



Aktivní součástky





Vyučující:

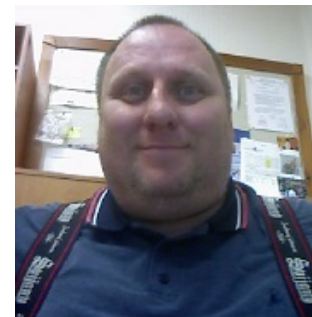
Zdeněk Plíva

*e-mail: zdenek.pliva@tul.cz
3536*



Miroslav Holada
Leoš Petržílka

...



<http://www.ife.tul.cz>





Přehled témat

- Diody
- Bipolární tranzistory
- Unipolární tranzistory






Přehled info-markerů



Informace obsažené ve slajdech přednášek jsou různě důležité pro různé studijní obory a zaměření. Na některých slajdech může být značka, která informuje o významnosti a důležitosti prezentované informace.

 důležité - vyžadováno u zkoušky

 informativní slajd s "doplňkovou" informací

Pokud slajd není označen, tak je jeho důležitost střední (tj. Něco mezi důležitým a informativním).

 základní znalosti z předchozího studia (fyziky)

 zásadní informace pro pochopení další látky

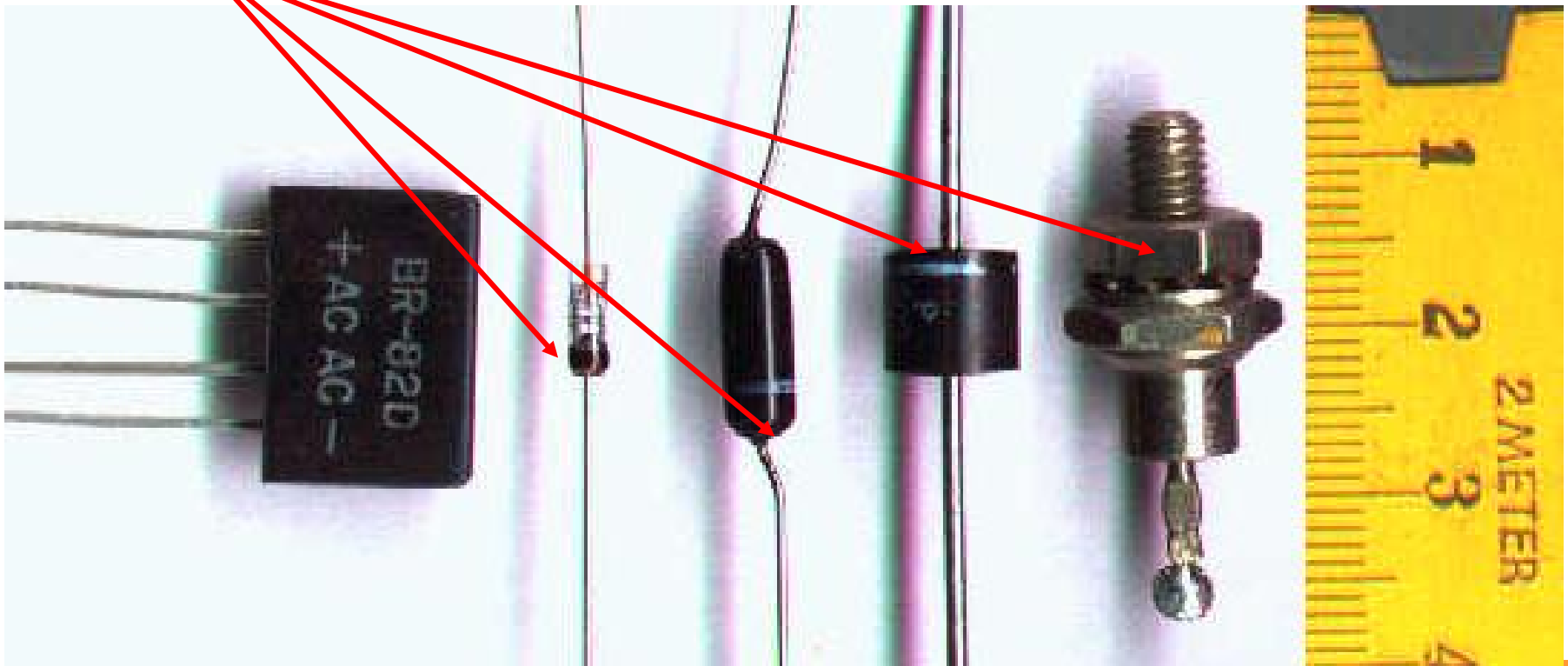




Diody



Katoda





Diody



- Pasivní elektronické součástky se dvěma elektrodami (**anoda, katoda**)
- Jeden **přechod** PN nebo přechod kov-polovodič,
- Propouští proud pouze při jedné polaritě napětí na elektrodách.
- V **propustném** (forward) směru – exponenciální závislost proudu na napětí
- V **závěrném** (reverse) směru – malý **zbytkový saturační (nasycený) proud**.

Napětí v propustném směru s teplotou **klesá** ca o **2 mV/K**,
Závěrný proud s teplotou roste **2x** až **3x** na každých **10 °C**.

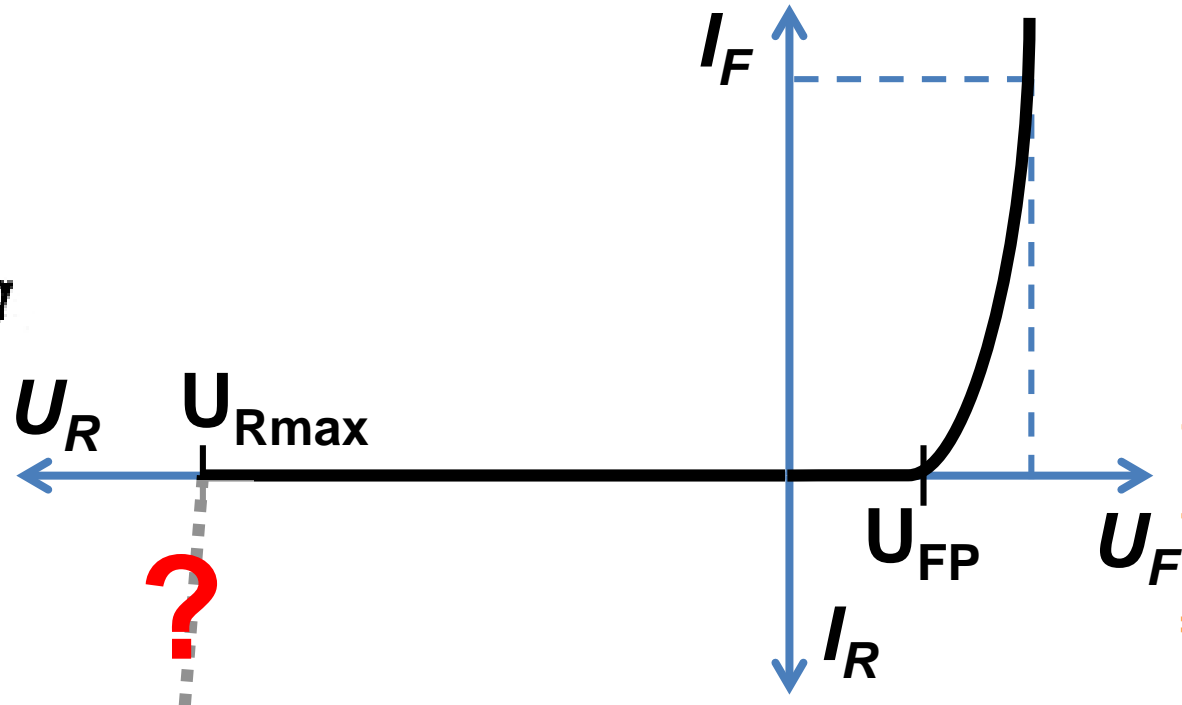
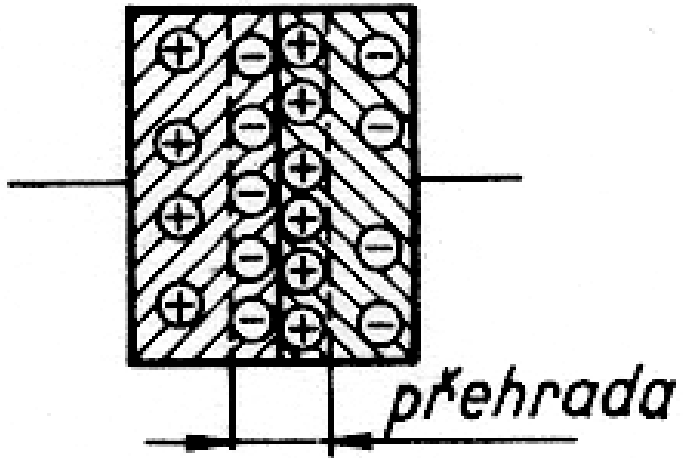
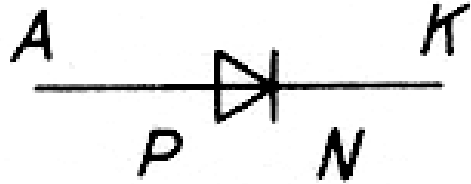




