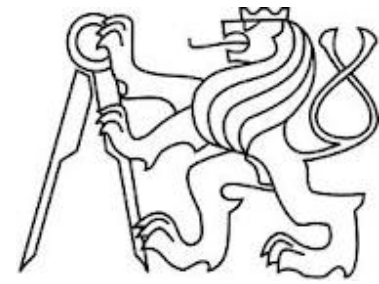




Katedra číslicového návrhu
Fakulta informačních technologií
ČVUT v Praze



BIK-TZP.21

Technologické základy počítačů 2022/23

5. Obvody s tranzistory

Doc.Ing. Kateřina Hyniová, CSc.

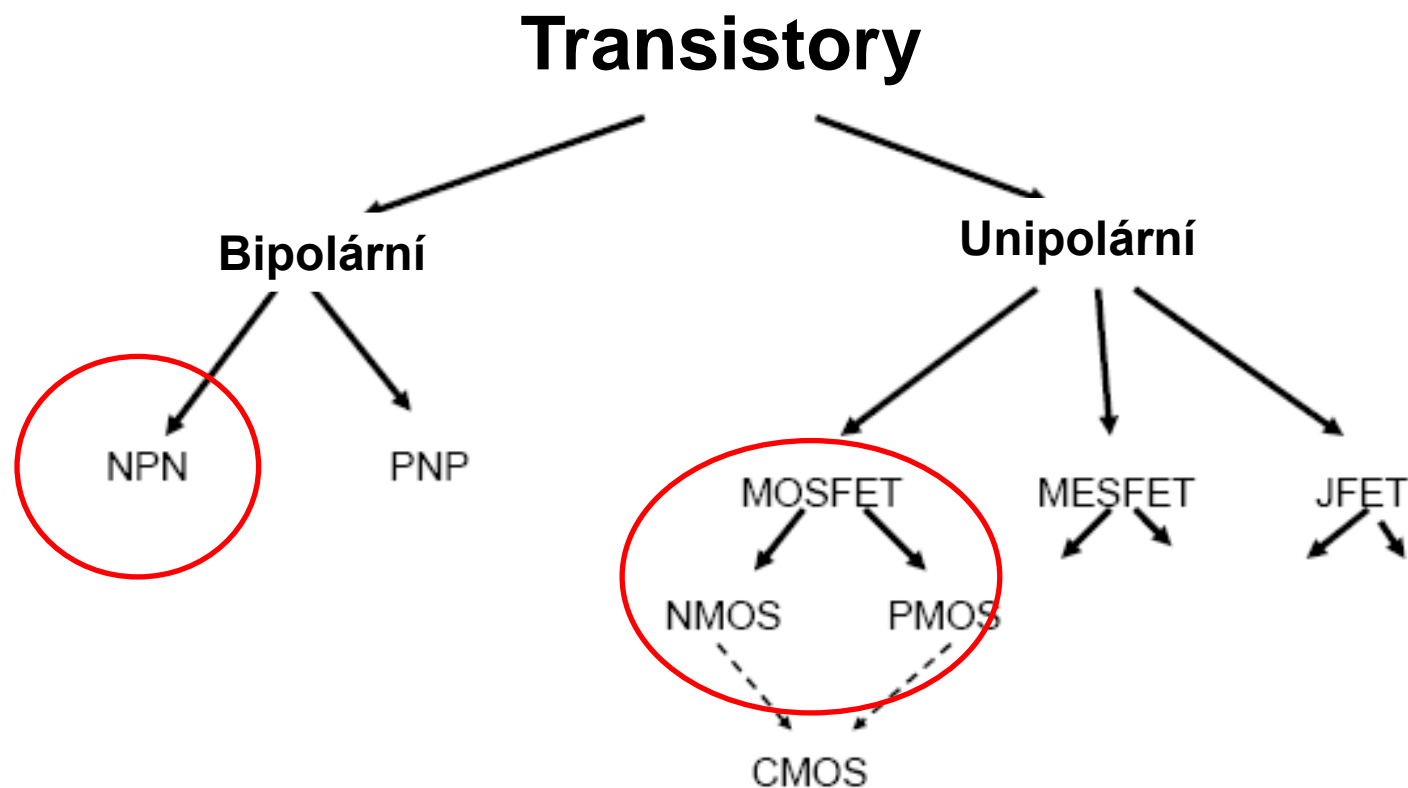
hyniova@fit.cvut.cz

Katedra číslicového návrhu, FIT ČVUT

ThA:1031

Tranzistor

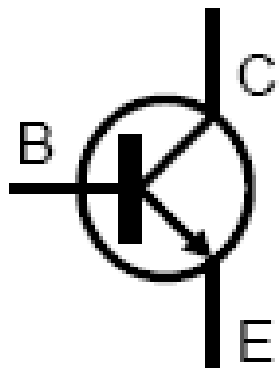
Tranzistor je polovodičový prvek používaný k zesilování a spínání elektrických signálů a výkonů



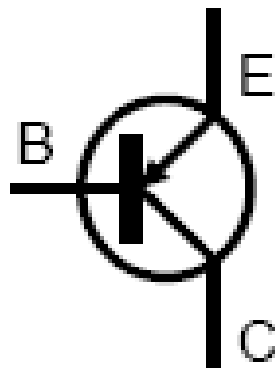
Tranzistory

Bipolární

Zdroje proudu a
spínače **řízené el.
proudem**



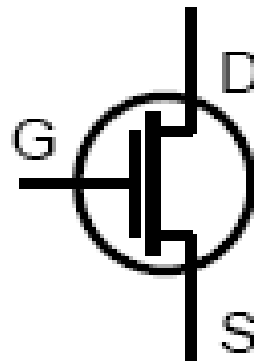
NPN



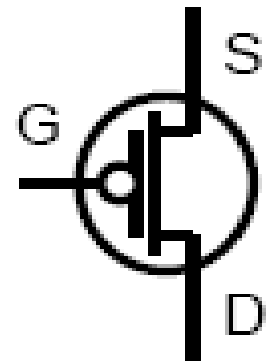
PNP

Unipolární

Zdroje proudu a
spínače **řízené el.
napětím**



NMOS



PMOS

Stručná historie

- Bellovy laboratoře (1946): Bardeen, Brattain a Shockley obdrželi za vynález Nobelovu cenu.
- Původně vyroben z germania
- Dnes vyráběny z dotovaného křemíku



Bipolární tranzistor

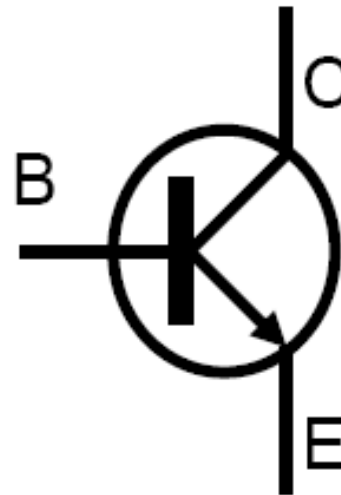
Malý proud tekoucí do báze bipolárního tranzistoru řídí mnohem větší proud tekoucí mezi kolektorem a emitorem.

Tranzistor je prvek se třemi vývody:

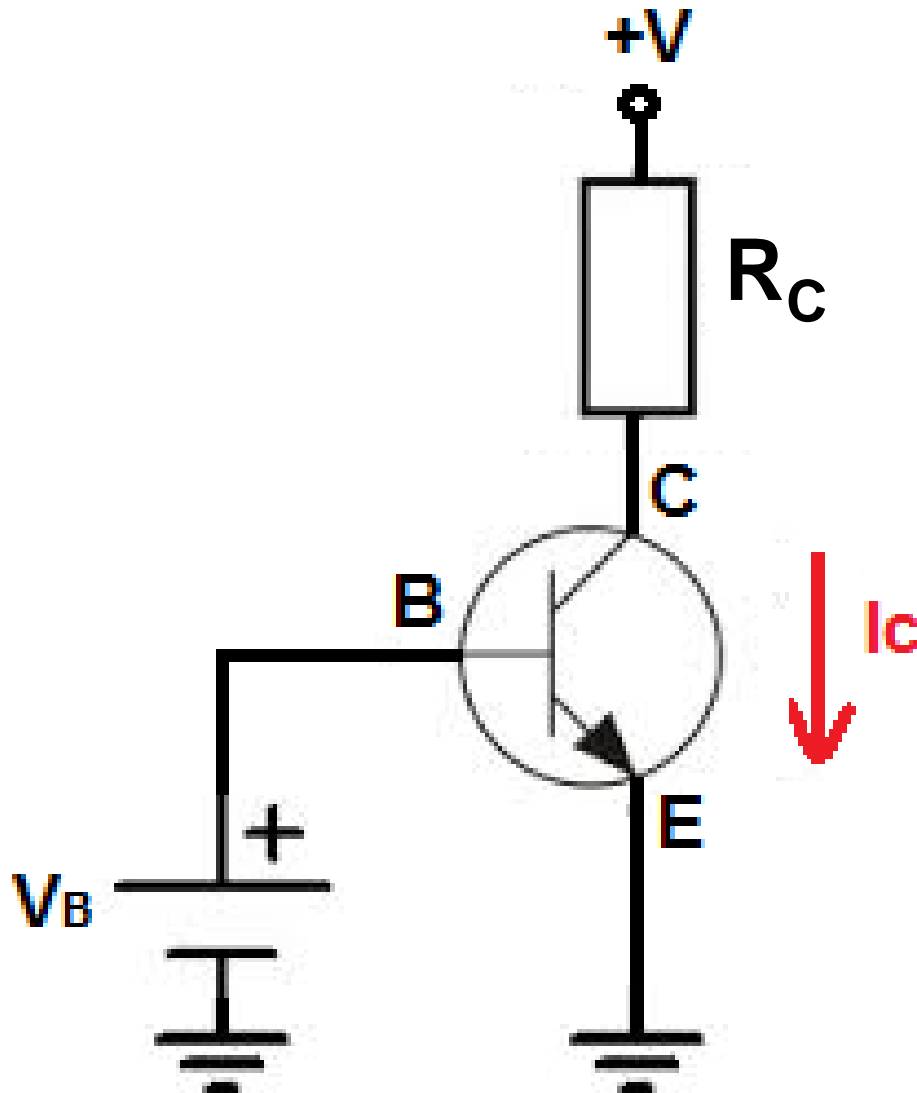
B... báze

C... kolektor

E.....emitor



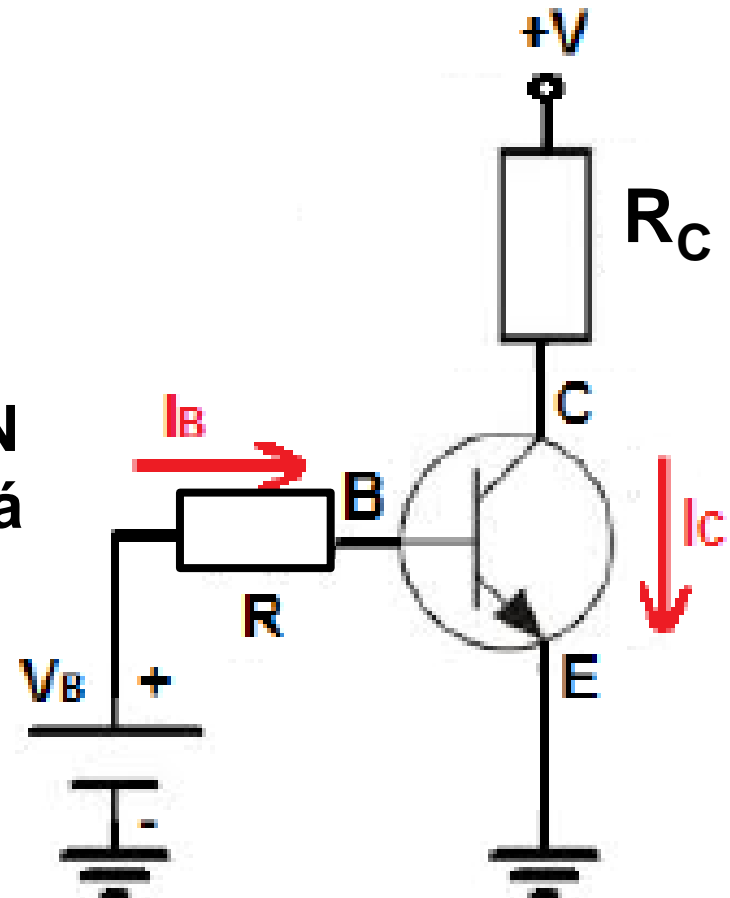
NPN tranzistor



V NPN tranzistoru se kladné napětí připojuje ke kolektoru a el. proud I_C teče od kolektoru k emitoru.

