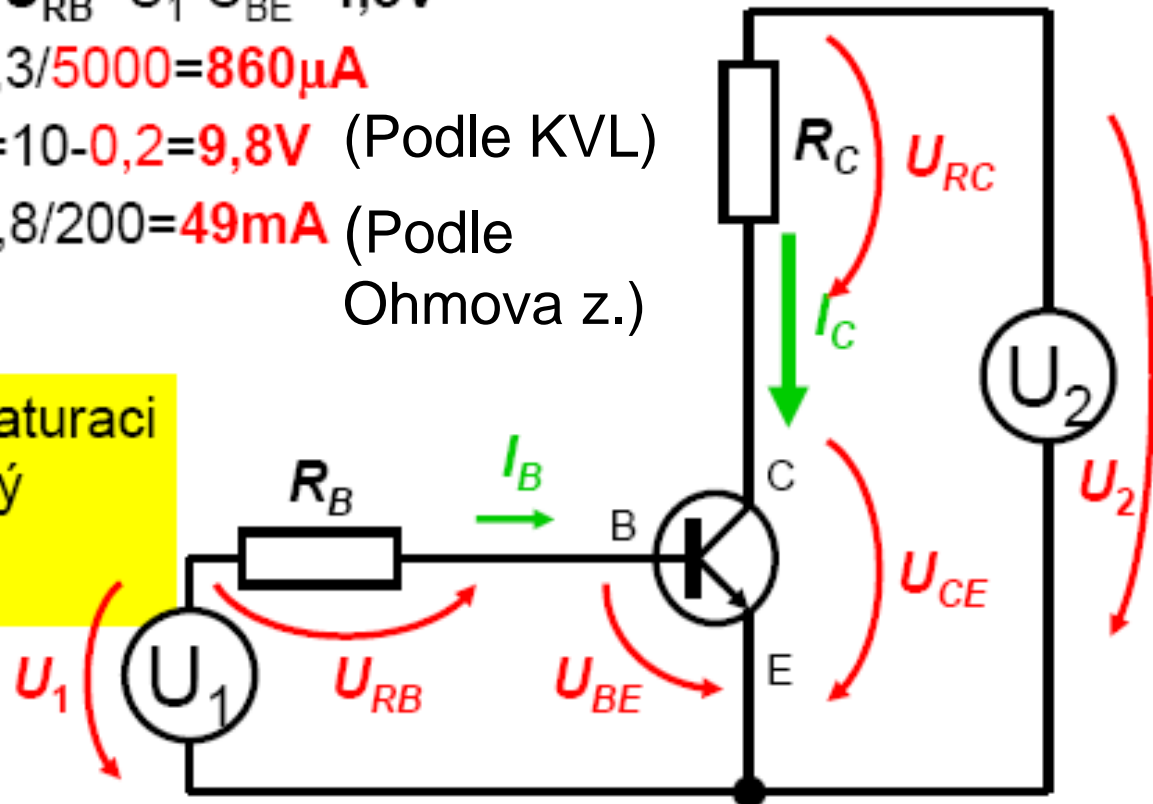
## Příklad #4

$$U_1=5V, U_2=10V, \\ R_B=5k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/5000=860\mu A$
- $U_{RC}=U_2-U_{CE}=10-0,2=9,8V$  (Podle KVL)
- $I_C=U_{RC}/R_C=9,8/200=49mA$  (Podle Ohmova z.)

tranzistor je v saturaci  
= zcela otevřený

$$U_{CE}=0,2V$$





# Bipolární tranzistor - stavy

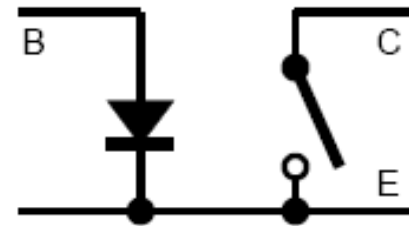
• **Tranzistor zavřený (OFF)** – Chová se jako rozepnutý spínač. Neprotéká proud mezi C a E.

• **Aktivní (zesilovací mód)** -- El. proud mezi C a E je přímo úměrný el. proudu  $I_B$  tekoucímu do báze (NPN):  $I_C = \beta \times I_B$

• **Tranzistor zcela otevřen- On (v saturaci)** – Tranzistor se chová jako sepnutý spínač. Od C k E teče volně el. proud. Zvyšování  $I_B$  již nezvyšuje  $I_C$ . Již neplatí:  $I_C = \beta \times I_B$