Diody



anoda, katoda,



<http://www.ife.tul.cz>

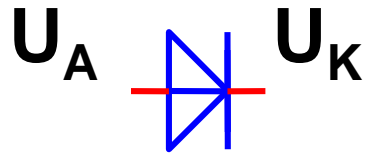




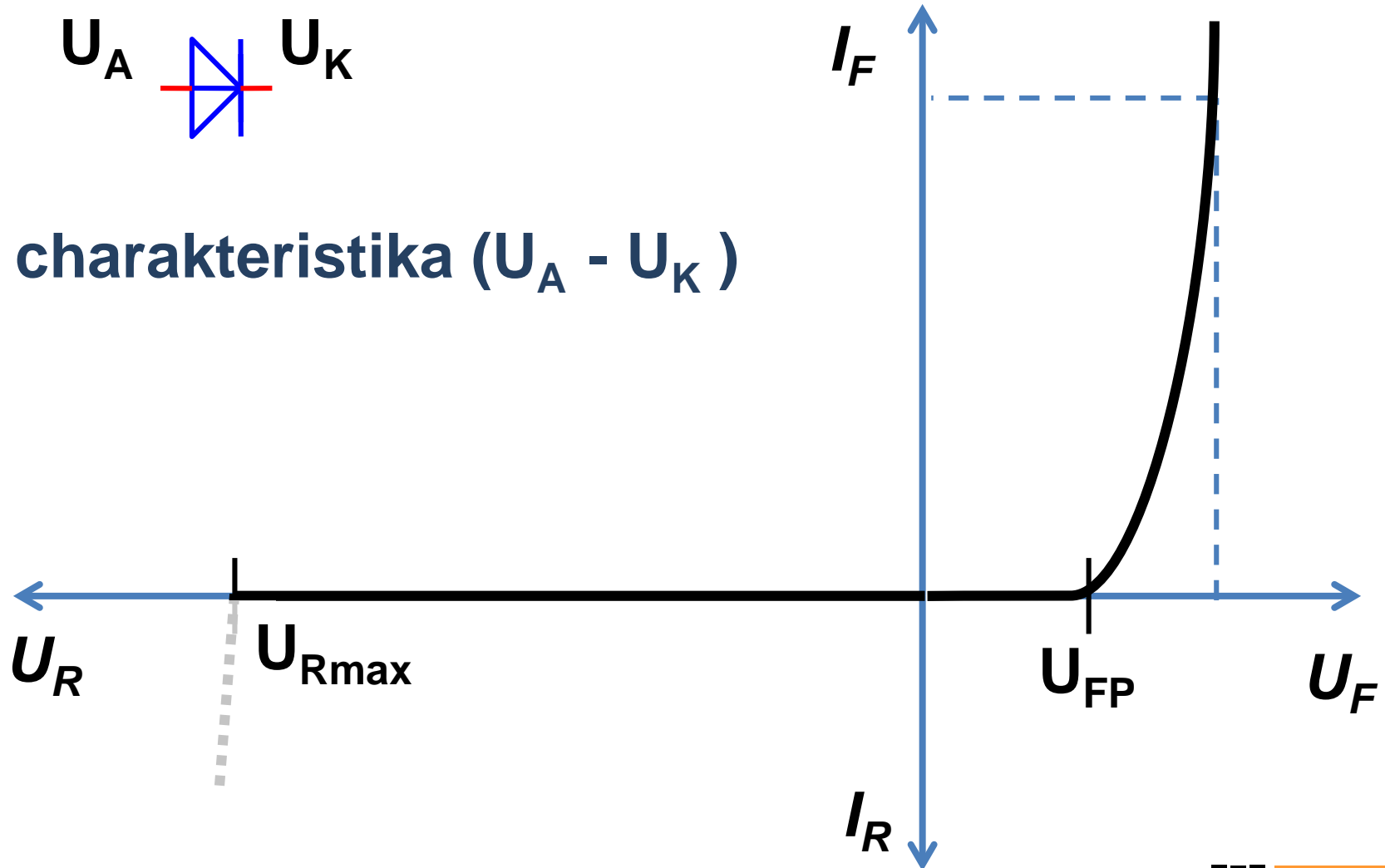
Diody

Závěrný směr

Propustný směr

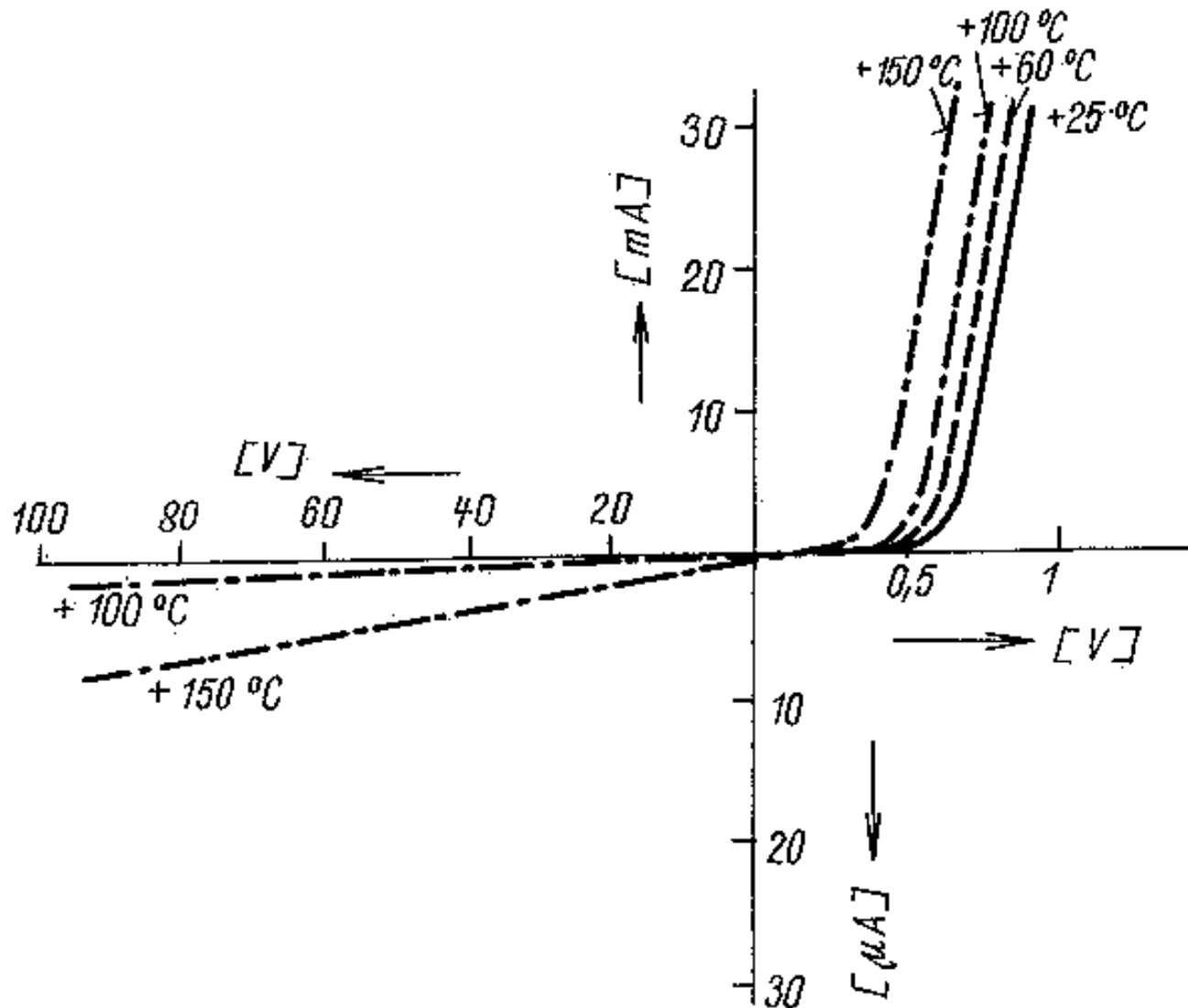


VA charakteristika ($U_A - U_K$)





Teplotní závislost





Rozdělení:

- Usměrňovací (spínací) diody (usměrnění střídavých proudů)
- Stabilizační diody (stabilizace napětí)
- Fotodiody (detekce světelného záření)
- Kapacitní diody (ladění rezonančních obvodů)
- Tunelové diody (vybuzení oscilací, zesilování signálu)
- LED = Elektroluminiscenční diody (vyzařování světla)





Diody



Prahové napětí cca. $U_{FP}=0,5V$ (Si)

Max. propustný proud $I_{FAV} = 0,05..20A$

Max. napětí v závěrném směru

$U_{Rmax} = 30..1000V$

Závěrný proud $I_R = 10^{-8} - 10^{-5} A$ (při běžné teplotě)

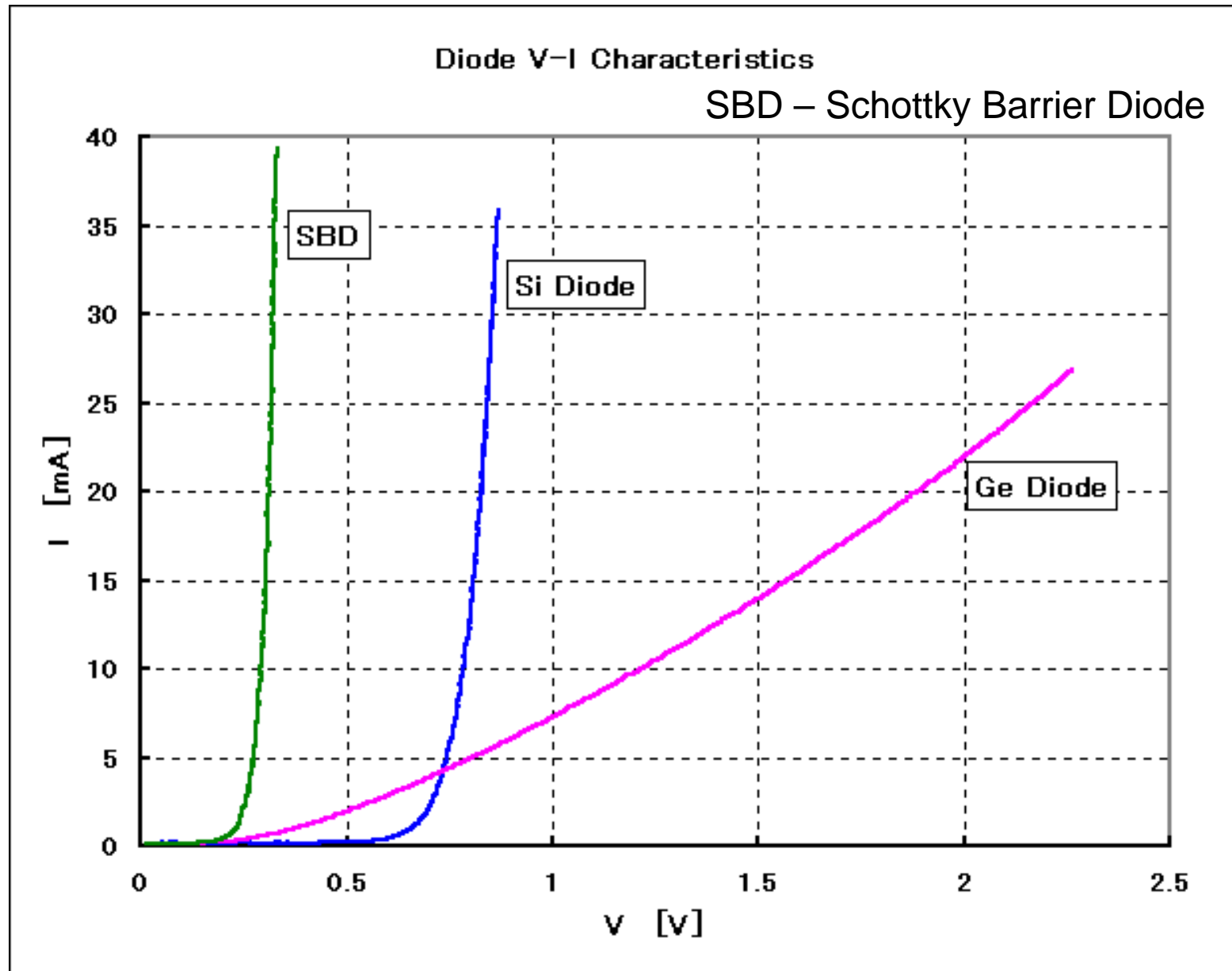
Doba (závěrného) zotavení $t_{rr} = 10^{-5}..10^{-12} [s]$