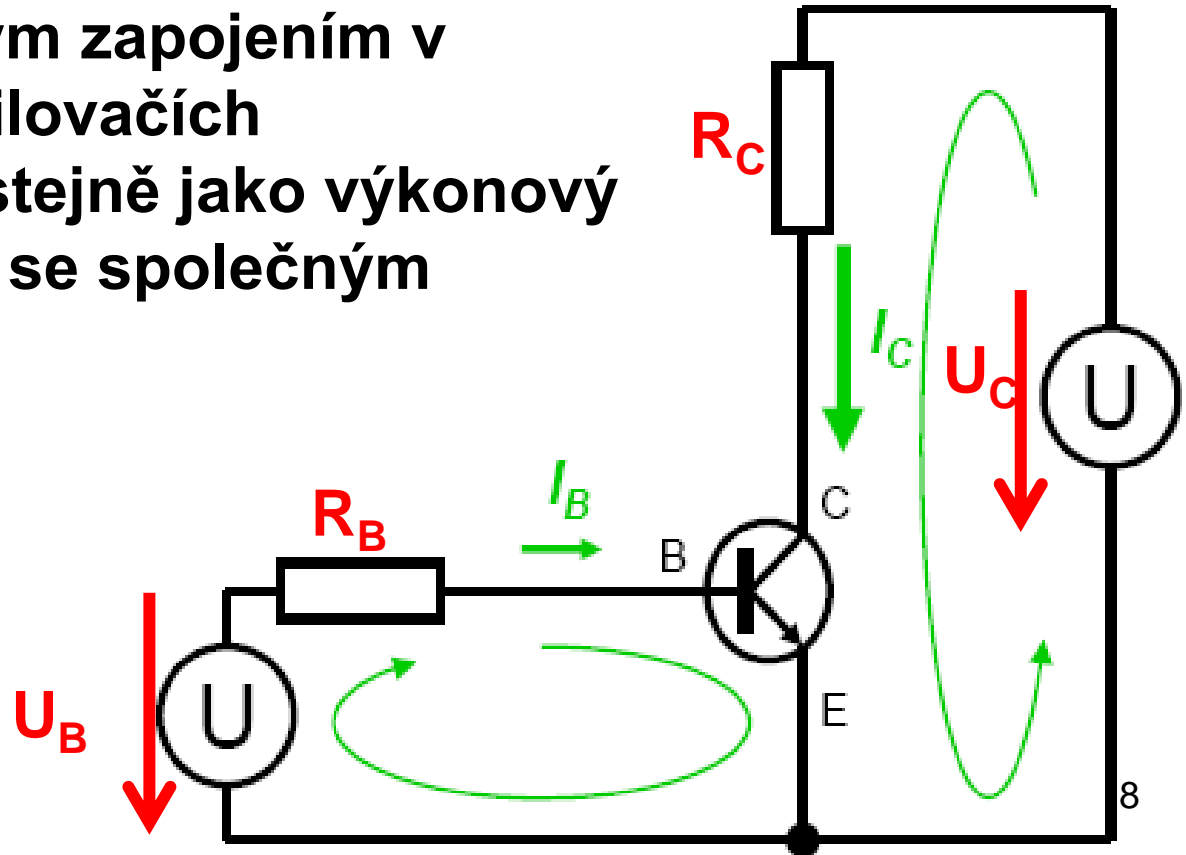
NPN transistor

- S rostoucím proudem I_B do báze NPN transistoru, se tranzistor stále více otevírá až se otevře úplně a proud I_C od kolektoru k emitoru dosáhne maxima.
- S klesajícím proudem I_B do báze NPN transistoru, se tranzistor stále zavírá až se zavře úplně a žádný proud I_C od kolektoru k emitoru neteče.



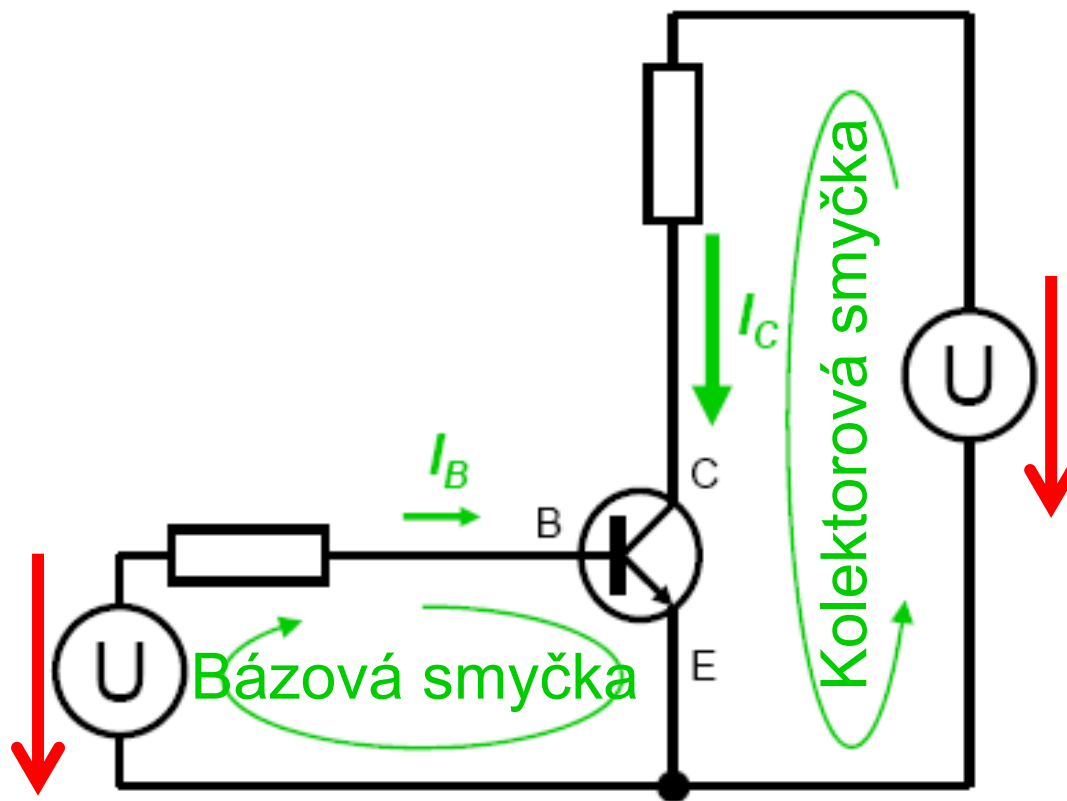
NPN - Zapojení se společným emitorem

- Emitor NPN tranzistoru je spojen se zeměmi zdrojů napětí U_B a U_C .
- Zapojení se společným emitorem je nejčastěji využívaným zapojením v tranzistorových zesilovačích
- Zesílení proudu stejně jako výkonový zisk jsou u zapojení se společným emitorem velké.



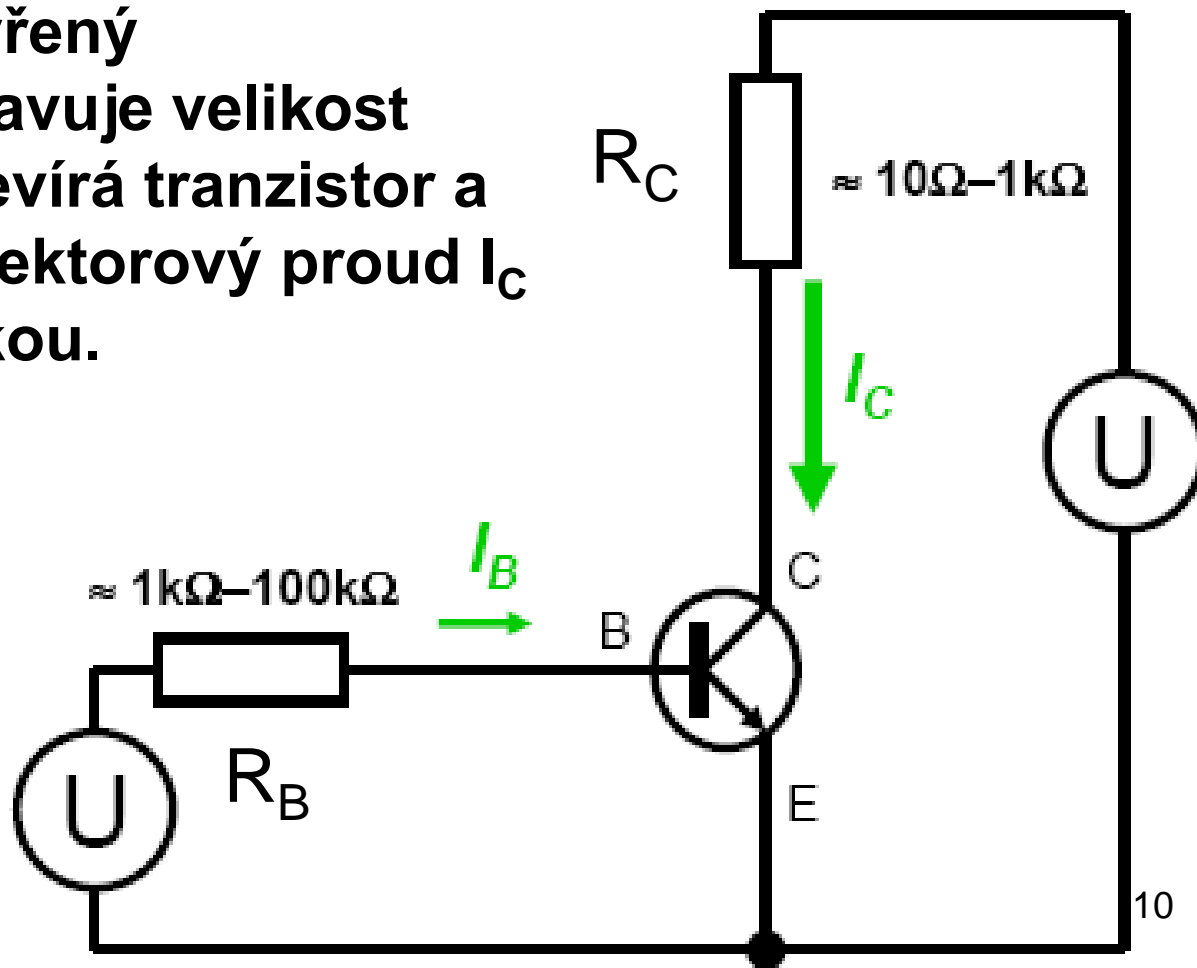
NPN - Zapojení se společným emitorem

Malý proud I_B do báze teče z báze do emitoru a řídí nebo spíná mnohem větší proud I_C tekoucí od kolektoru k emitoru



NPN - Zapojení se společným emitorem

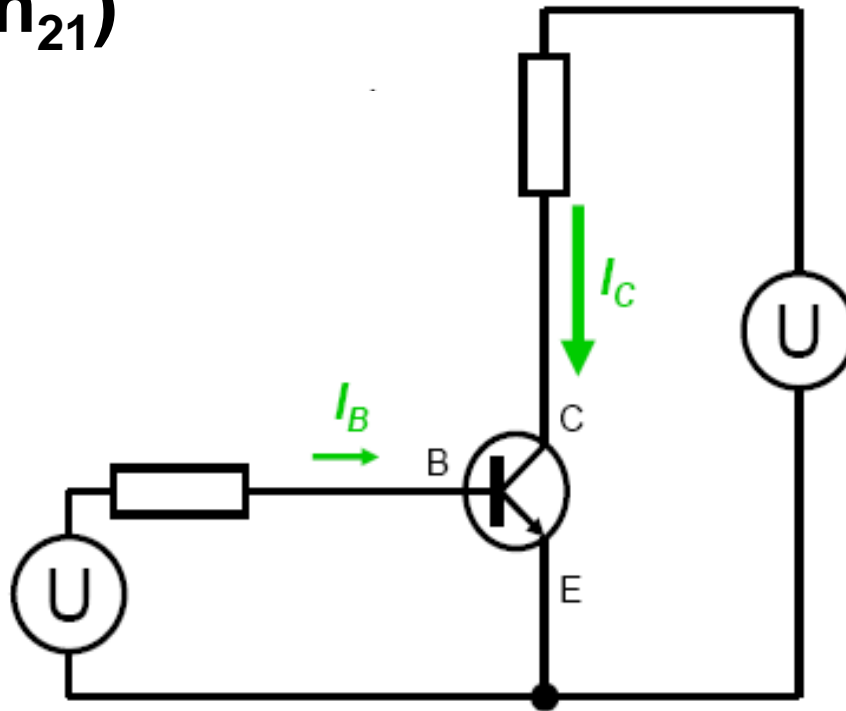
- R_C je zatěžovací odpor, který omezuje kolektorový proud I_C když je tranzistor zcela otevřený
- Resistor R_B nastavuje velikost proudu I_B , který otevírá tranzistor a umožní, aby tekla kolektorový proud I_C kolektorovou smyčkou.



Tranzistor jako zesilovač

Zesilovací činitel β (často označovaný jako h_{21})

$$I_C = \beta \times I_B$$

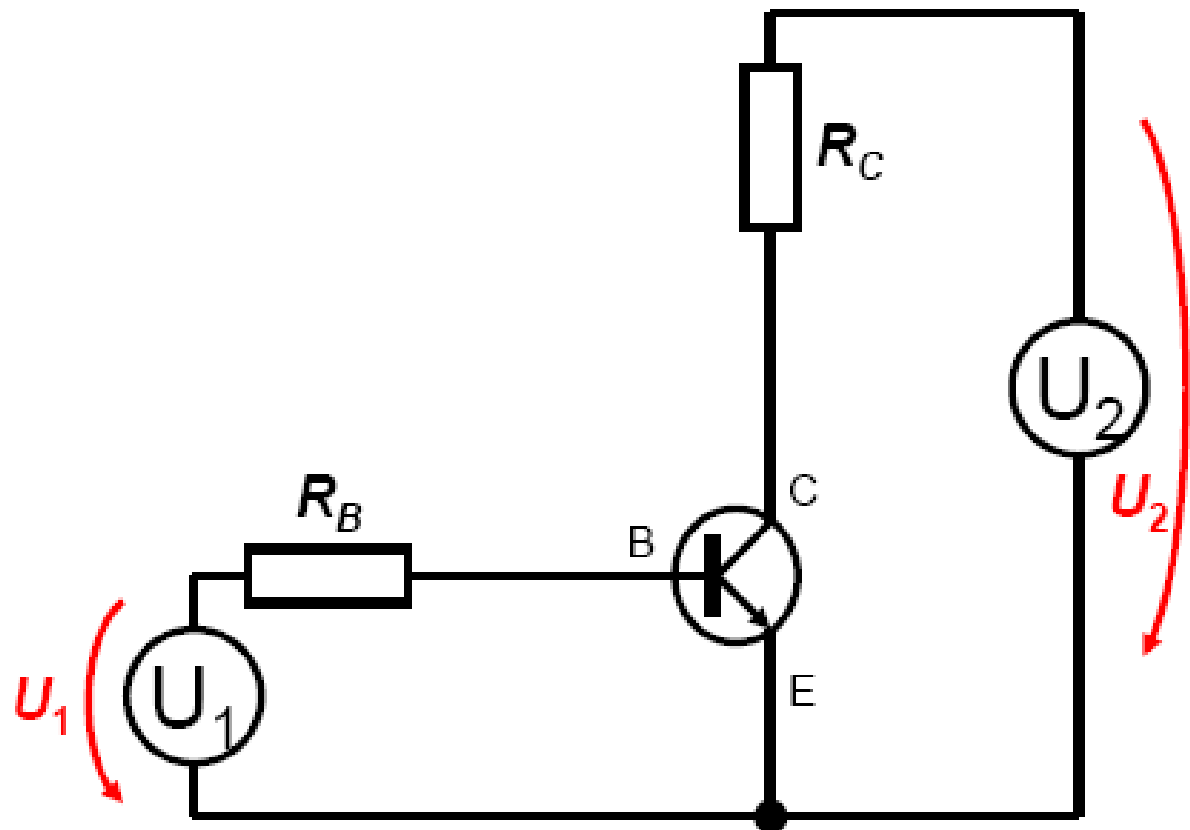


Příklad 1:

V obvodu NPN tranzistoru se společným emitorem jsou dány parametry:

Určete všechny el. veličiny v obvodu.