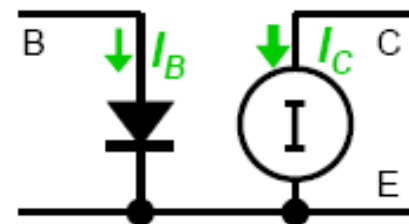
## ■ Tranzistor zavřený

□  $I_B = 0$



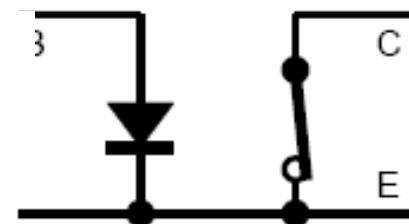
## ■ Tranzistor v zesilovacím režimu

□  $I_B > 0, I_C = \beta \times I_B$



## ■ Tranzistor plně otevřený (v saturaci)

□  $I_B \gg 0$



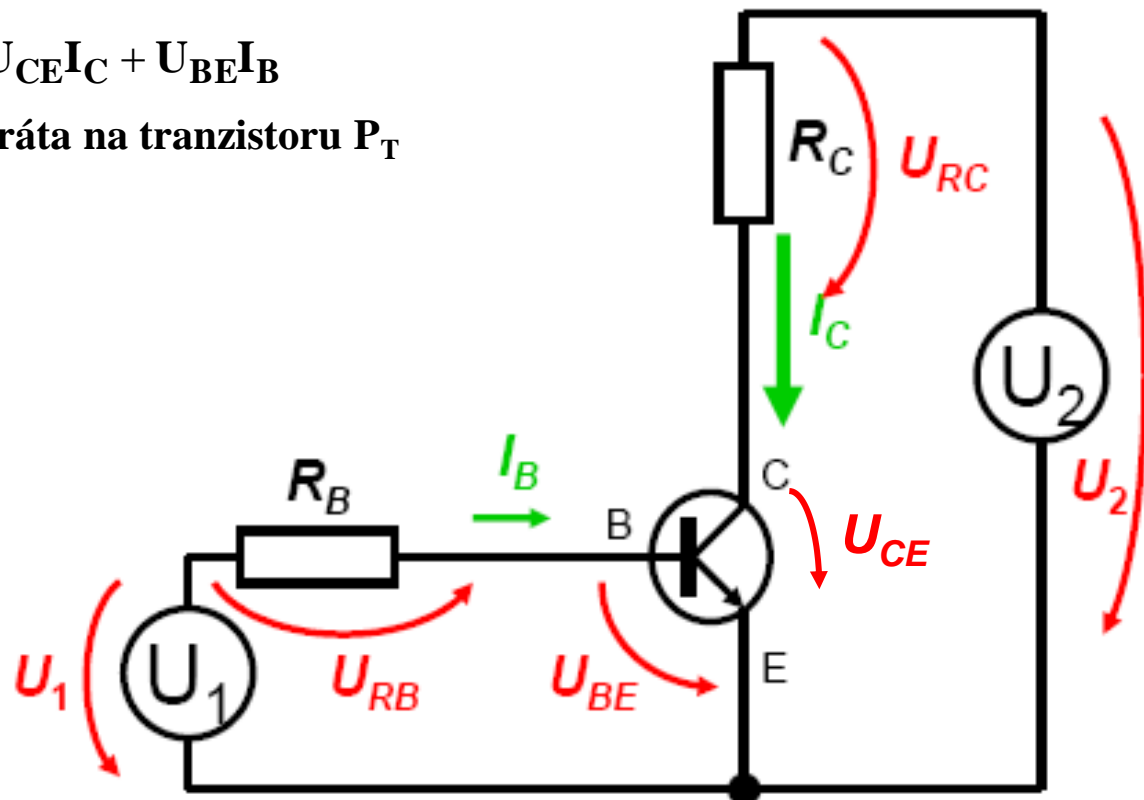
# 4. Výkonové ztráty v obvodu s bipolárním tranzistorem

$$P_{RC} = U_{RC} I_C$$

Výkonová ztráta na odporu  $R_C$

$$P_T = P_{CE} + P_{BE} = U_{CE} I_C + U_{BE} I_B$$

Celková výkonová ztráta na tranzistoru  $P_T$



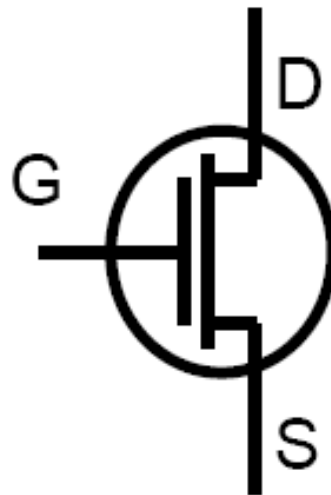
# 5. Unipolární tranzistor

Elektronická součástky se  
3 vývody

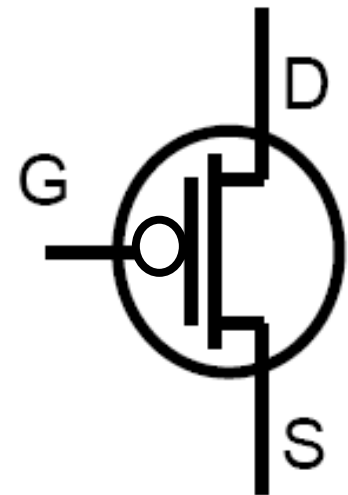
G... gate (báze)