Diferenciální odpor $r_d = \Delta U_F / \Delta I_F (10^{-2}..10^1 \Omega)$





Vliv materiálu na charakteristiku



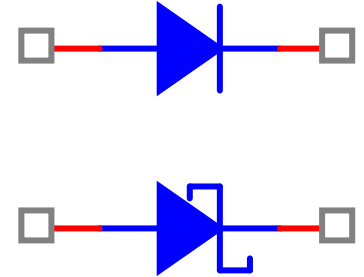


Diody



Schottkyho dioda

- přechod kov-polovodič = propustný směr: P+ | M- n. N- | M
- též usměrňovací a spínací



Parametry

- nízké napětí $U_{FP} \sim 0,1 \dots 0,15 \text{ V}$
- nižší závěrné napětí $U_{RM} \sim 10 \dots 150 \text{ V}$
- vyšší závěrný proud $I_R \sim 0,5 \dots 100 \mu\text{A}$
- velmi rychlé přepnutí při komutaci $\sim 10^{-12} \text{ s}$
- malý dynamický odpor v propustném směru



Použití

- ✓ vf detektory (usměrňovače)
- ✓ usměrňovače nízkého napětí (a velkého proudu) a/nebo o vysokém kmitočtu (DC/DC měniče, $10^5 \dots 10^6 \text{ Hz}$)
- ✓ rychlé spínače





Usměrňovače

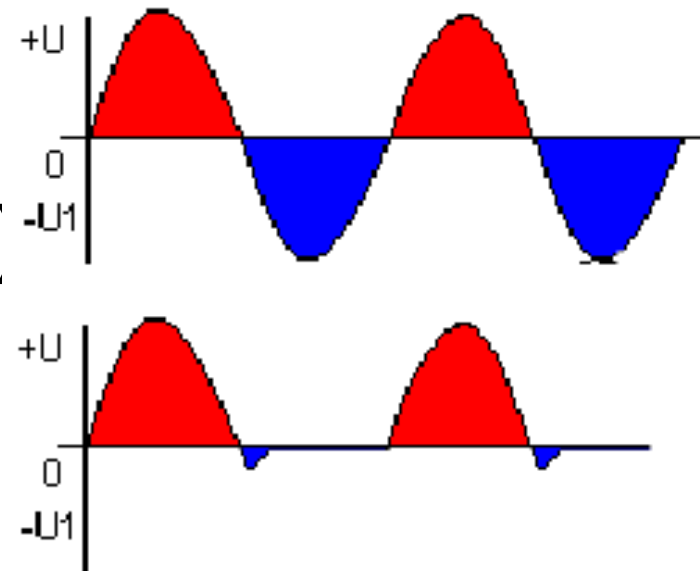


Změna střídavého průběhu napětí na periodické s nenulovou stejnosměrnou složkou

Jednofázové

- jednopulsní (jednocestné)
- dvoupulsní (dvoucestné)
 - v uzlovém zapojení
 - v můstkovém zapojení

Vícefázové (trojfázové)





Usměrňovače

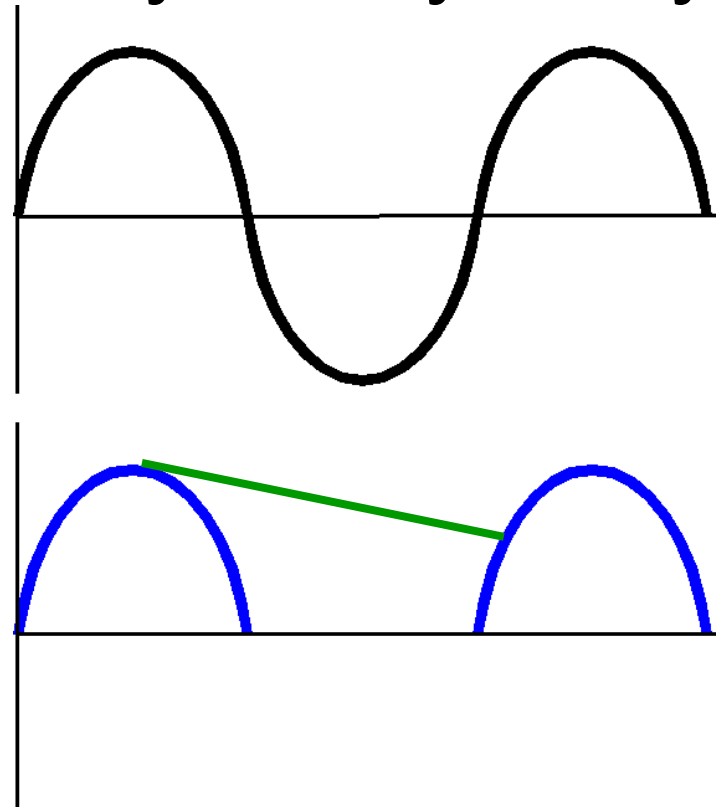
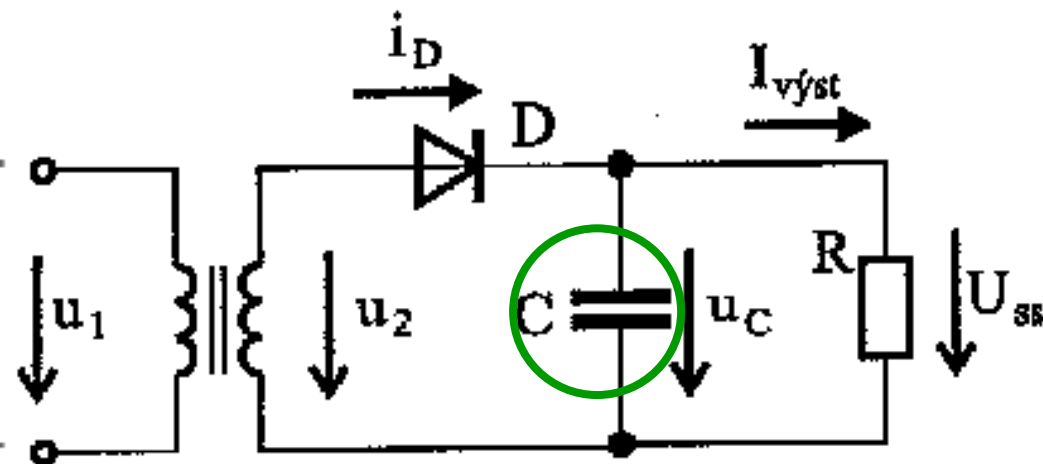


velké zvlnění, velké

Jednocestné

ztráty v transformátoru (nesymetrie)