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



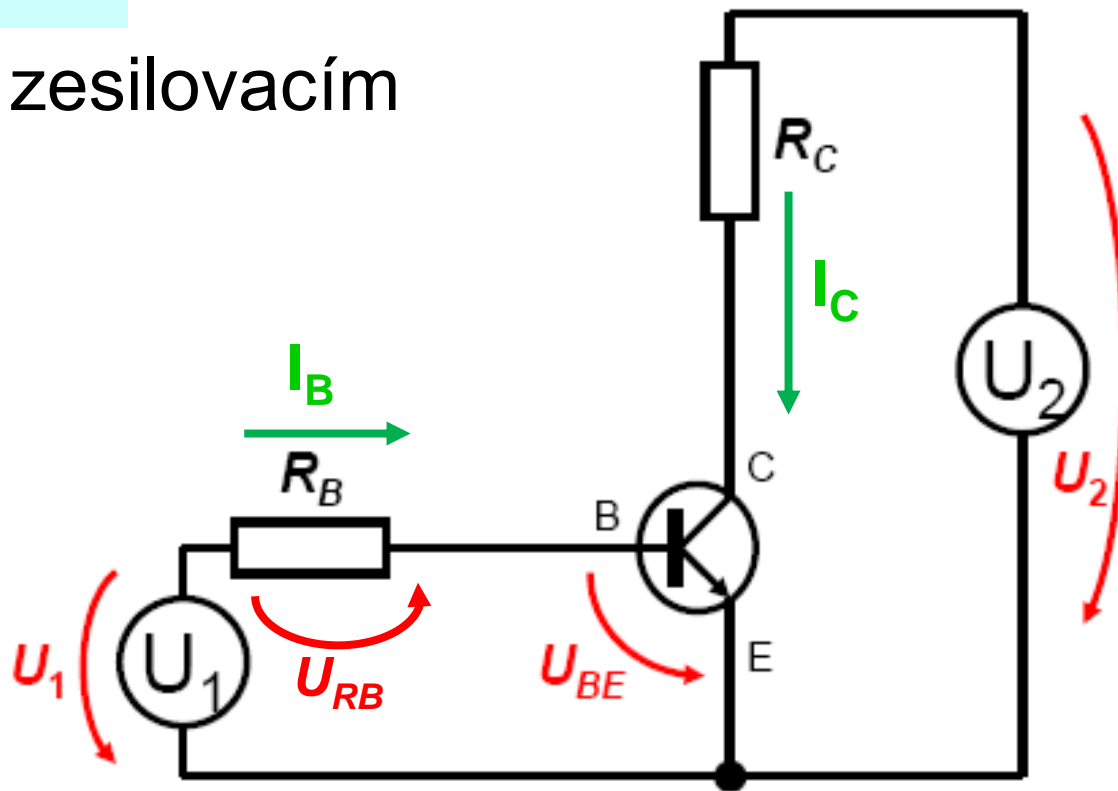
Příklad 1:

■ $U_{BE}=0,7V$

Pro tranzistor v zesilovacím režimu platí:

$U_{BE}=0,7V$

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



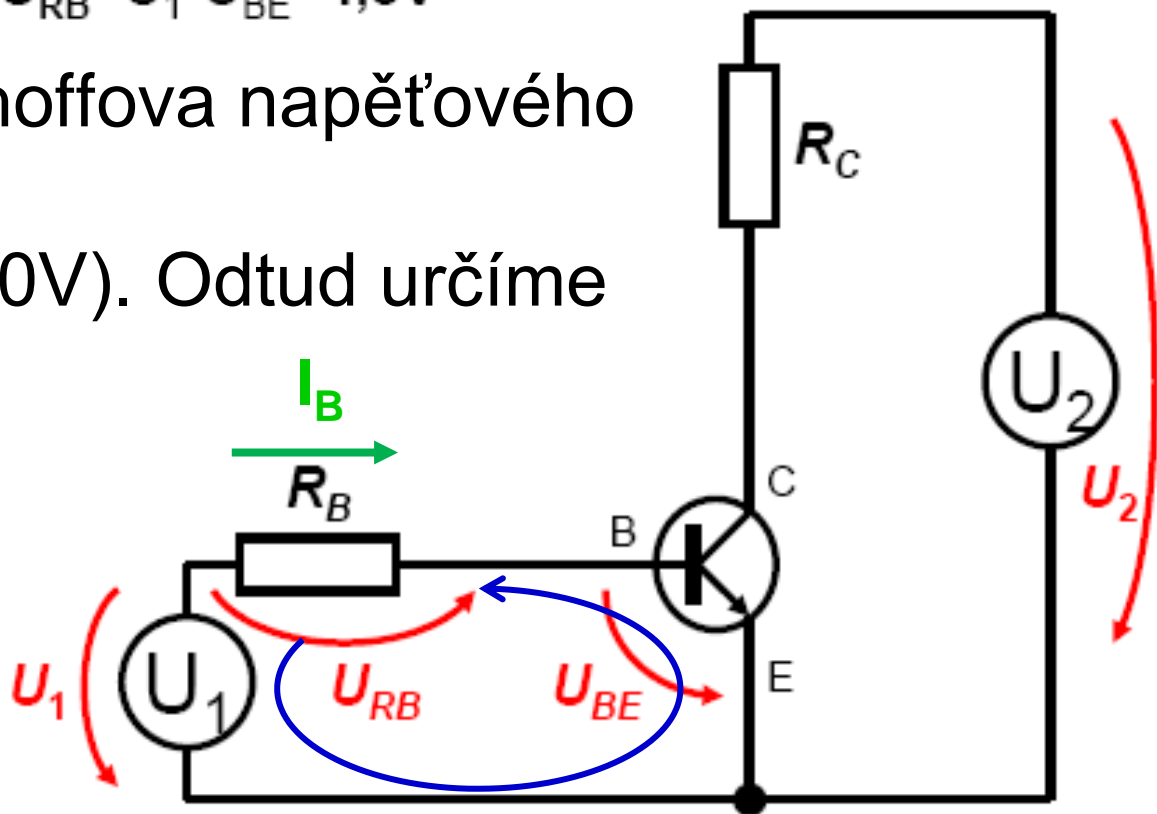
Příklad:

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

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

(Podle Kirchhoffova napětového zákona:

$U_1 - U_{BE} - U_{RB} = 0V$). Odtud určíme U_{RB} .



Modrá šipka \longrightarrow naznačuje směr oběhu podél bázové smyčky pro aplikaci Kirchhoffova napětového zákona.

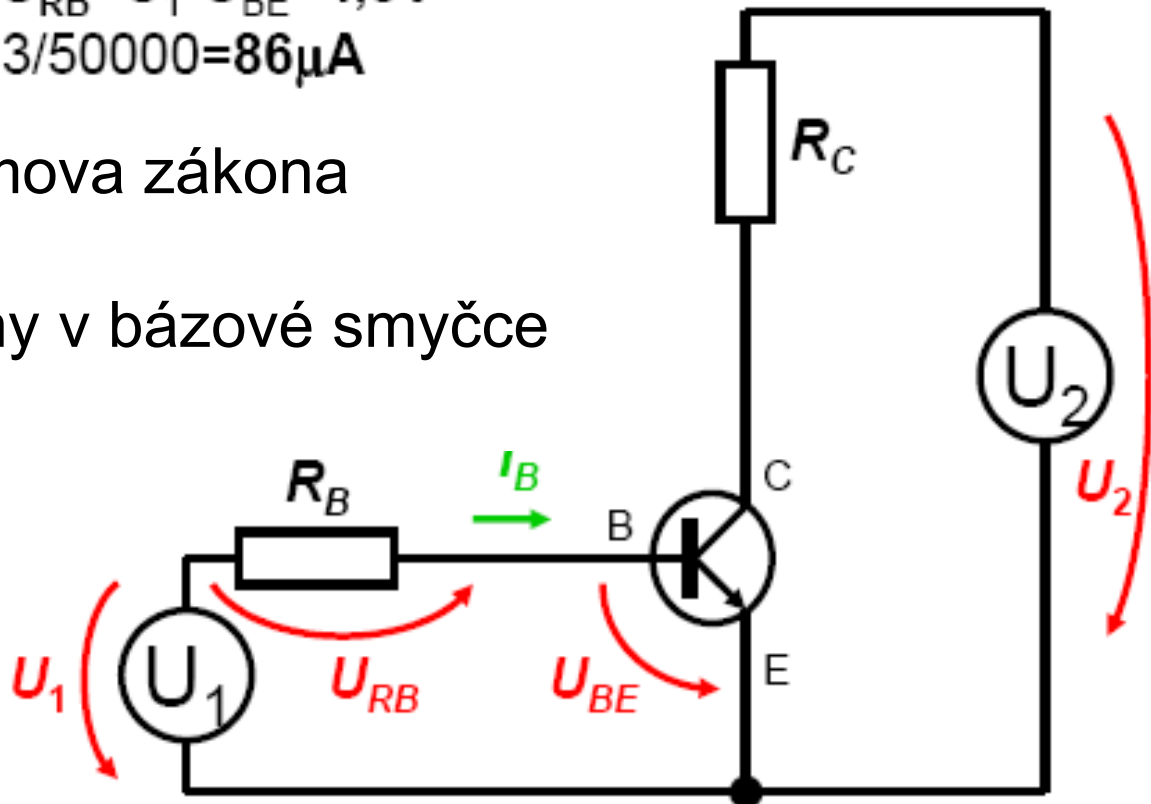
Example 1:

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

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

Z U_{RB} pomocí Ohmova zákona určíme I_B .

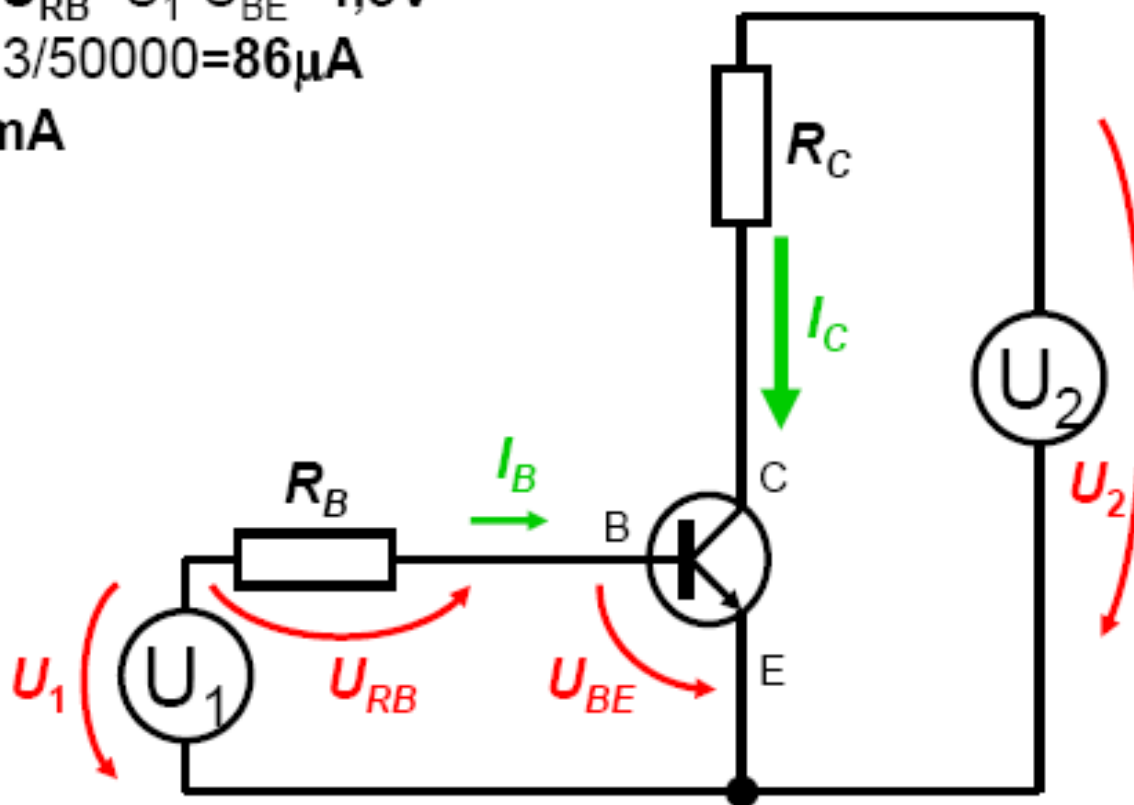
Všechny el. veličiny v bázové smyčce již známe.