D... drain (kolektor)

S.....source (emitor)



NMOS



PMOS

# Konstrukce unipolárního tranzistoru

Jsou to moderní tranzistory, používané nejvíce v integrovaných obvodech. Pojem *unipolární* znamená, že pro vedení elektrického proudu se využívá pouze jeden druh nosičů náboje, a to buď **elektrony (NMOS)**, nebo **díry (PMOS)**.

K řízení velikosti proudu mezi source – **S** a drain – **D** se využívá **elektrostatické pole**, přiložené k vývodu **G** (gate), kterým se mění vodivost tzv. **kanálu** mezi **S** a **D**.

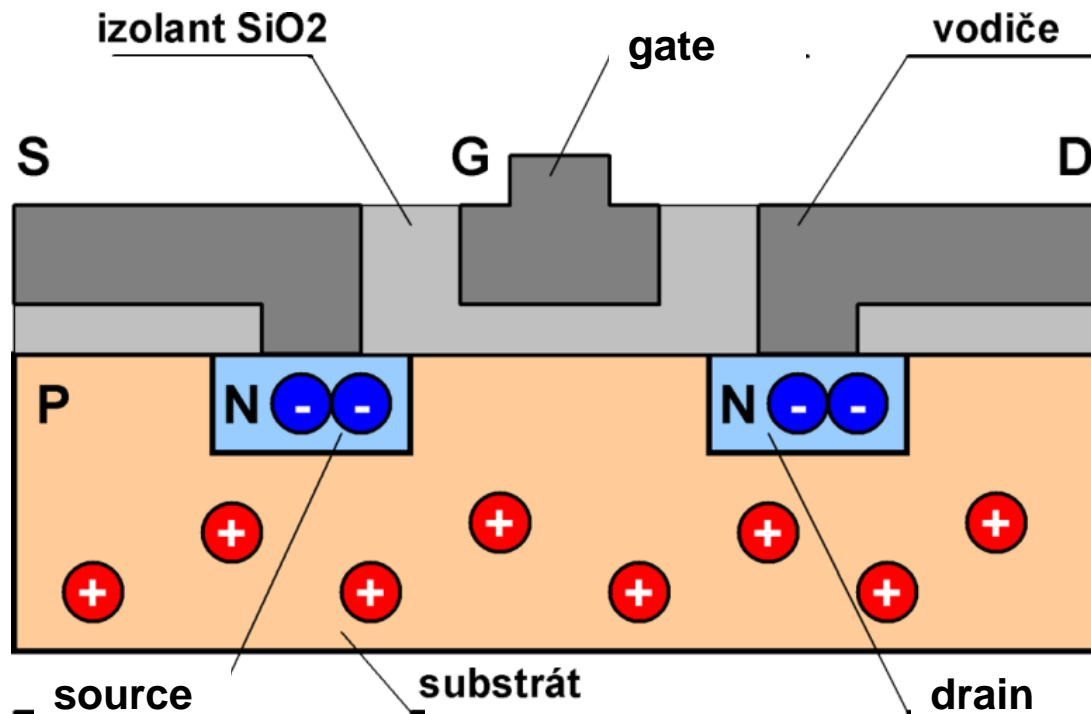
Nejčastěji se využívá unipolární tranzistor typu **MOS-FET**  
**Metal Oxide Semiconductor – Field Effect Transistor**