pro menší proudové odběry, nutný velký kapacitor C



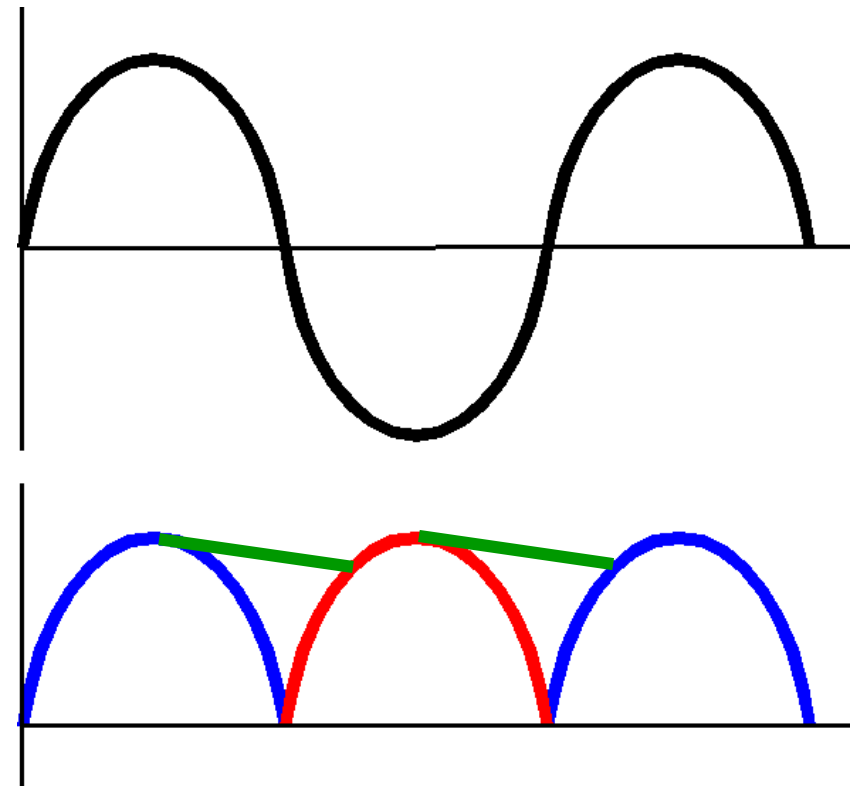
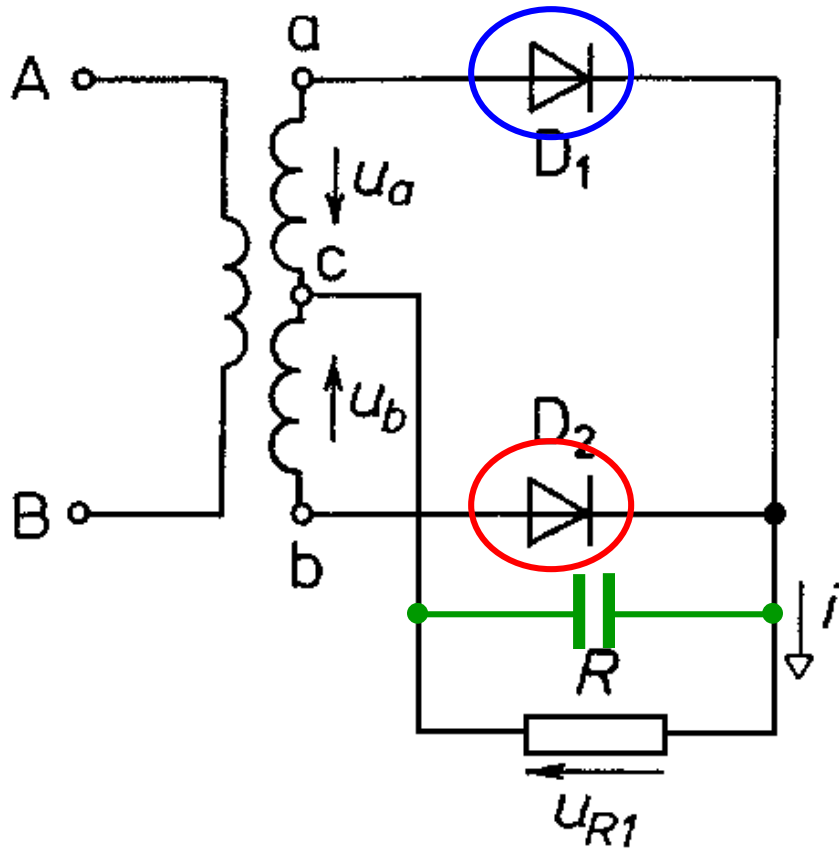


Usměrňovače



Dvoucestné

v uzlovém zapojení



- nutný transformátor s vyvedeným středem
- vhodné pro větší výkony (oproti jednopulsnímu)

<http://www.ife.tul.cz>



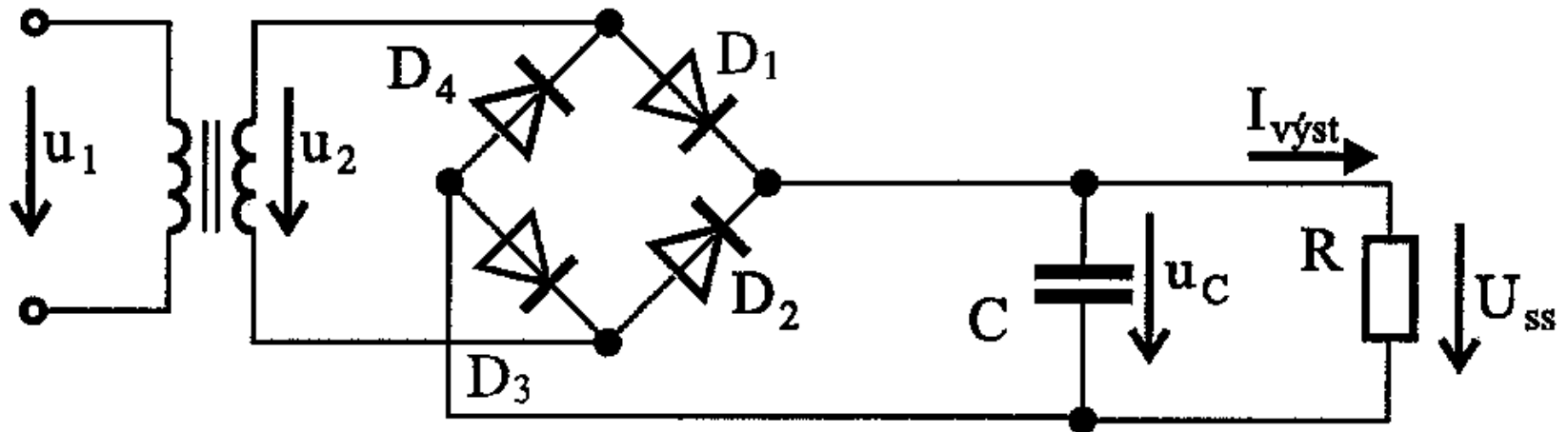


Usměňovače



Dvoucestné v můstkovém zapojení

dvojnásobný úbytek na diodách v propustném směru
na shodné zvlnění stačí poloviční C (oproti
jednocestnému)

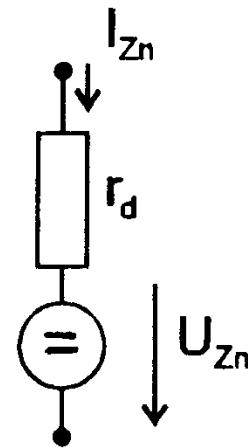
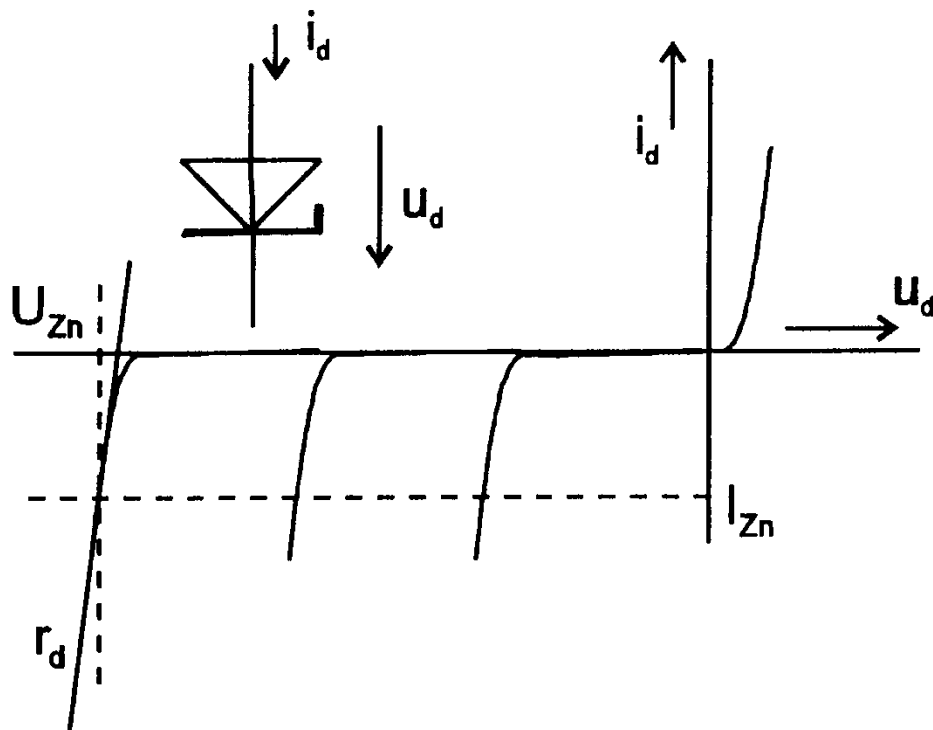
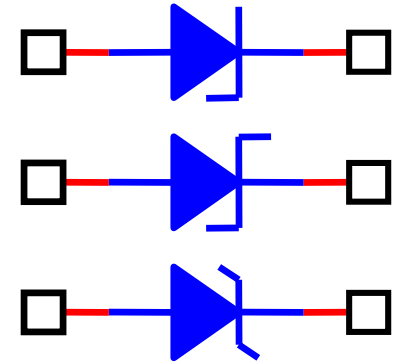




Zenerova dioda



V propustném směru standardní charakteristika Si diody





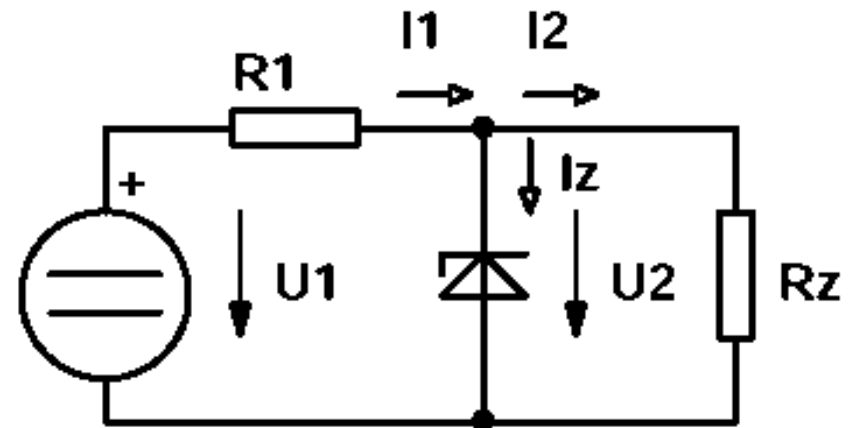
Zenerova dioda

Parametry

Zenerovo napětí	U_Z	2,7...200 V v řadě E24
Max. ztrátový výkon	P_Z	0,5...2...10 W
Teplotní součinitel napětí	$ TKV $	< 1000 ppm/K
Diferenciální odpor	r_d	1...30 Ω