Příklad 1:

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

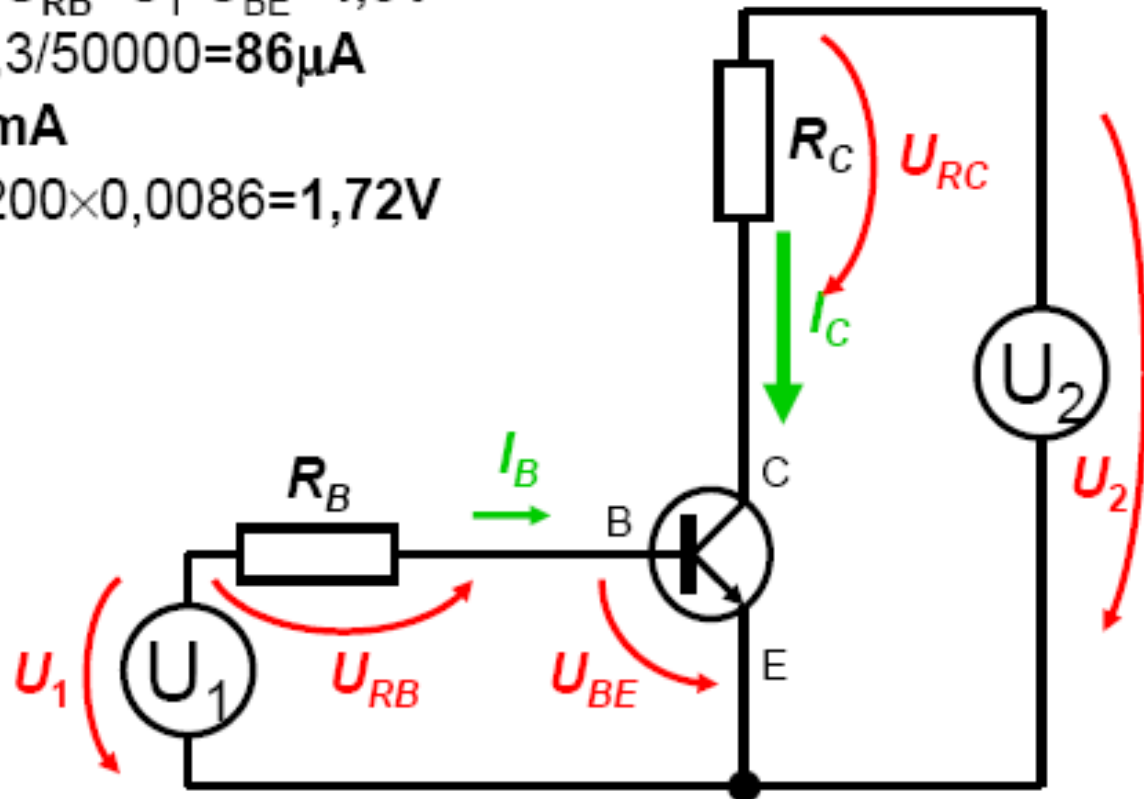
- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$



Example

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

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

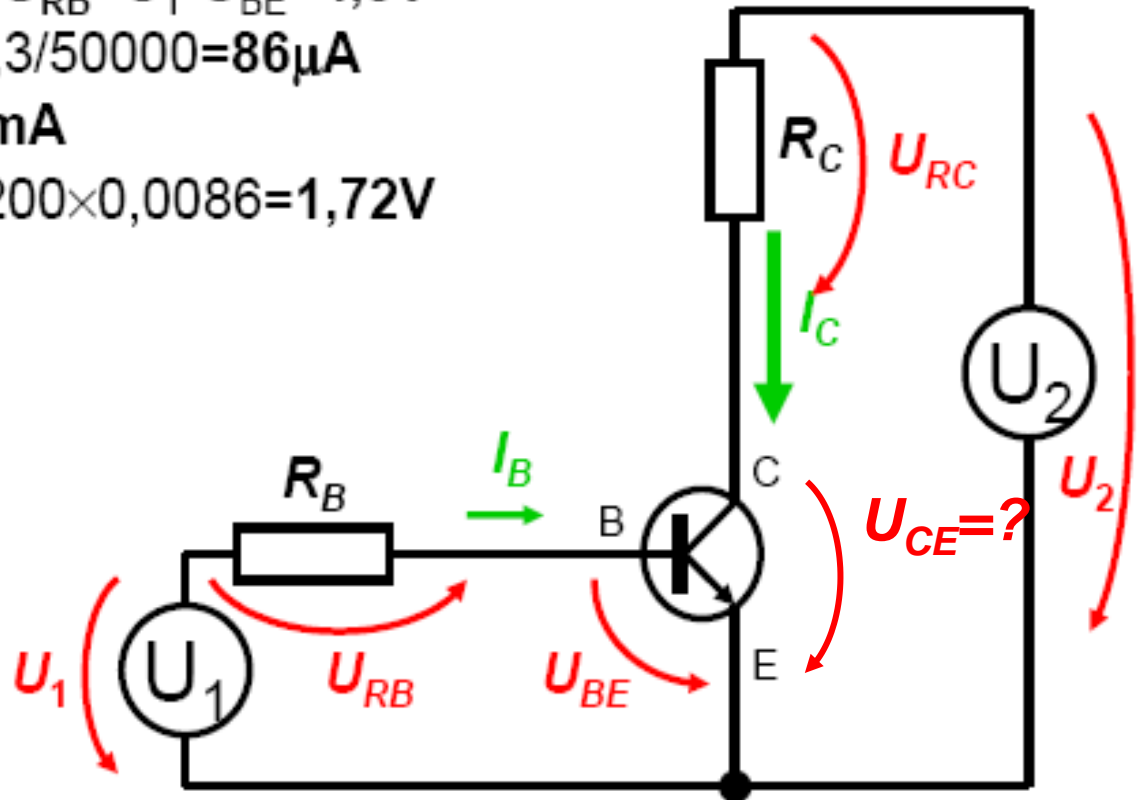


Example

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

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

$U_{CE}=?$

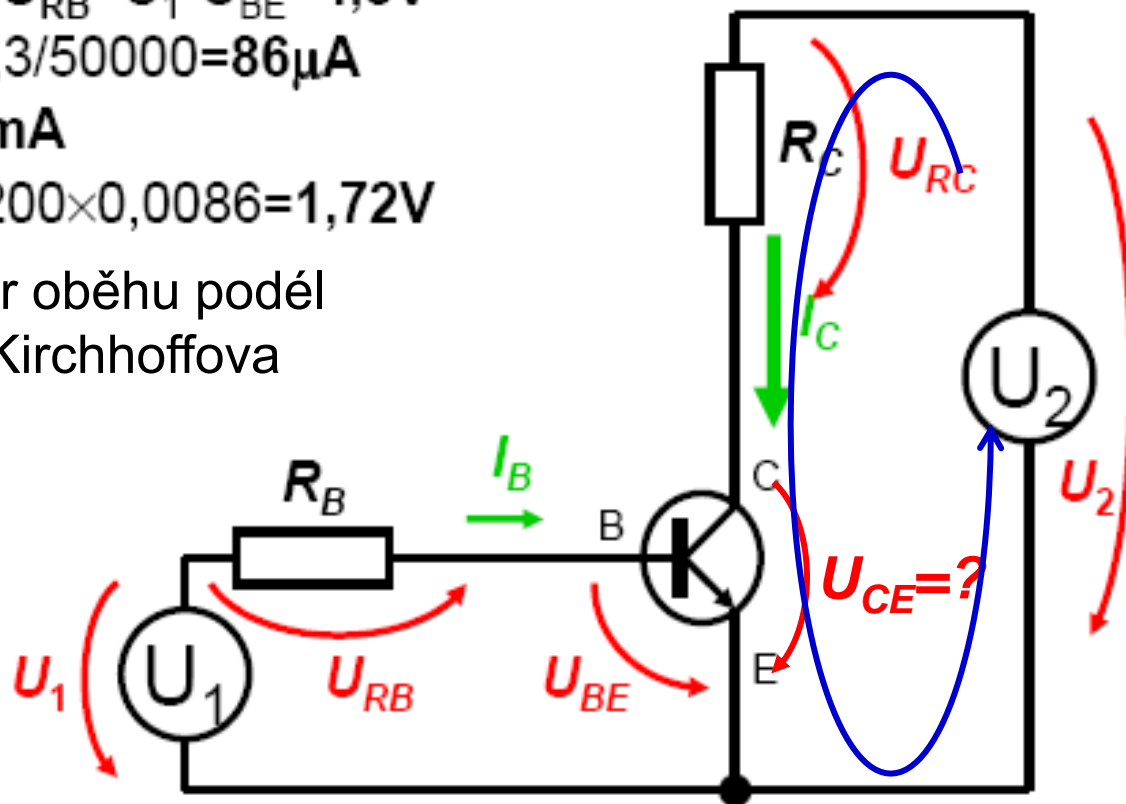


Příklad 1:

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

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

Modrá šipka naznačuje směr oběhu podél
bázové smyčky pro aplikaci Kirchhoffova
napětového zákona (KNZ).



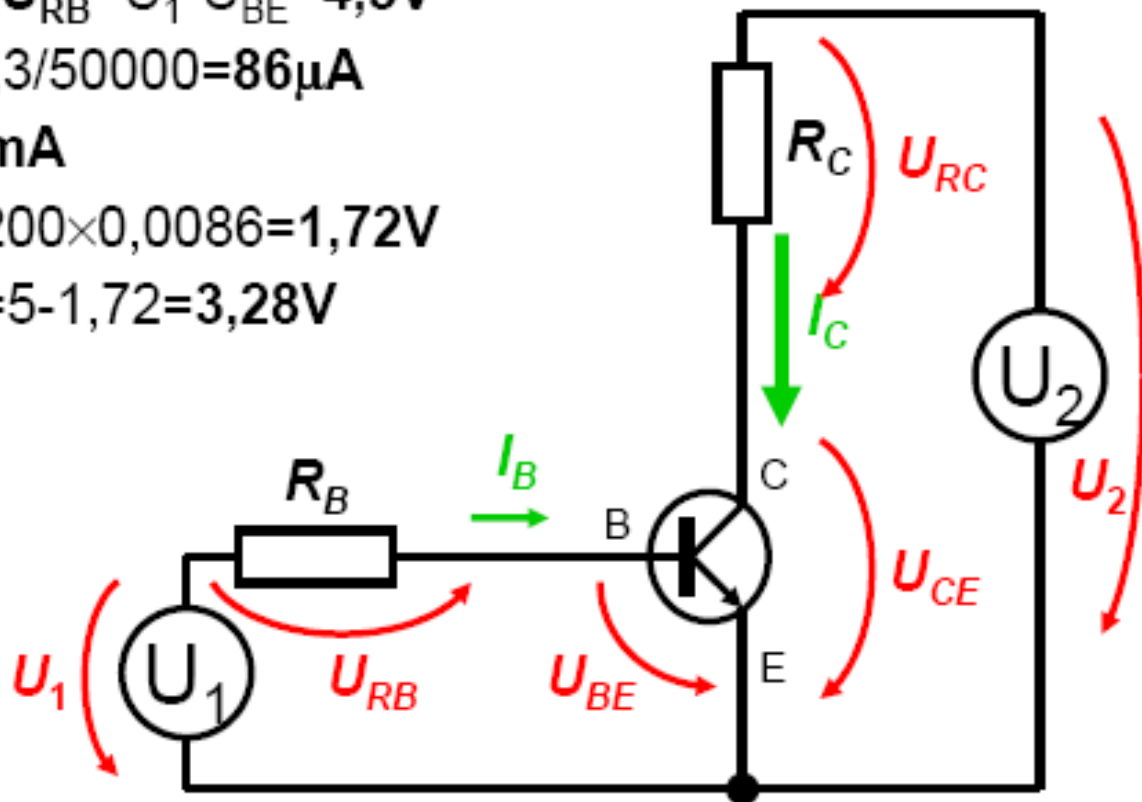
$$\text{(Podle KNZ: } U_{RC}+U_{CE}-U_2=0V \rightarrow U_{CE}=U_2-U_{RC}= \\ 5-1,72=3,28 \text{ V)}$$

$$U_{CE}=3,28V$$

Příklad 1:

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

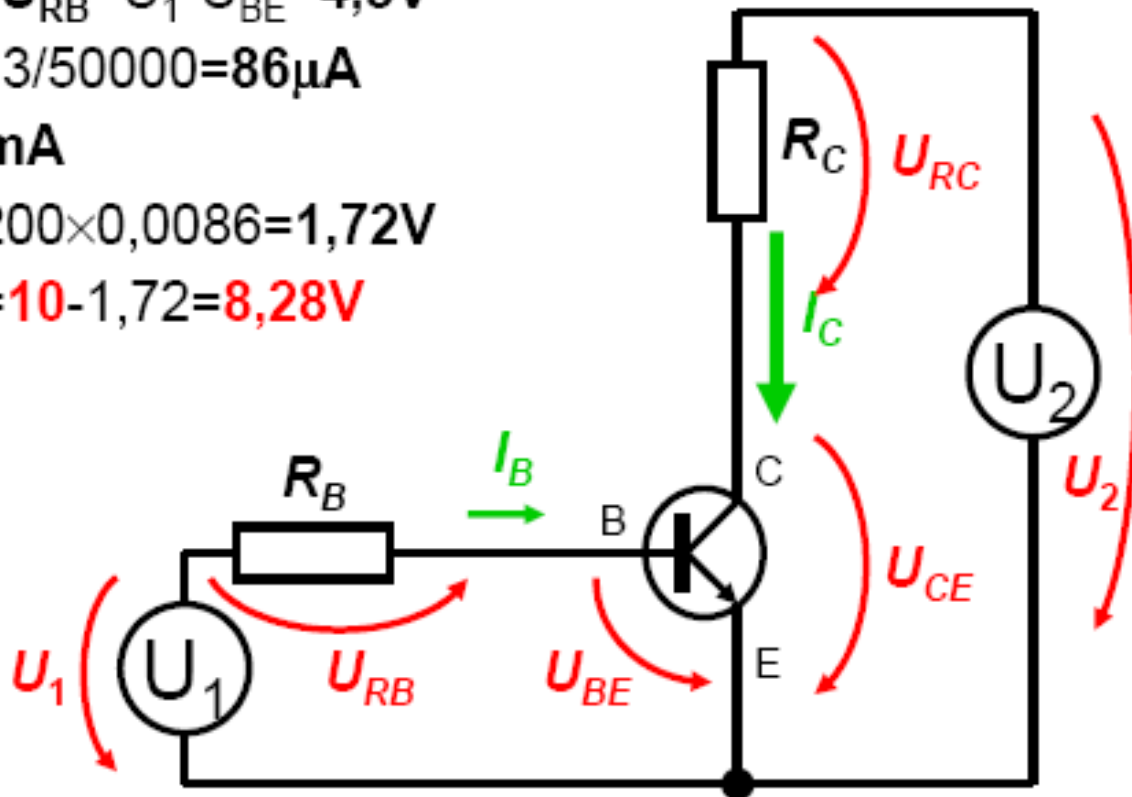
- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,0086=1,72V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=5-1,72=3,28V$