# NMOS

Základ tvoří polovodičový křemíkový substrát s vodivostí **P** (nosiče díry),

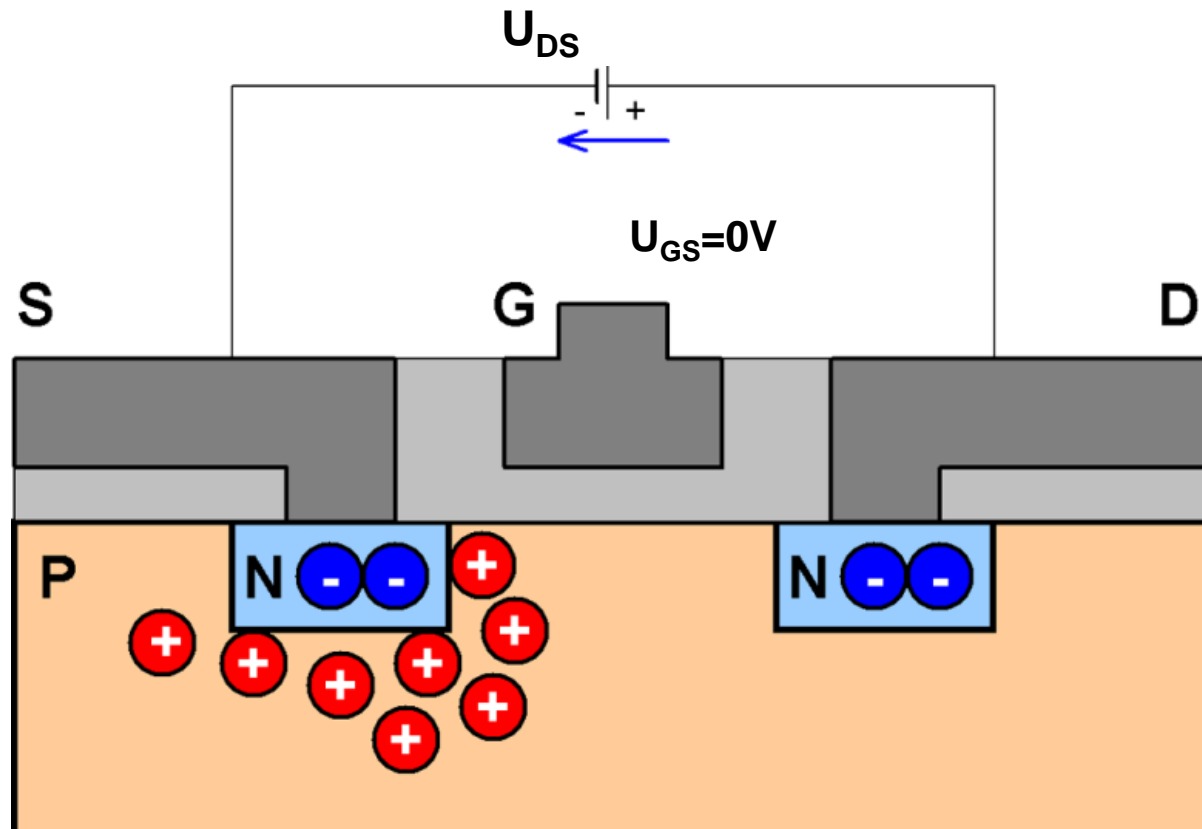
V substrátu jsou vytvořeny dvě oblasti s vodivostí typu **N** (nosiče elektrony). Ty tvoří source **S** a drain **D**.

Ovládací prvek (gate) tvoří kovový kontakt **G** (gate, hradlo), který je od substrátu odizolovaný vrstvou  $\text{SiO}_2$ .



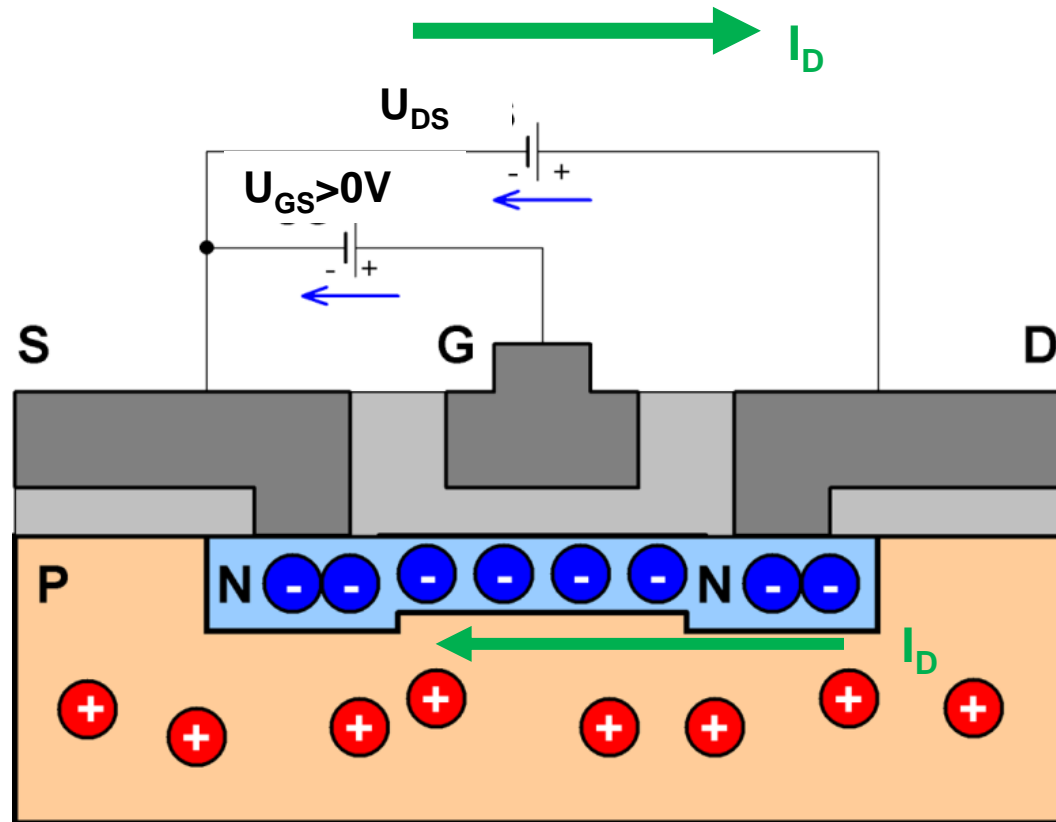
Pokud mezi drain D a source S připojíme napětí  $U_{DS}$ , budou za předpokladu, že  $U_G = 0V$  (na gate není připojené napětí), přitahovány díry ze substrátu k zápornému source S. Od drain D jsou naopak díry odpuzovány, protože je k němu připojeno kladné napětí zdroje  $U_{DS}$ .