Použití

- ✓ stabilizace (trvale) n. omezení (ojediněle) napětí
- ✓ posunutí ss úrovně napětí





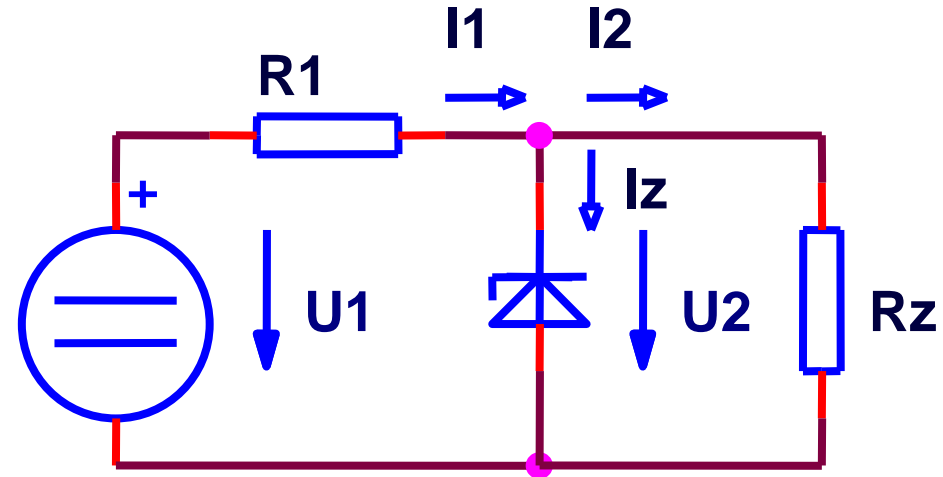
Stabilizátor napětí se ZD



Předřadný odpor R_1 :

$$R_{1\min} = \frac{U_{1\max} - U_{Zn}}{I_{Z\max} + I_{2\min}}$$

$$R_{1\max} = \frac{U_{1\min} - U_{Zn}}{I_{Z\min} + I_{2\max}}$$



Maximální příkon P_{R1} :

$$P_{R1} = \frac{(U_{1\max} - U_{Zn})^2}{R_1}$$

$$S = \left. \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} \right|_{I_2 \min}$$

Činitel stabilizace S :





Laserová dioda



- malý vyzařovací úhel
- vysoká koherence záření
- laserový efekt až od prahového proudu
- vysoká frekvence spínání

Parametry

Vlnová délka

λ [nm]

Max. optický výkon

P_o [mW]

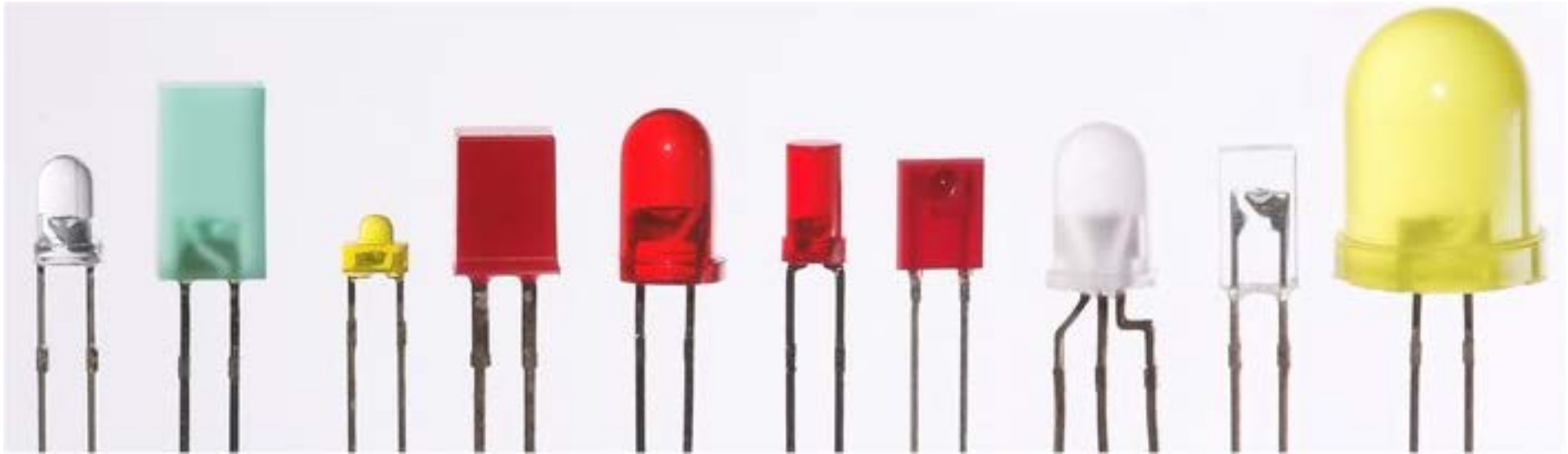
Použití

- ✓ vysílač přenosu informací světlovody příp. volným prostorem
- ✓ optická závora
- ✓ snímání/zápis informace z CD/DVD
- ✓ ukazovátko, vodováha, teodolit, zaměřovač, ...





LED-dioda



aluminium gallium arsenide (AlGaAs) – červená, IR

aluminium gallium phosphide (AlGaP) - zelená

aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) – vysoce-svítivé
oranžové, žluté

gallium arsenide phosphide (GaAsP) – červené, oranžové, žluté

gallium phosphide (GaP) – červená, žlutá a zelená

gallium nitride (GaN) – zelená, modrá

indium gallium nitride (InGaN) – ultrafialová, zelenomodrá, modrá

silicon carbide (SiC) jako substrát - modrá

křemík (Si) jako substrát - modrá

safír (Al₂O₃) jako substrát - modrá

zinc selenide (ZnSe) - modrá

diamant (C) - ultrafialová

aluminium nitride (AlN), aluminium gallium nitride (AlGaN) -

ultrafialová





Svítivá dioda (LED, elektroluminiscenční)

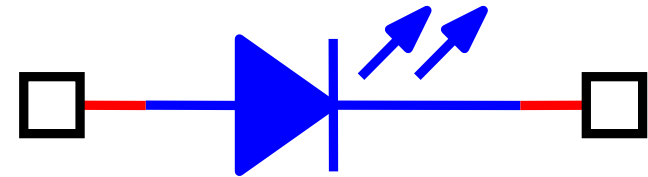


LED (Light Emitting Diode)

Úbytek napětí $U_F = 1 \dots 3 \text{ V}$, cca 1,5 V

Závěrné napětí poměrně malé $U_{RM} \sim$ i jen 5 V

Diferenciální odpor v prop. režimu nižší než u běžných diod



provedení: standardní ($I_F \sim 8 \dots 20 \text{ mA}$)

nízkopříkonové ($I_F \sim 2 \text{ mA}$)

vysocesvítivé ($I \sim 10 \text{ cd}$)

barva: červená, zelená, žlutá, oranžová, modrá,

infračervená, modrá, hnědá, bílá

velikost: $\varnothing 1,8 \dots 20 \text{ mm}$, 7-segmentové i maticové displeje,