Příklad 2:

$$U_1=5V, U_2=10V, \\ R_B=50k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/50000=86\mu A$
- $I_C=\beta \times I_B=8,6mA$
- $U_{RC}=R_C \times I_C=200 \times 0,0086=1,72V$
- $U_{CE}=U_2-U_{RC}=10-1,72=8,28V$

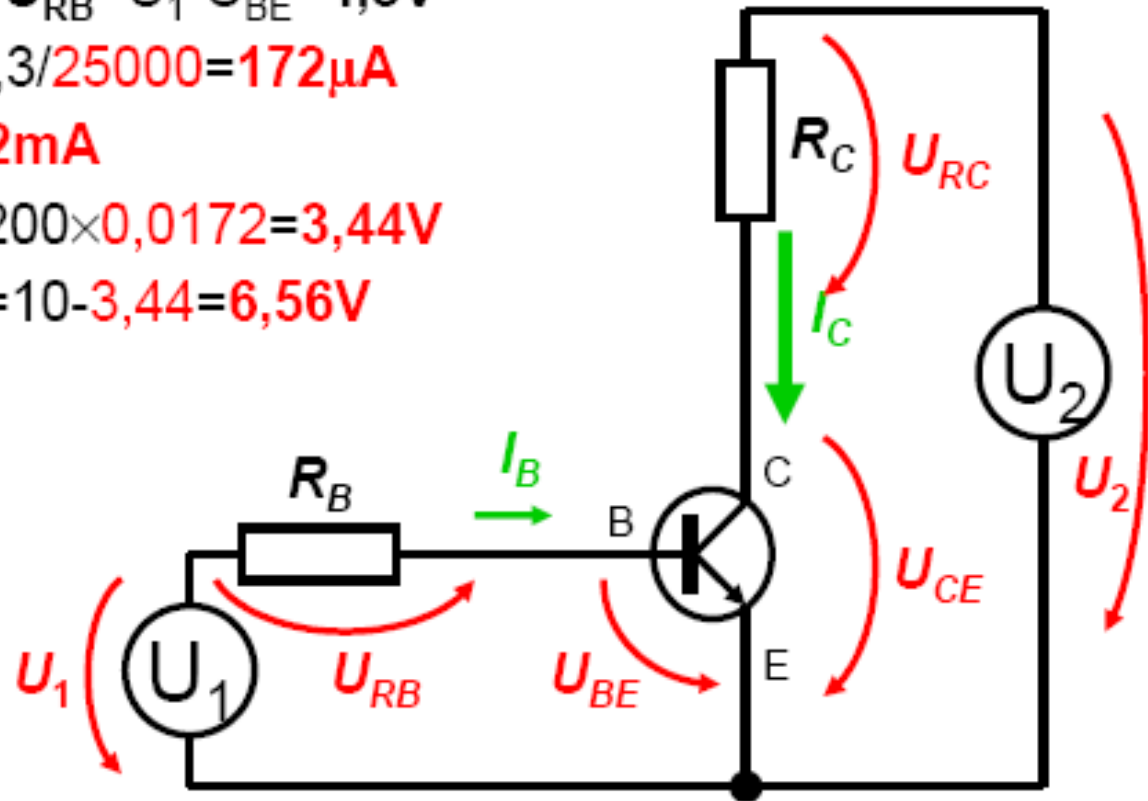


Opět jsme změnili některé zadané parametry obvodu

Příklad 3:

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

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

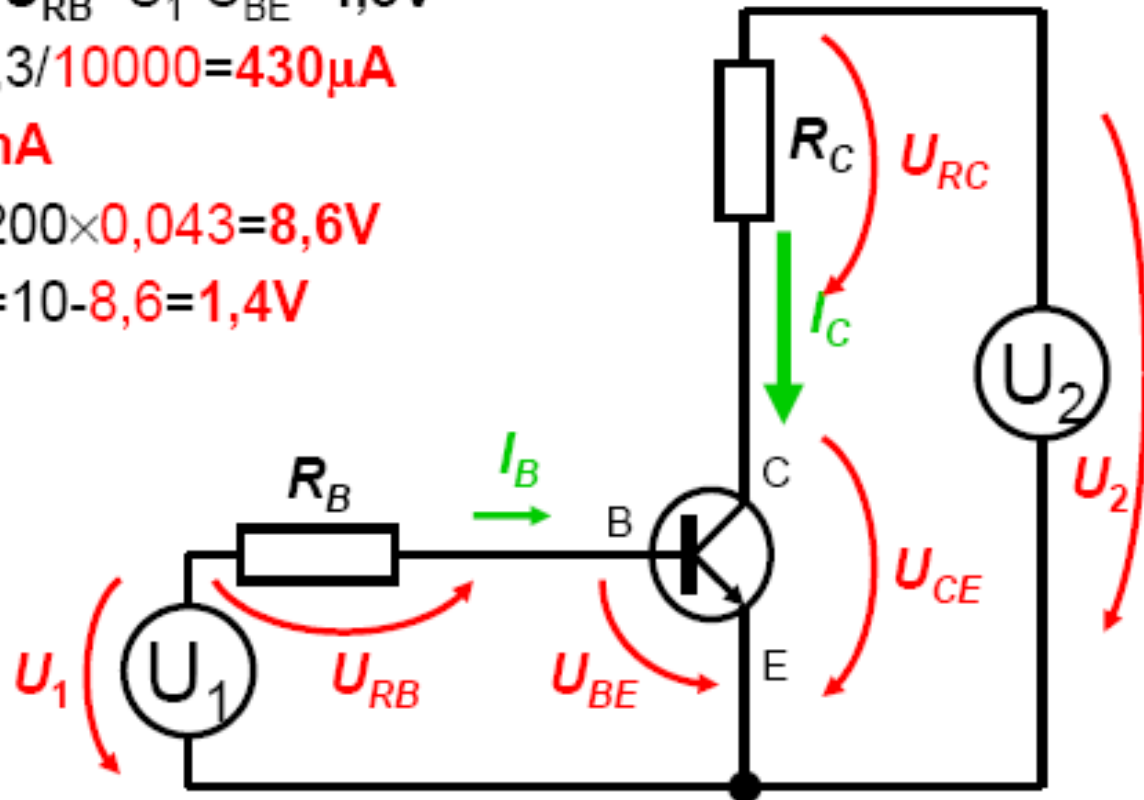


Opět jsme změnili některé zadané parametry obvodu

Příklad 4:

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

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

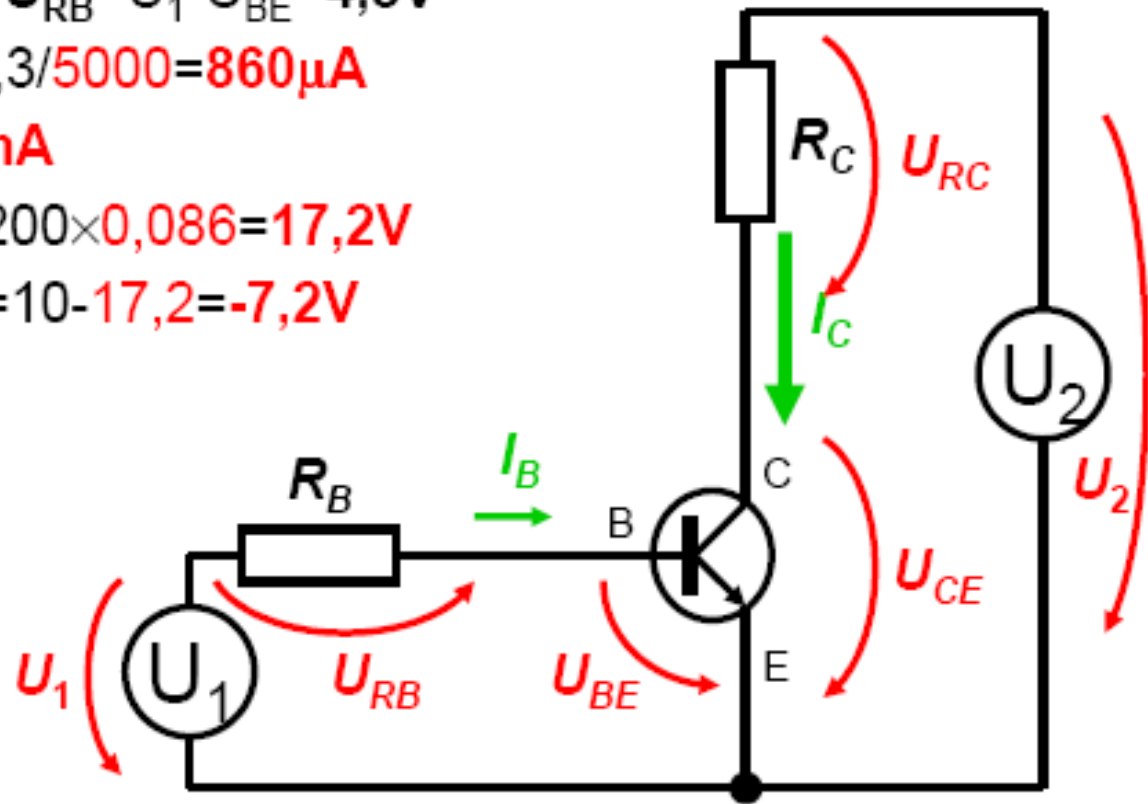


Opět jsme změnili některé zadané parametry obvodu

Příklad 5:

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

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



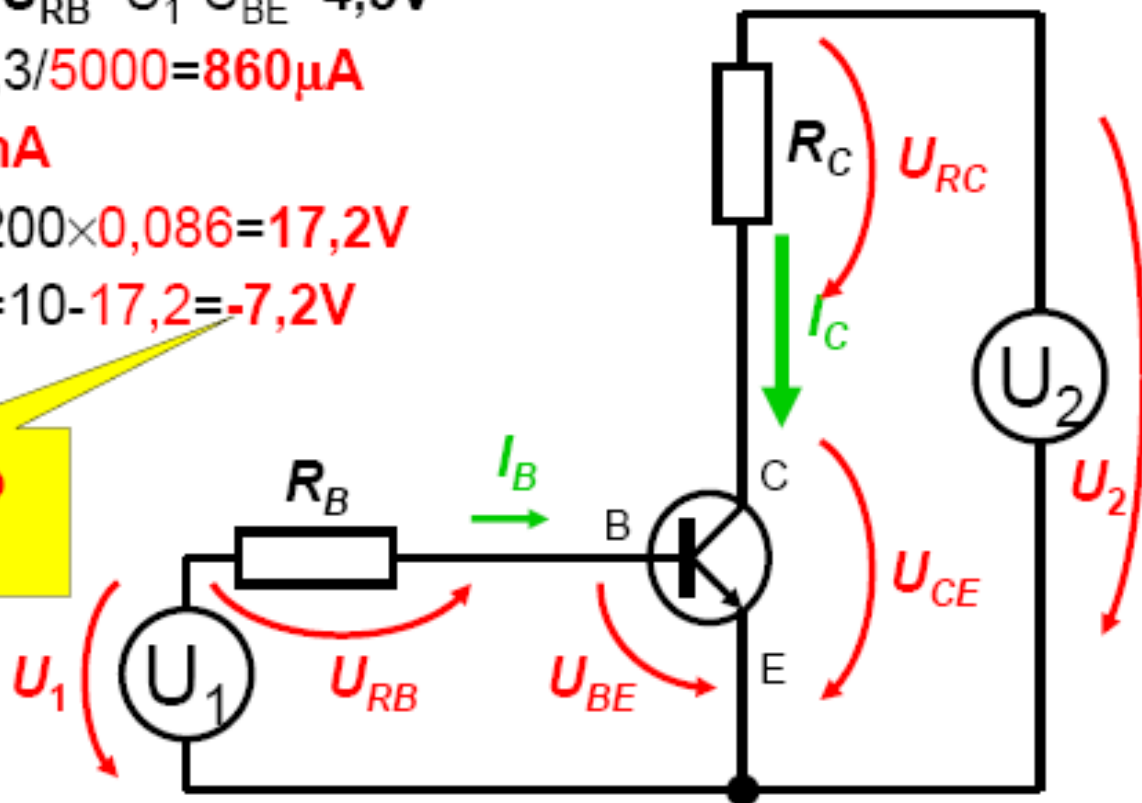
Napětí U_{CE} je nyní záporné. Co to znamená?