**Proud nemůže ve směru drain D – source S procházet.**



Pokud **Gate** připojíme kladné napětí  $U_{GS}$ , bude odpuzovat díry pod elektrodou **G** a umožní vytvoření vodivého kanálu mezi source **S** a drain **D**.

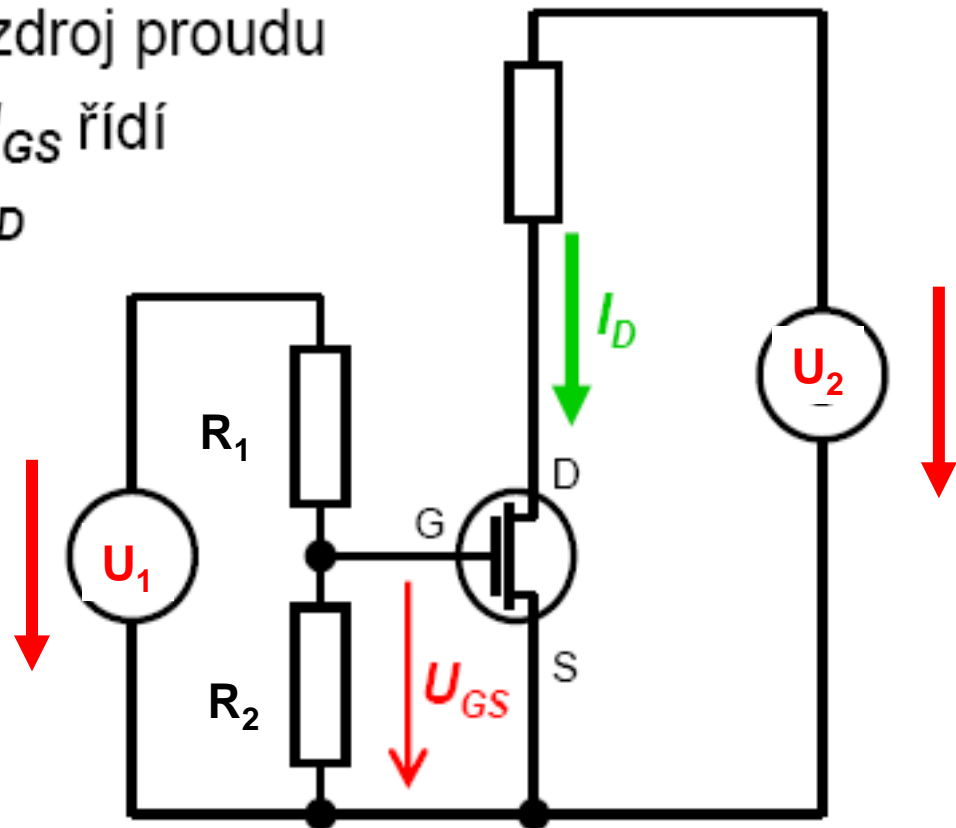
Tím se otevře průchod elektrickému proudu  $I_D$  mezi **D** a **S**.  
Čím bude  $U_G$  větší, tím větší proud bude mezi **S** a **D** protékat.  
Otevírání tranzistoru je děje pouze přiloženým napětím,  
Obvodem terminálu **G** neprotéká proud.