další tvary

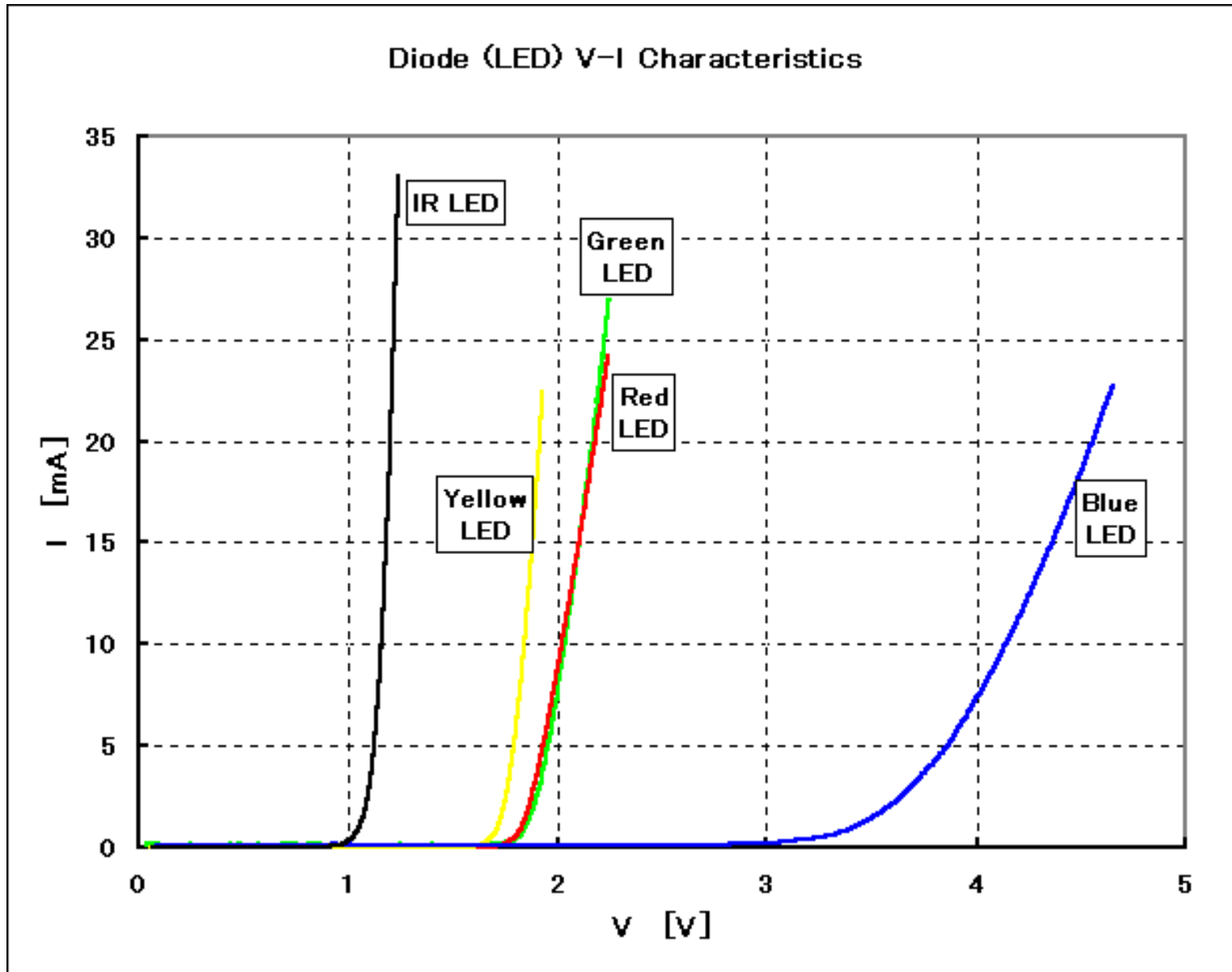
Použití

- ✓ signalizace
- ✓ světelné závory
- ✓ displeje
- ✓ osvětlení varovné i přímé





LED



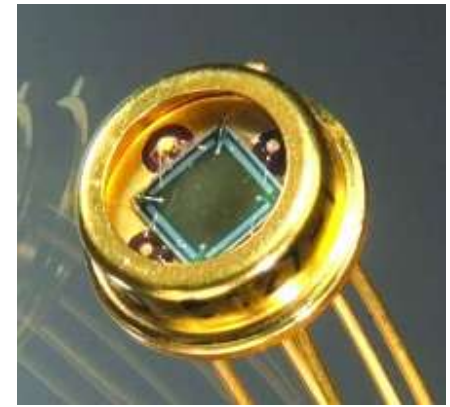


<http://>





Fotodioda



Parametry

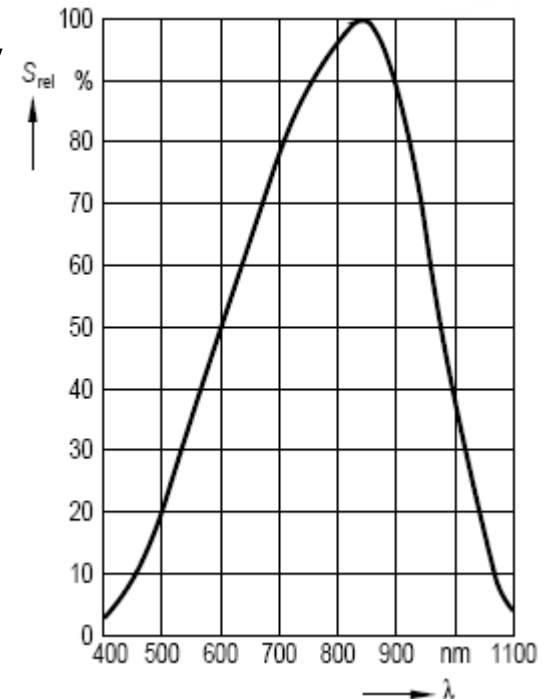
Citlivost S [$\mu\text{A/lx}$]

Poměrná spektrální citlivost $S_{\lambda r}$ [1]



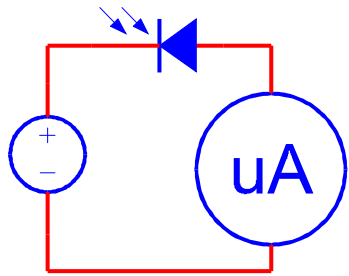
Použití

- ✓ přijímač optického přenosu informací světlovody
- ✓ snímání informace z CD/DVD
- ✓ přijímač optozávor
- ✓ snímač osvětlení, snímač IR záření (pyrometry)

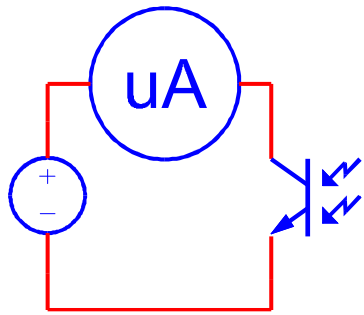




Fotodioda



V **pasivním** (parametrickém) režimu se mění závěrný proud fotodiody nebo propustný proud fototranzistorem



V **aktivním** (generátorickém) režimu přeměňuje fotodioda světelnou energii na elektrickou o napětí typicky 0,45 V (Si).

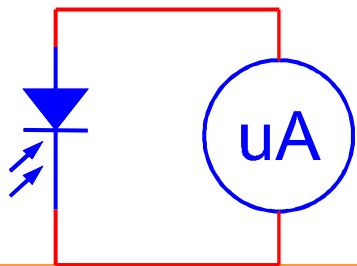
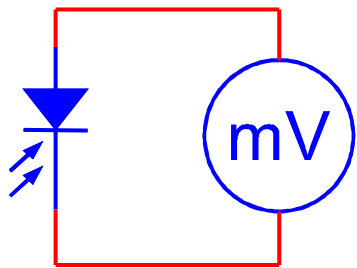
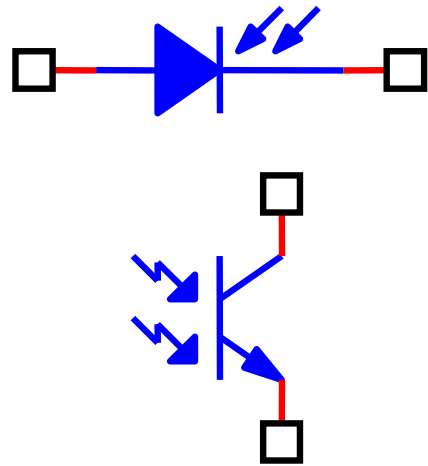




Foto prvky

fotodioda / fototranzistor



- využití závislosti proudu nebo napětí na osvětlení E [lx , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] P-N přechodu
- Uplatnění jako přijímače světla: LED a laserové diody jsou vysílači světla.
- Měření osvětlení (luxmetry, expozimetry) a snímání infračerveného záření při bezdotykovém měření teploty (pyrometry).





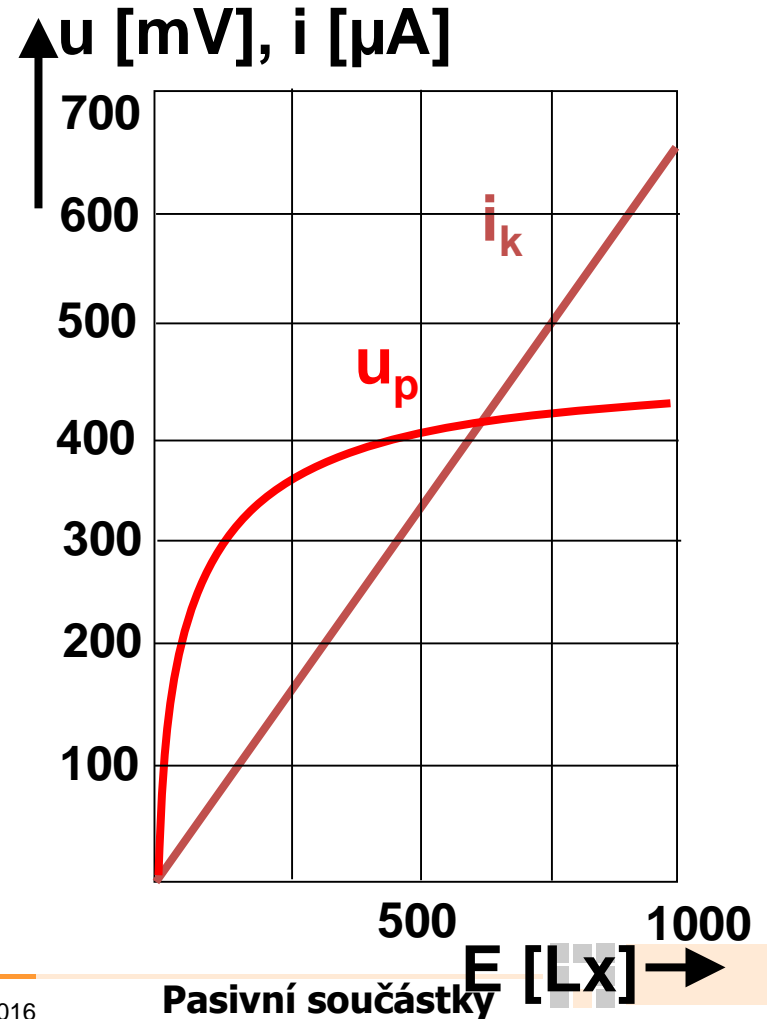
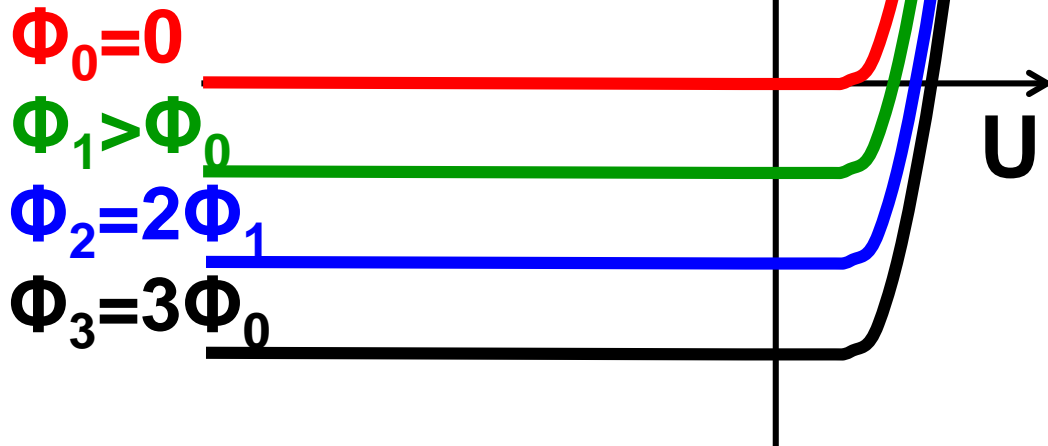
Fotodioda



fotodioda; fototranzistor

- využívá závislosti proudu a napětí na osvětlení E u PN přechodu
- **fototranzistor** vnitřně zesiluje fotoelektrický proud osvětlené báze (elektroda)