Příklad 5:

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

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

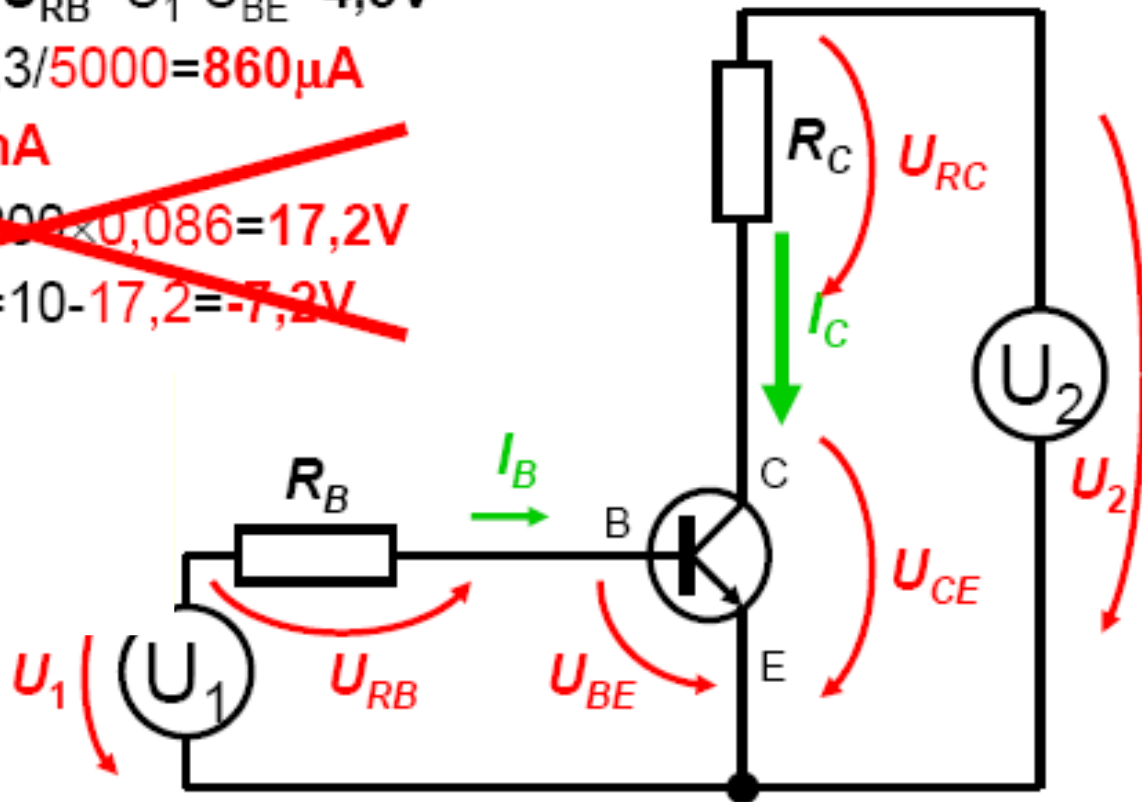
???



Příklad 5:

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

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



Tranzistor je nyní plně otevřen- dostal se do saturace, tj. stavu nasycení. El. veličiny v kolektorové smyčce musíme počítat jinak. Pro NPN v saturaci:

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

Příklad 5:

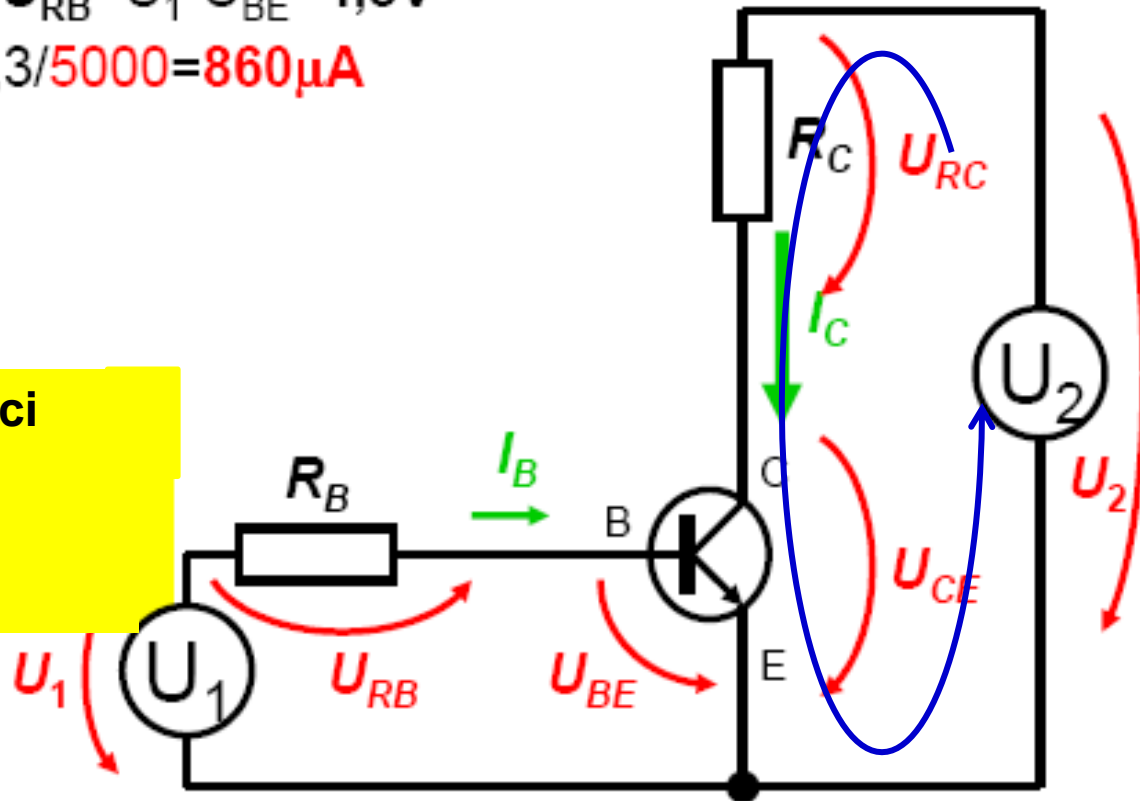
$$U_1=5V, U_2=10V, \\ R_B=5k\Omega, R_C=200\Omega, \\ \beta=100$$

- $U_{BE}=0,7V \Rightarrow U_{RB}=U_1-U_{BE}=4,3V$
- $I_B=U_{RB}/R_B=4,3/5000=860\mu A$

Tranzistor v saturaci

= zcela otevřen

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

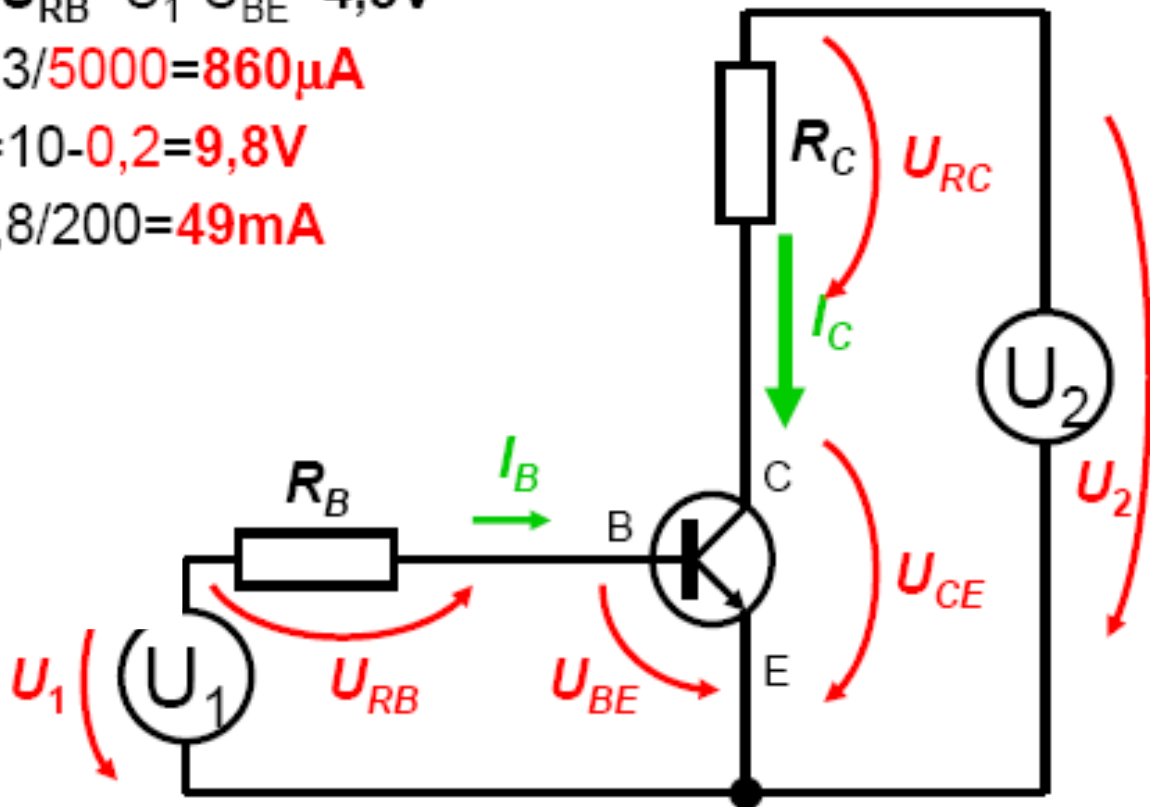


$$(\text{Podle KNZ: } U_{RC}+U_{CE}-U_2=0V \rightarrow U_{RC}=U_2- U_{CE}= \\ 10-0,2=9,8 \text{ V})$$

Příklad 5:

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

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



Z U_{RC} pomocí Ohmova zákona určíme I_C .

Všechny el. veličiny v kolektorové i bázevé smyčce již známe.
Analýza obvodu je hotová.

Bipolární NPN tranzistory – operační režimy

- Spínač rozepnutý (tranzistor zavřený)

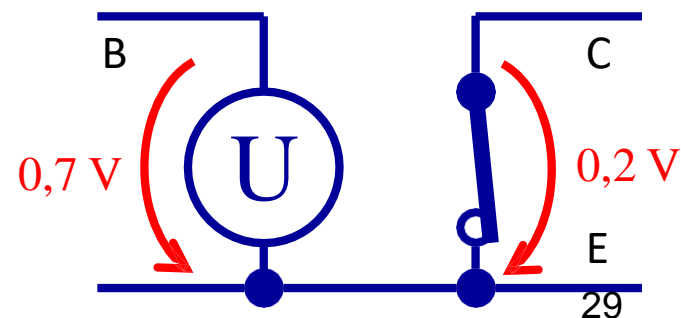
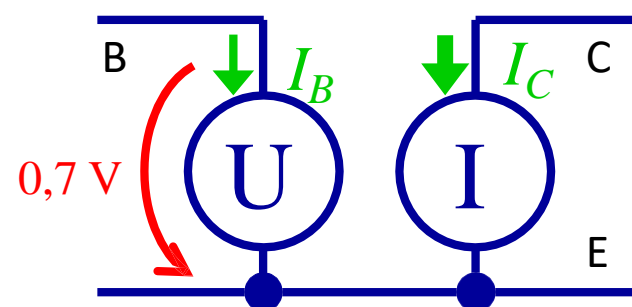
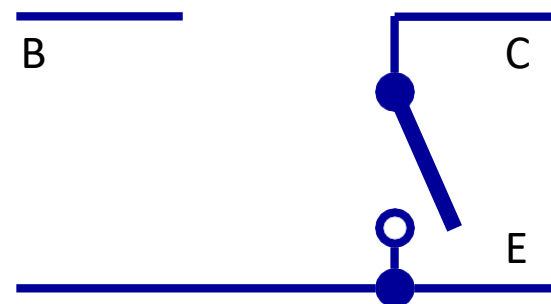
- $I_B = 0$

- Zesilovač

- $I_B > 0$, $I_C = \beta \times I_B$

- Spínač sepnutý (saturace)-
tranzistor je plně otevřen

- $I_B \gg 0$



Výkonová ztráta v tranzistorech

- K výkonovým ztrátám v tranzistoru dochází, je-li tranzistor otevřen a protéká jím proud I_C . Výkonová ztráta na přechodu kolektor-emitor:

- $P_{CE} = U_{CE} \cdot I_C$

Ke ztrátám dochází i na přechodu báze-emitor:

$$P_{CE} = U_{BE} \cdot I_B$$

Je-li tranzistor zavřený, neprotéká jím proud I_C a k výkonovým ztrátám nedochází.