# Unipolární tranzistor MOS FET

- *napětím* řízený zdroj proudu
- velikost napětí  $U_{GS}$  řídí velikost proudu  $I_D$

$$U_{GS} = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$





# Unipolární tranzistor jako zesilovač

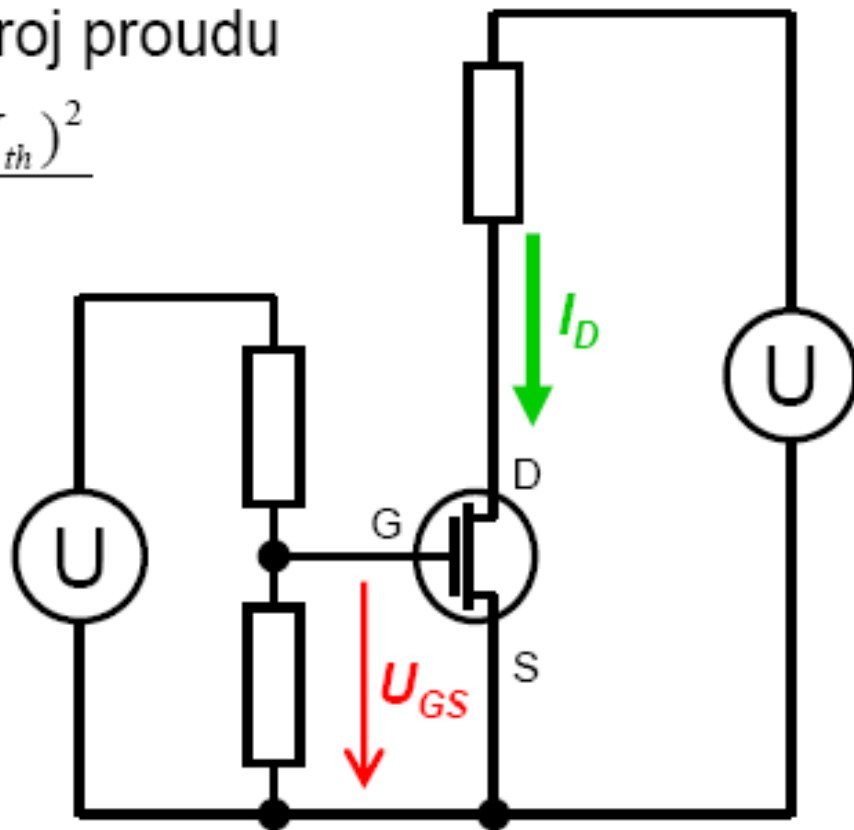
- *napětím řízený zdroj proudu*

$$I_D = \frac{K(U_{GS} - U_{th})^2}{2}$$

$U_{th}$ .....prahové napětí

$K$ ..... zesilovací činitel [ $\text{mA} \cdot \text{V}^{-2}$ ]

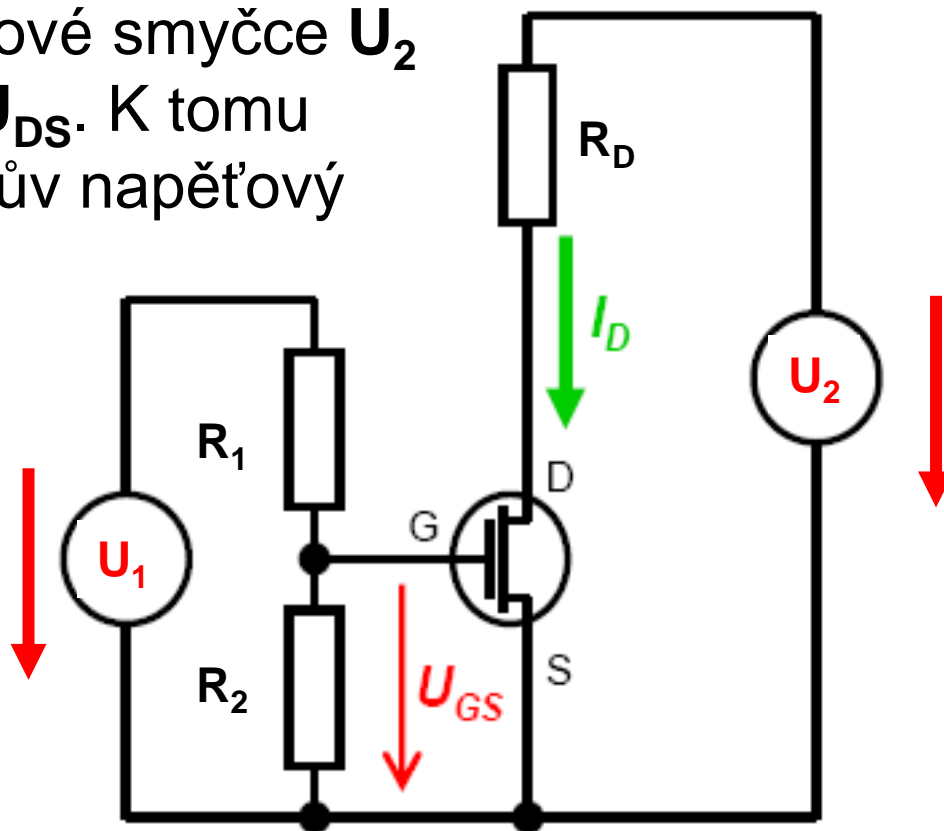
**POZOR!!!** Díky jednotce zesilovacího činitele  $I_D$  vypočítáme v mA.