Závislost proudu a napětí na osvětlení E [lx]

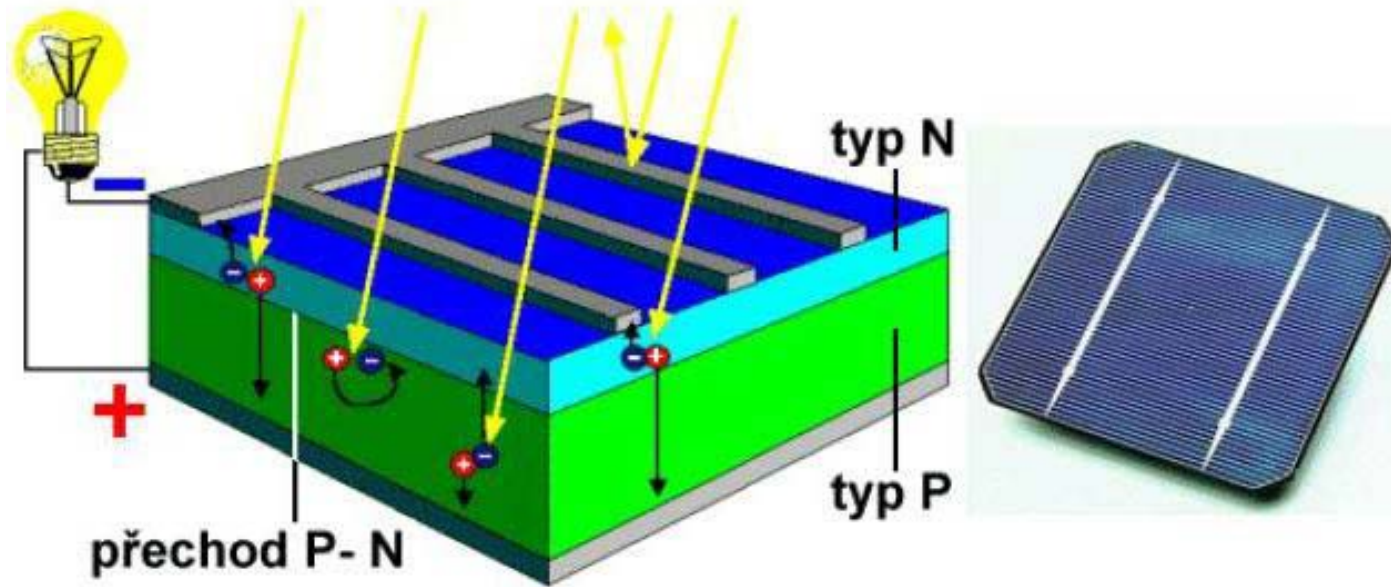




Fotodioda

Fotovoltaický panel

- základem fotovoltaických elektráren



<https://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku>



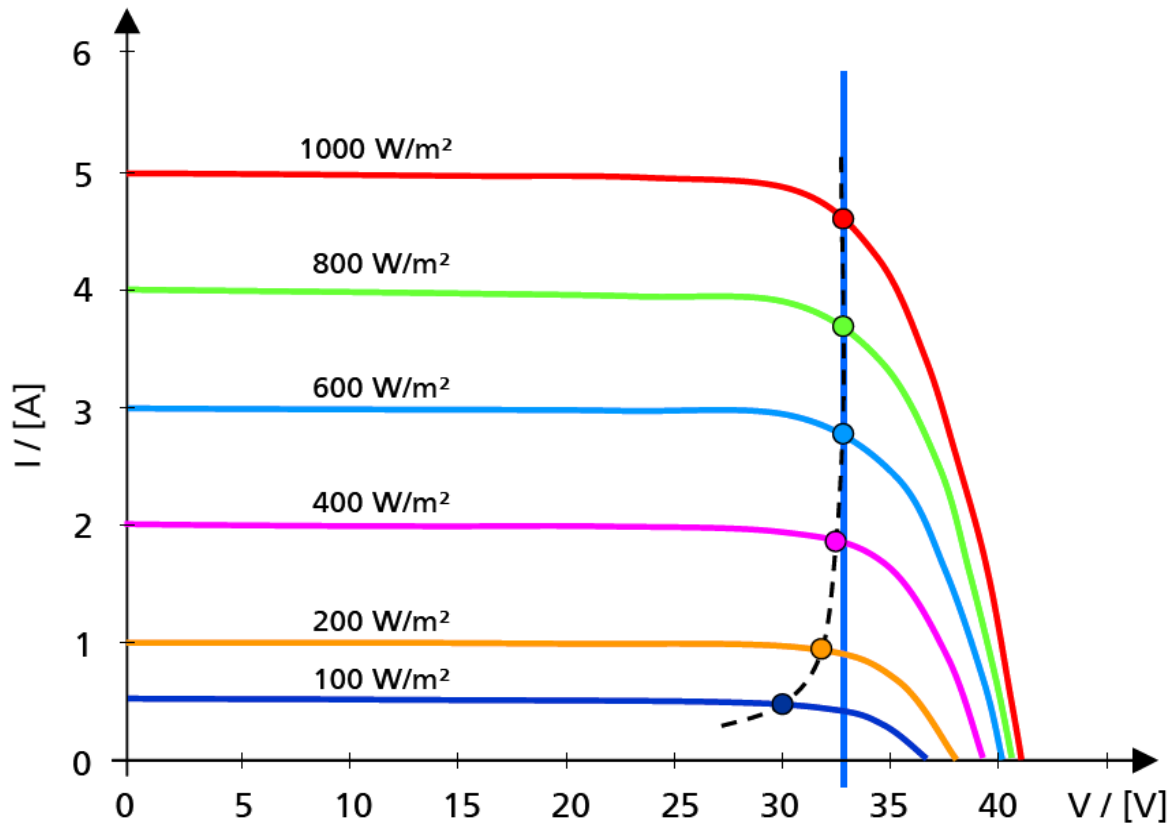


Fotovoltaický panel



Voltampérová charakteristika panelu při různém osvětlení (VA charakteristika diody - více diod za sebou - třetí kvadrant)

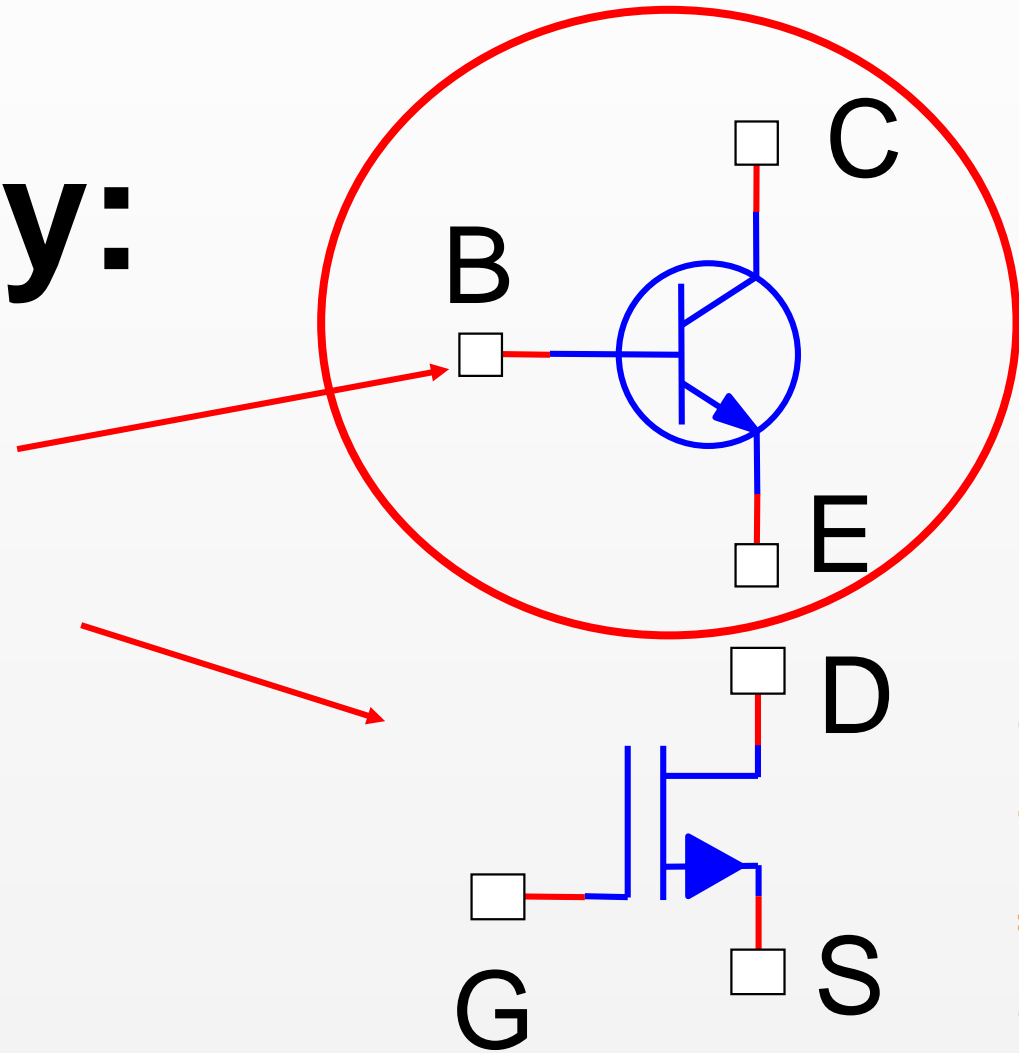
- body ukazují maximální výkon (součin U a I) pro daný osvit
- je patrná hodnota napětí ($I=0A$) na prázdko a zkratového proudu ($U=0V$)