Výkonová ztráta v tranzistorech

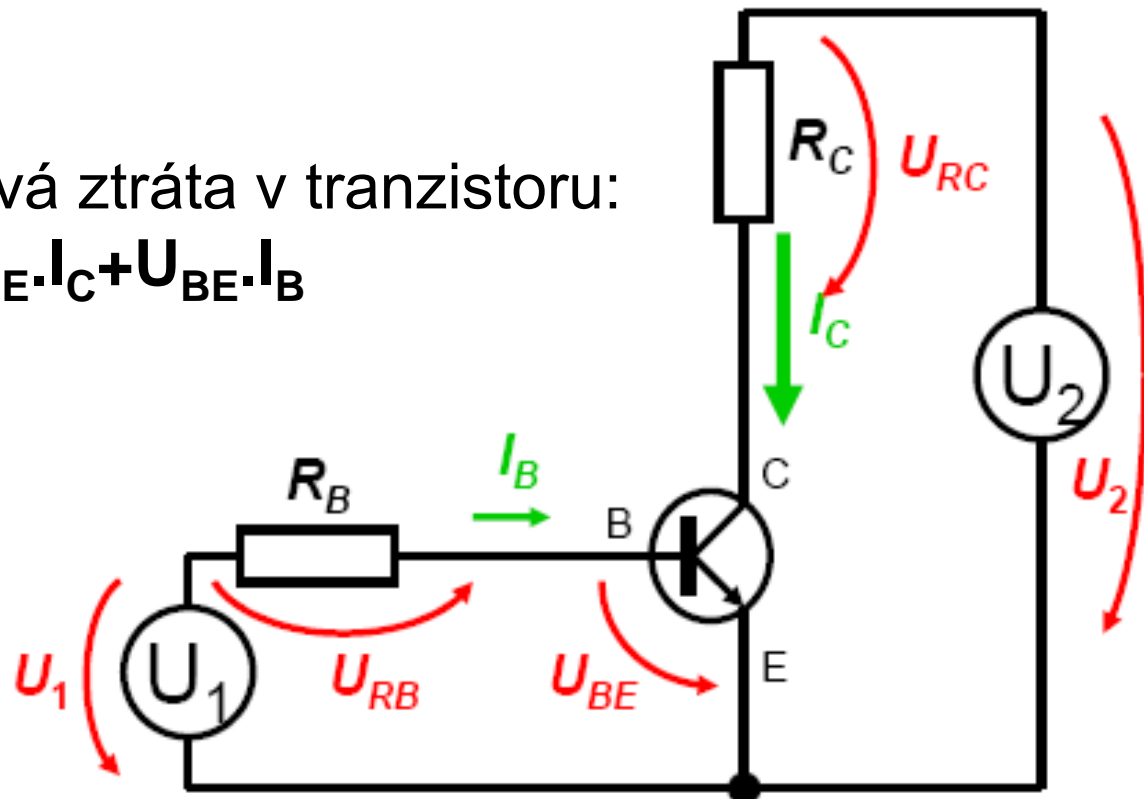
- Příklad 6:

Výkonová ztráta v rezistoru R_C :

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

Celková výkonová ztráta v tranzistoru:

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



Unipolární tranzistory MOS FET

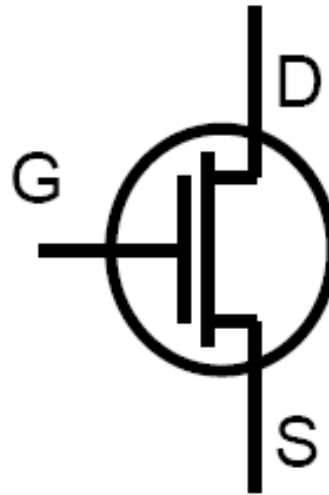
Prvek se třemi vývody

G... gate

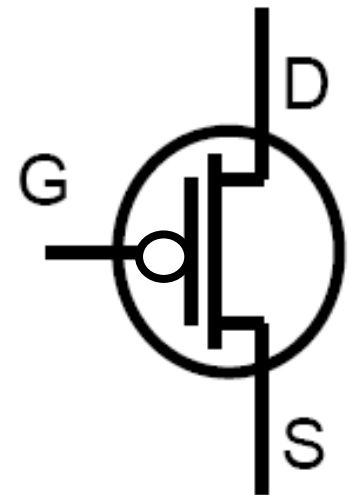
D... drain

S.....source

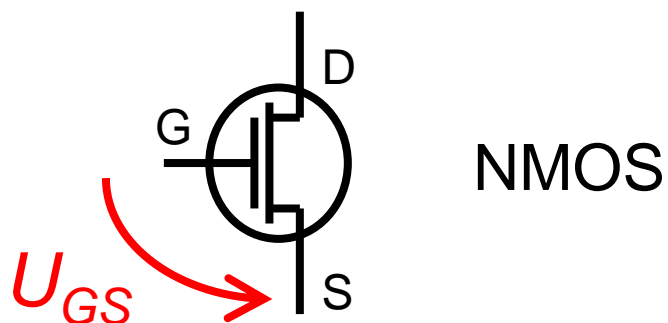
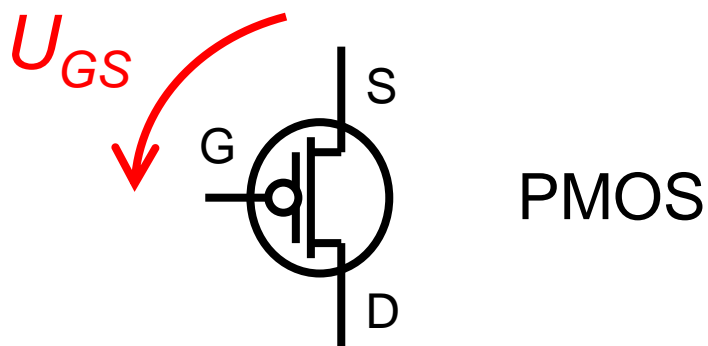
NMOS



PMOS



Unipolární tranzistor jako spínač řízený napětím U_{GS}



Je-li řídicí napětí U_{GS} kladné ve směru šipky a vyšší než prahové napětí U_{th} , pak je tranzistor otevřený (sepnutý) a teče jím el. proud. Je-li menší než prahové napětí U_{th} , pak je tranzistor zavřený (rozepnutý) a proud jím neteče.

Unipolární tranzistor jako zesilovač

Užívá se jako zdroj el. proudu I_D
řízeného el. napětím U_{GS}

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

U_{th} ...prahové napětí [V]

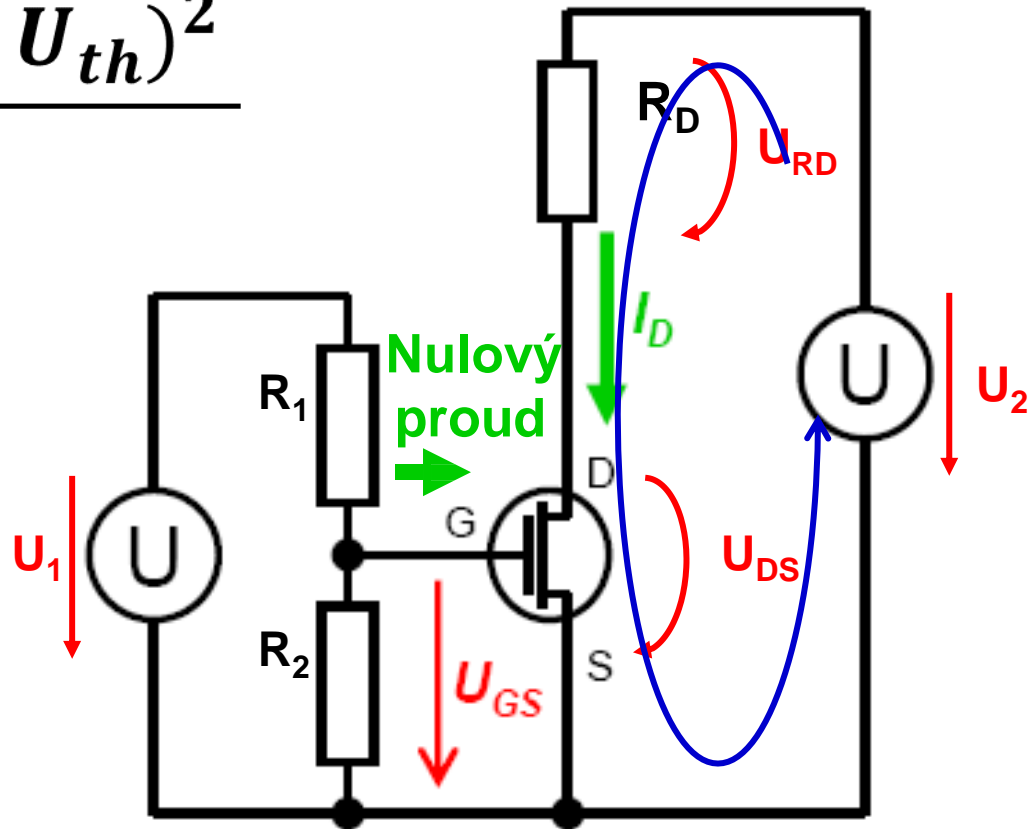
K ...zesilovací činitel [A/V^2]

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

$$U_{RD} = I_D R_D$$

Podle KNZ:

$$U_{DS} = U_2 - U_{RD}$$



Příklad 7:

Určete všechny el. veličiny v obvodu s danými parametry:

$U_1=8,0\text{ V}$
 $U_2=12,0\text{ V}$
 $R_1=150\text{ k}\Omega$
 $R_2=220\text{ k}\Omega$
 $R_D=470\text{ }\Omega$
 $K=2\text{ mA}\cdot\text{V}^{-2}$
 $=0,002\text{ A}\cdot\text{V}^{-2}$
 $U_{th}=2,5\text{ V}$

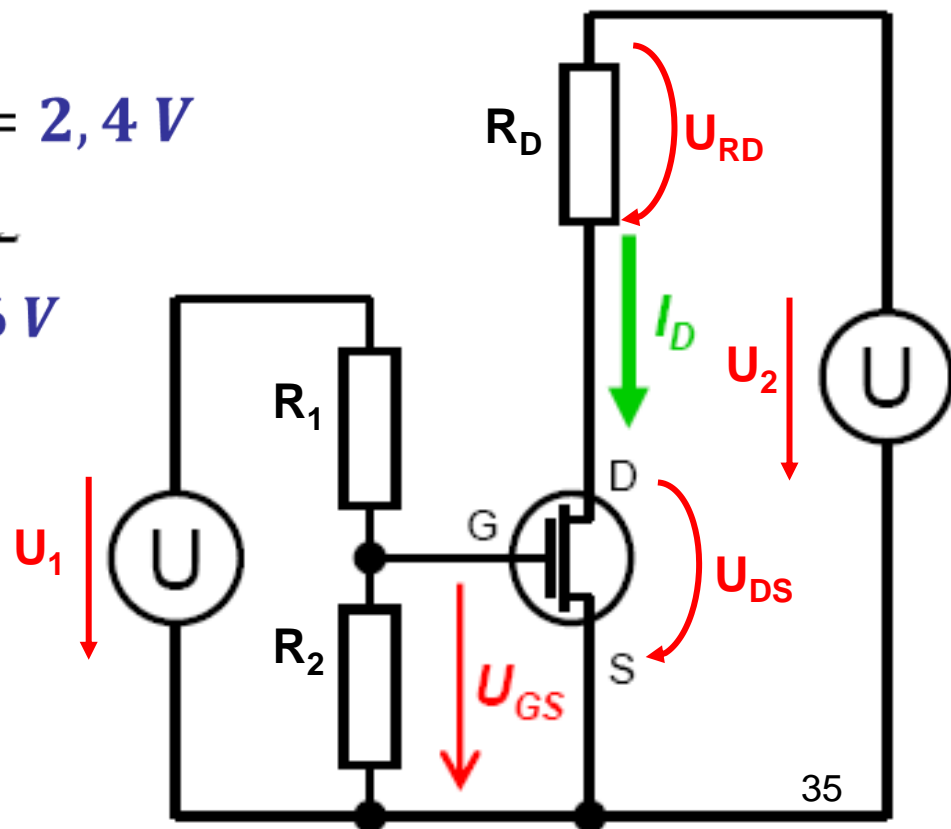
$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{220000}{220000 + 150000} \cdot 8 = 4,76\text{ V}$$

$$I_D = K \cdot \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} = 0,002 \cdot \frac{(4,76 - 2,5)^2}{2} = 5,11\text{ mA}$$

$$U_{RD} = R_D \cdot I_D = 470 \cdot 5,11 \cdot 10^{-3} = 2,4\text{ V}$$

Podle KNZ:

$$U_{DS} = U_2 - U_{RD} = 12,0 - 2,4 = 9,6\text{ V}$$



Příklad 8:

Určete všechny el. veličiny v obvodu, jsou-li dány parametry obvodu:

$U_1 = 8,0 \text{ V}$
 $U_2 = 2,0 \text{ V}$
 $R_1 = 150 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$
 $R_D = 470 \text{ }\Omega$
 $K = 2 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-2} = 0,002 \text{ A}\cdot\text{V}^{-2}$
 $U_{th} = 2,5 \text{ V}$

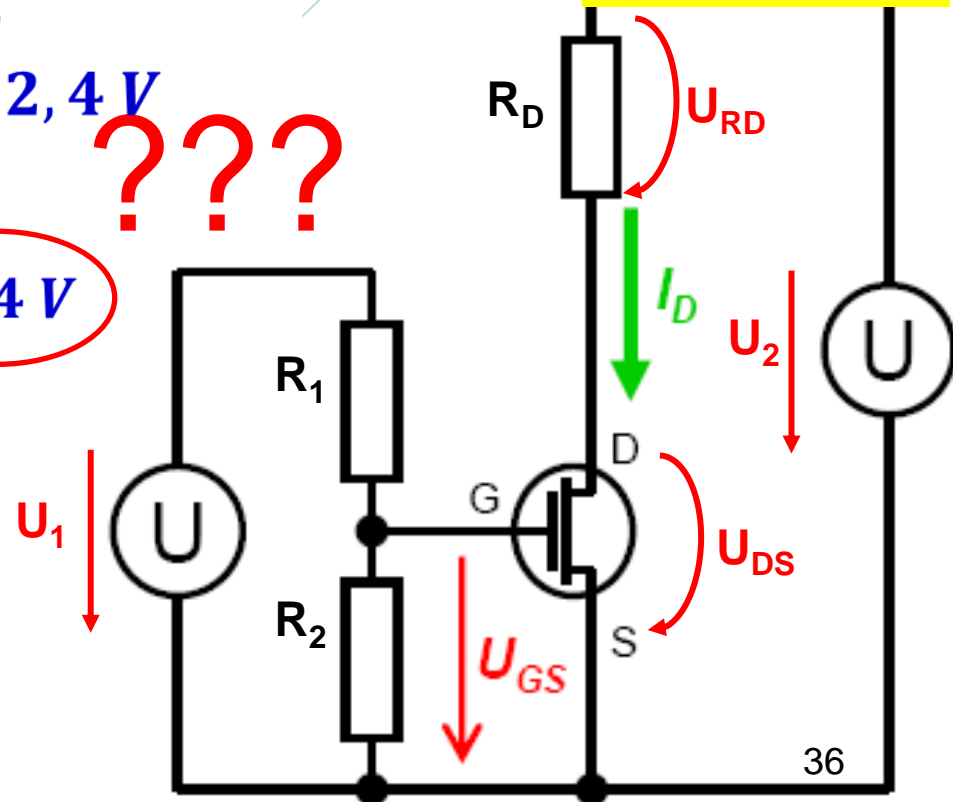
$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{220000}{220000 + 150000} \cdot 8 = 4,76 \text{ V}$$
$$I_D = K \cdot \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} = 0,002 \cdot \frac{(4,76 - 2,5)^2}{2} = 5,11 \text{ mA}$$

$$U_{RD} = R_D \cdot I_D = 470 \cdot 5,11 \cdot 10^{-3} = 2,4 \text{ V}$$

Podle KNZ:

$$U_{DS} = U_2 - U_{RD} = 2,0 - 2,4 = -0,4 \text{ V}$$

Záporná hodnota U_{GS} naznačuje, že tranzistor pracuje v Ohmickém režimu.