# Unipolární tranzistor MOS FET- dokončení analýzy obvodu

1. Zbývá určit  $U_{RD}$  --- Použijeme Ohmův zákon
2. Nyní známe v drainové smyčce  $U_2$  a  $U_{RD}$ . Zbývá určit  $U_{DS}$ . K tomu využijeme Kirchhoffův napěťový zákon.



# Unipolární tranzistor NMOS - stavy



- Tranzistor je zcela zavřen  
(chová se jako rozepnutý spínač)

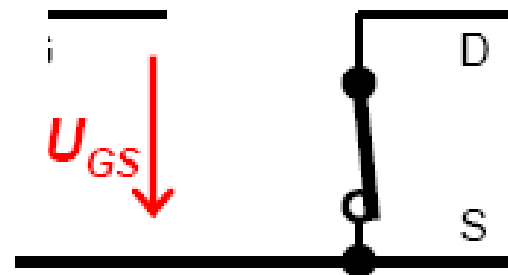
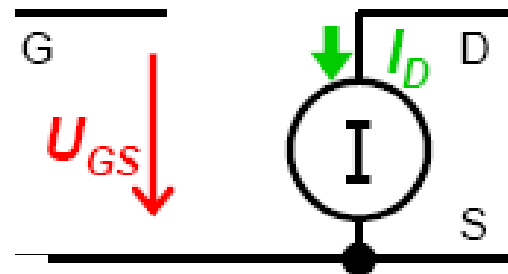
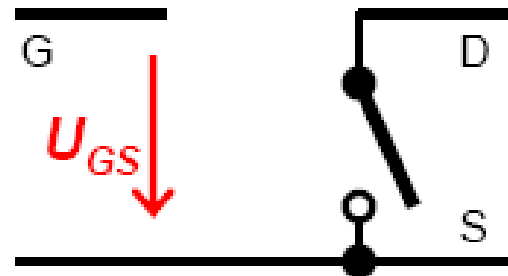
$$\square U_{GS} < U_{th}$$

- Tranzistor jako napětím  
řízený zdroj proudu

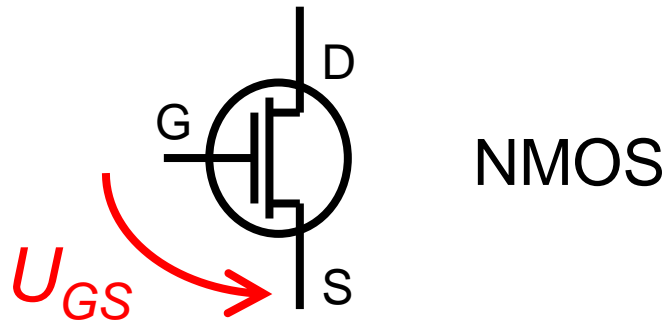
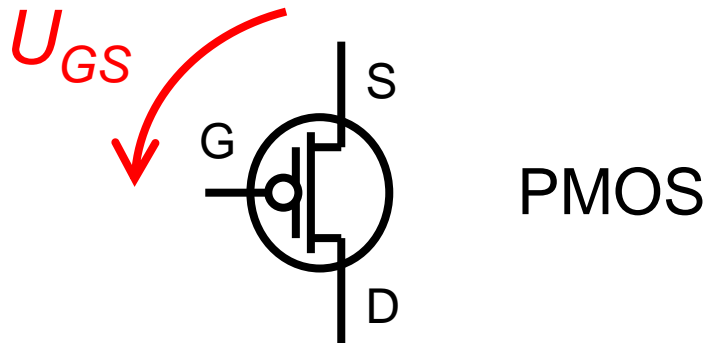
$$U_{GS} > U_{th}, \quad I_D = \frac{K(U_{GS} - U_{th})^2}{2}$$

- Tranzistor v saturaci je zcela  
otevřen  
(chová se jako sepnutý spínač)

$$U_{GS} \gg U_{TH}$$



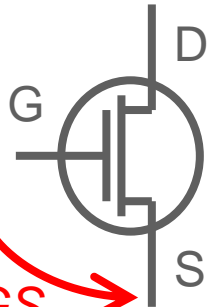
# Unipolární tranzistor jako spínač řízený napětím $U_{GS}$



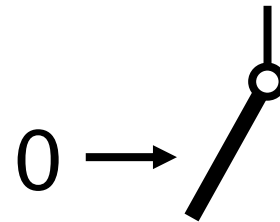
Je-li napětí  $U_{GS}$  kladné ve směru šipky a vyšší než prahové napětí  $U_{th}$ , pak je tranzistor otevřený (=sepnutý)