Příklad 8:

$U_1 = 8,0 \text{ V}$
 $U_2 = 2,0 \text{ V}$
 $R_1 = 150 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$
 $R_D = 470 \text{ }\Omega$
 $K = 2 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-2}$
 $U_{th} = 2,5 \text{ V}$

$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{220000}{220000 + 150000} \cdot 8 = 4,76 \text{ V}$$

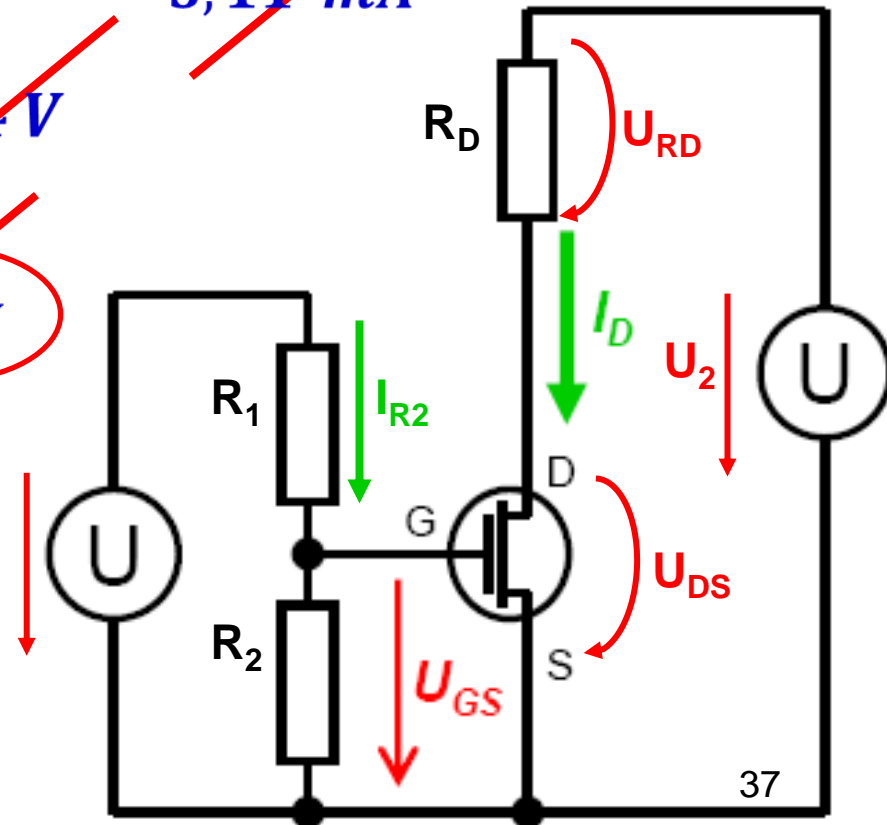
$$I_D = K \cdot \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} = 0,002 \cdot \frac{(4,76 - 2,5)^2}{2} = 5,11 \text{ mA}$$

$$U_{RD} = R_D \cdot I_D = 470 \cdot 5,11 \cdot 10^{-3} = 2,4 \text{ V}$$

According to KVL:

$$U_{DS} = U_2 - U_{RD} = 2,0 - 2,4 = -0,4 \text{ V}$$

Hodnoty veličin I_D , U_{RD} a U_{DS} musíme počítat jinak



Unipolární tranzistor v lineárním (Ohmickém) režimu

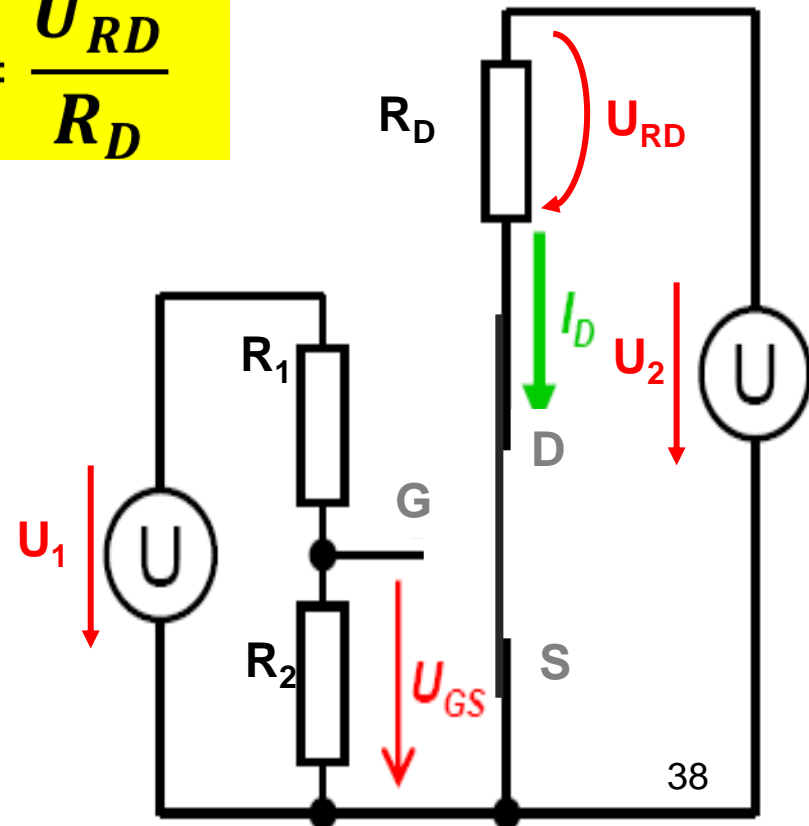
El napětí U_{DS} mezi Drain and Source nemůže být záporné, protože vnitřní odpor mezi Drain a Source by musel být záporný. To není možné. V této situaci je tranzistor plně otevřený a strukturu mezi Drain a Source můžeme nahradit ideálním vodičem. Proud I_D je nyní zcela nezávislý na velikosti U_{GS} . U unipolárních tranzistorů neříkáme, že je tranzistor v saturaci, ale že pracuje v lineárním (Ohmickém) režimu.

Podle KNZ (tranzistor v lineárním režimu:

$$U_2 = U_{RD}$$

Z Ohmova zákona:

$$I_D = \frac{U_{RD}}{R_D}$$



Zpět k příkladu 8:

$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{220000}{220000 + 150000} \cdot 8 = 4,76V$$

$$\begin{aligned} U_1 &= 8,0 \text{ V} \\ U_2 &= 2,0 \text{ V} \\ R_1 &= 150 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 220 \text{ k}\Omega \\ R_D &= 470 \text{ }\Omega \\ K &= 2 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-2} \\ U_{th} &= 2,5 \text{ V} \end{aligned}$$

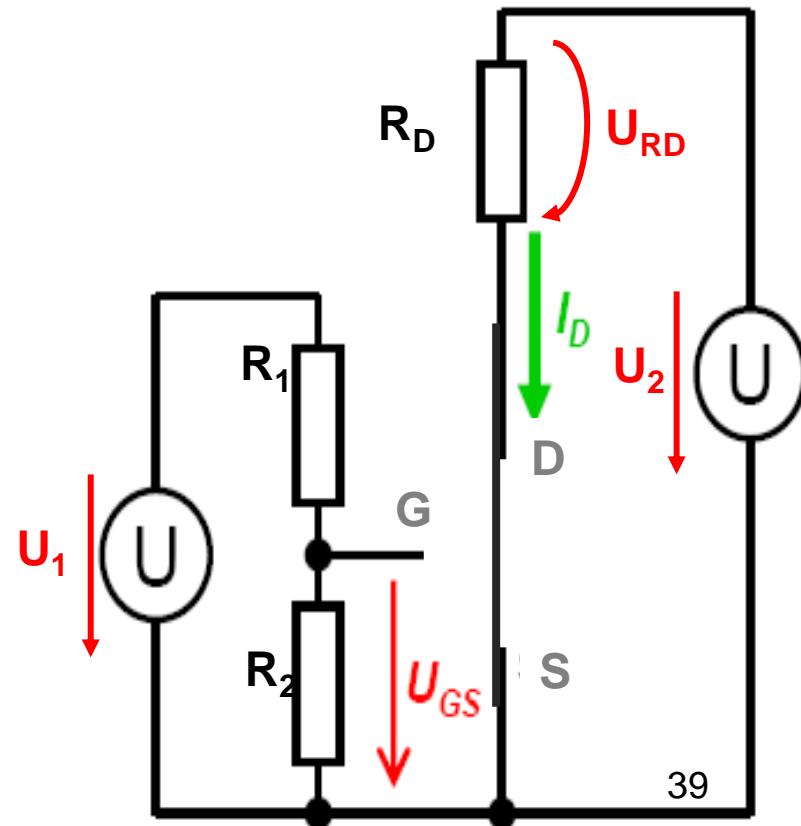
Podle KNZ: $U_2 = U_{RD}$

$$U_{RD} = U_2 = 2V$$

Podle Ohmova zákona:

$$I_D = \frac{U_{RD}}{R_D}$$

$$I_D = \frac{U_{RD}}{R_D} = \frac{2}{470} = 4,26 \text{ mA}$$



Unipolární tranzistory – operační režimy

□ Spínač rozepnutý

Tranzistor zavřený

$$U_{GS} < U_{th}$$

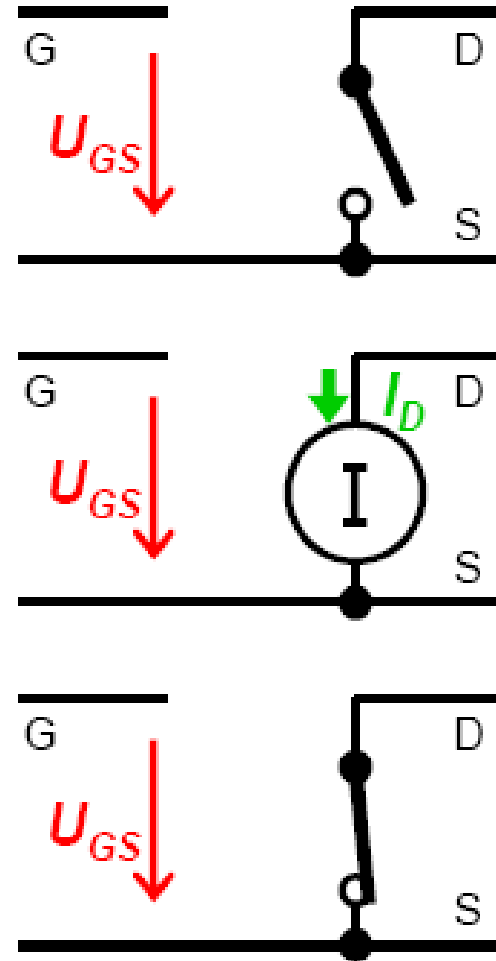
□ zesilovač

$$U_{GS} > U_{th}$$

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

□ Tranzistor plně sepnutý

$$U_{GS} \gg U_{th}$$



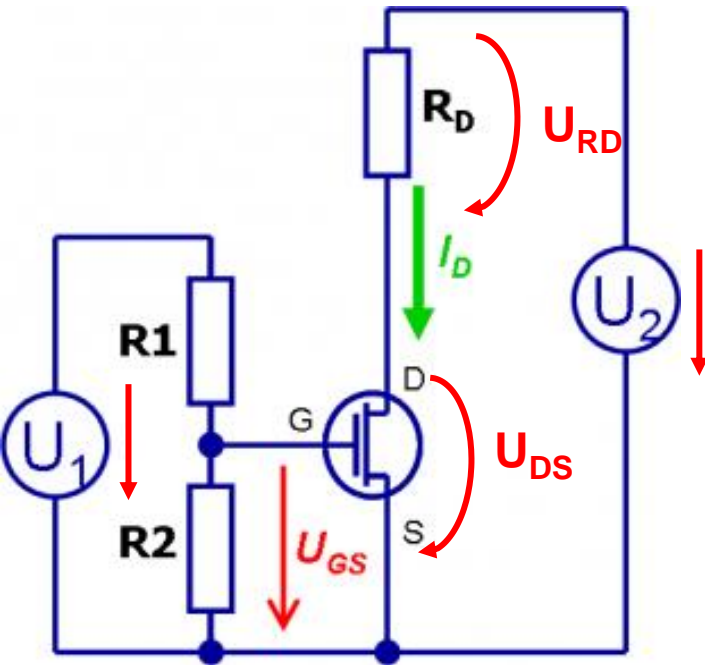
Výkonové ztráty v obvodu s unipolárním tranzistorem

- K výkonovým ztrátám v tranzistoru dochází, je-li tranzistor otevřen a protéká jím proud I_D . Výkonová ztráta mezi Drain a Source

$$P_{DS} = U_{DS} \cdot I_D$$

- Výkon se ztrácí formou tepla.
- Je-li tranzistor zavřený, neprotéká jím proud I_D a k výkonovým ztrátám nedochází.

Výkonová ztráta v obvodu s tranzistorem



$$P_{\text{Total}} = P_{RD} + P_{DS}$$

P_{Total} = Celková výkonová ztráta v obvodu

P_{RD} = Výkonová ztráta na rezistoru R_D

P_{DS} = Výkonová ztráta v tranzistoru mezi Drain a Source

Ztráta na
resistoru R_D

Ztráta v
tranzistoru

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