# N spínače (NMOS tranzistory) (normálně otevřené spínače)

NMOS

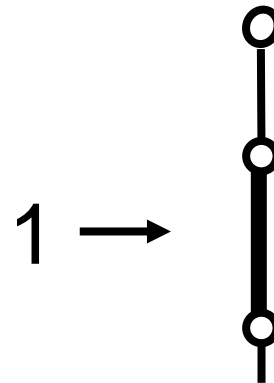


- $U_{GS}=0 \rightarrow$  spínač rozepnutý (OFF)  $U_{GS}$



$R \rightarrow \infty$

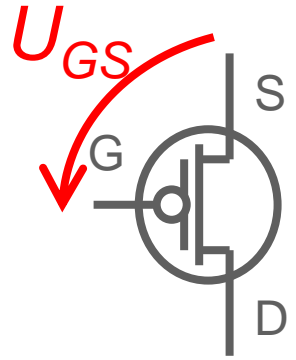
- $U_{GS}=1 \rightarrow$  spínač sepnutý (ON)



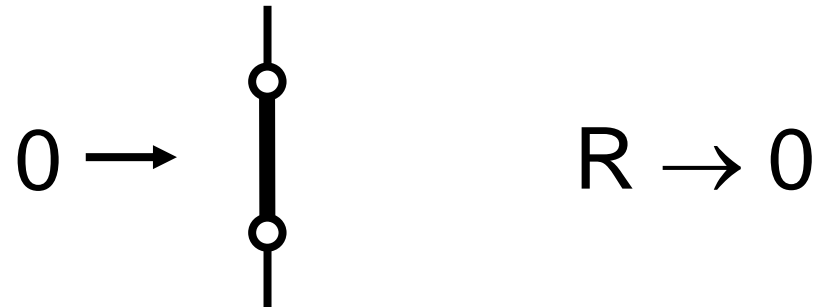
$R \rightarrow 0$

# P spínače (PMOS tranzistory) (normálně zavřené spínače)

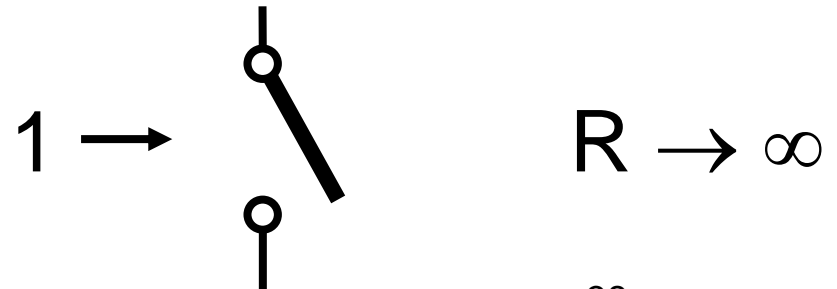
PMOS



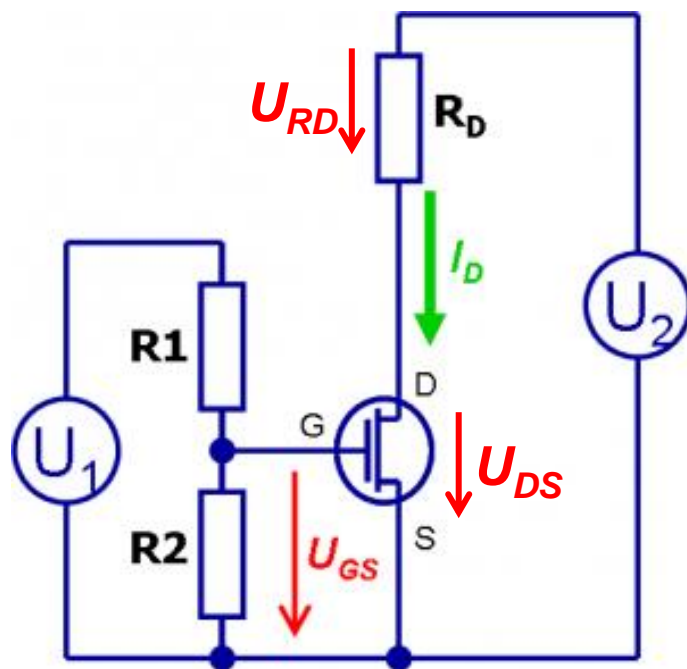
- $U_{GS} = 0 \rightarrow$  spínač sepnutý (ON)



- 
- $U_{GS} = 1 \rightarrow$  spínač rozepnutý (OFF)



# Výkonové ztráty v obvodu s unipolárním tranzistorem



$$P_{\text{CELK}} = I_D U_{RD} + U_{DS} I_D = I_D^2 R_D + U_{DS} I_D$$