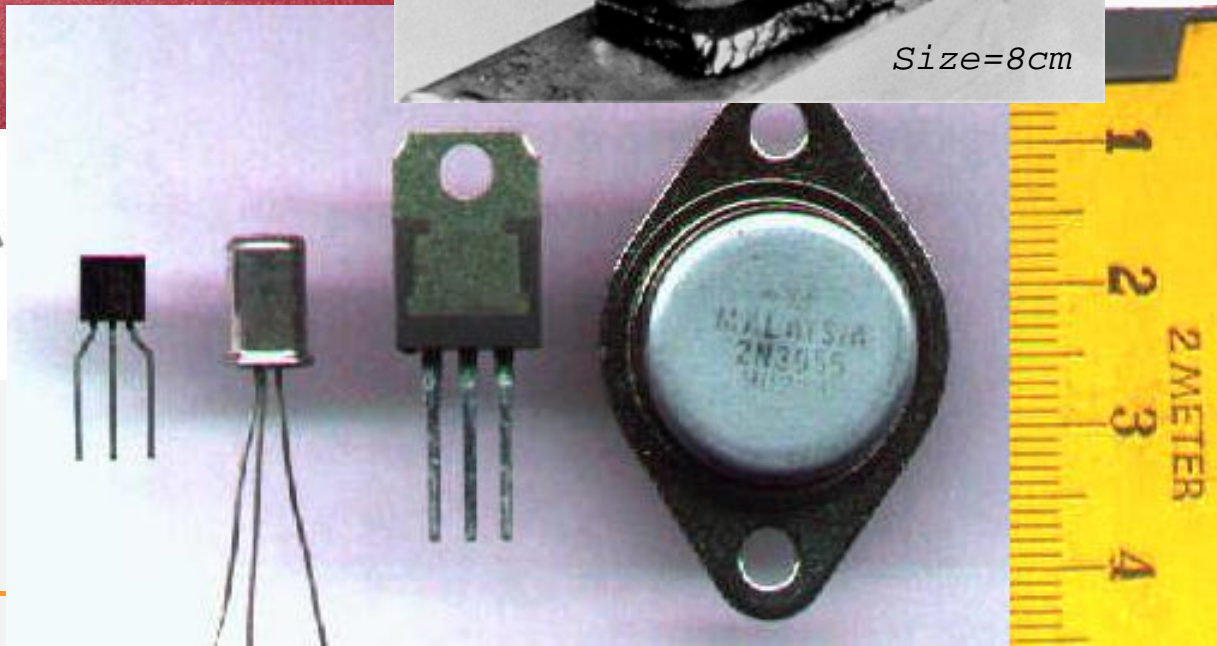
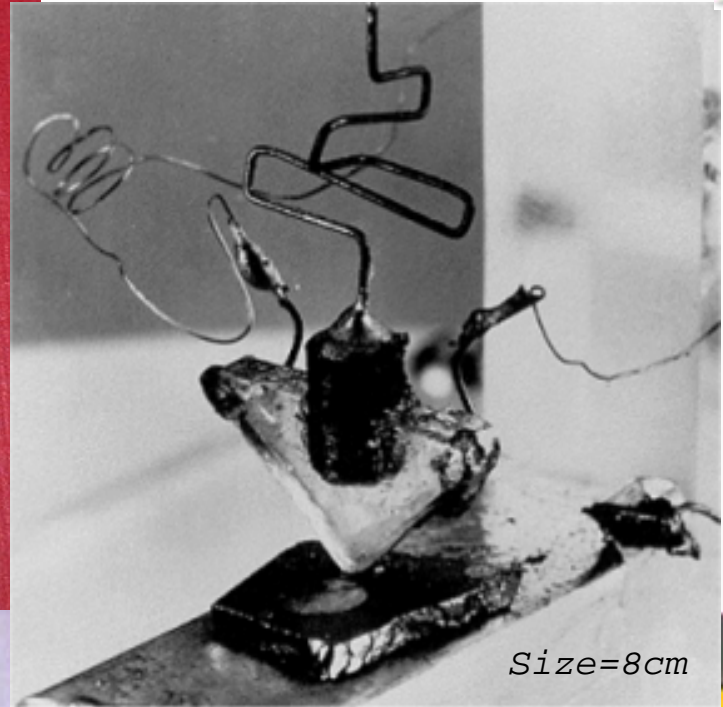
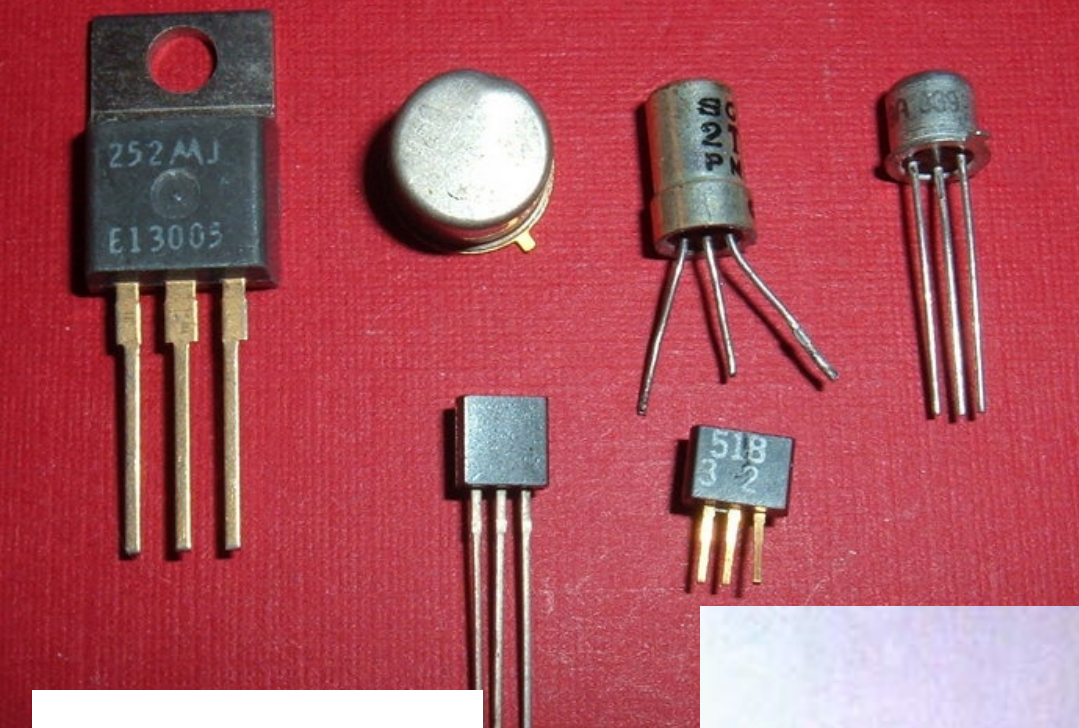
Tranzistory:

- Bipolární
- Unipolární





Typy tranzistorů





Tranzistory



Klasifikace tranzistorů:

- Vysokofrekvenční
- Výkonové
- Spínací
- Nízkofrekvenční nízkošumové

Použití tranzistorů:

- Spínače (Darlingtonovo zapojení)
- Stabilizátory napětí, proudu
- Zesilovače





Bipolární tranzistor

BJT – Bipolar Junction Transistor

2 těsně uspořádané **P-N přechody** s tenkou společnou elektrodou (bází), dochází v nich k tranzistorovému jevu.

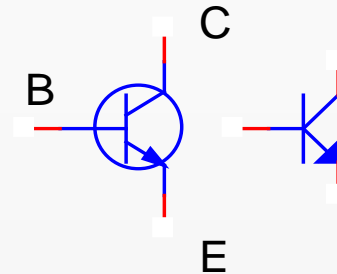
3 elektrody :

B ... **báze**

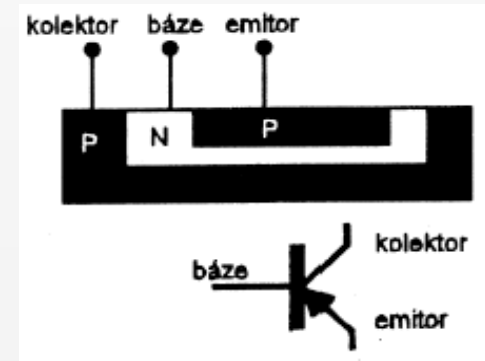
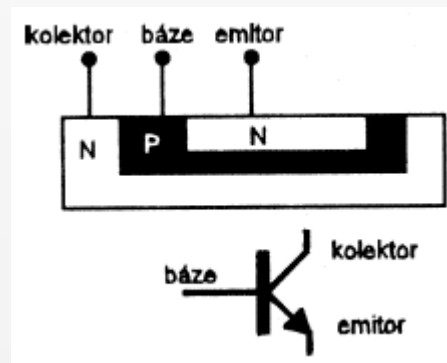
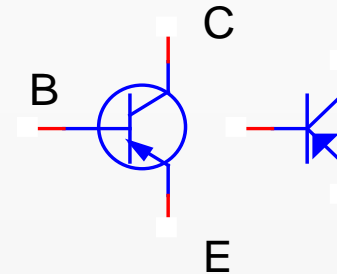
E ... **emitor**

C ... **kolektor**

NPN



PNP



**Zdroj proudu
řízený proudem**





Tranzistory



Tranzistory (zkrácením TRANSfer resISTOR) jsou **aktivní** elektronické součástky zpravidla se **třemi elektrodami**.
Vynalezen v r. 1947.

Aktivní součástka = *zesiluje výkon, je řízeným zdrojem*, tedy malým výkonem na vstupu ovládá (řídí) větší výkon na výstupu z příkonu, dodávaného pomocným napájecím zdrojem.

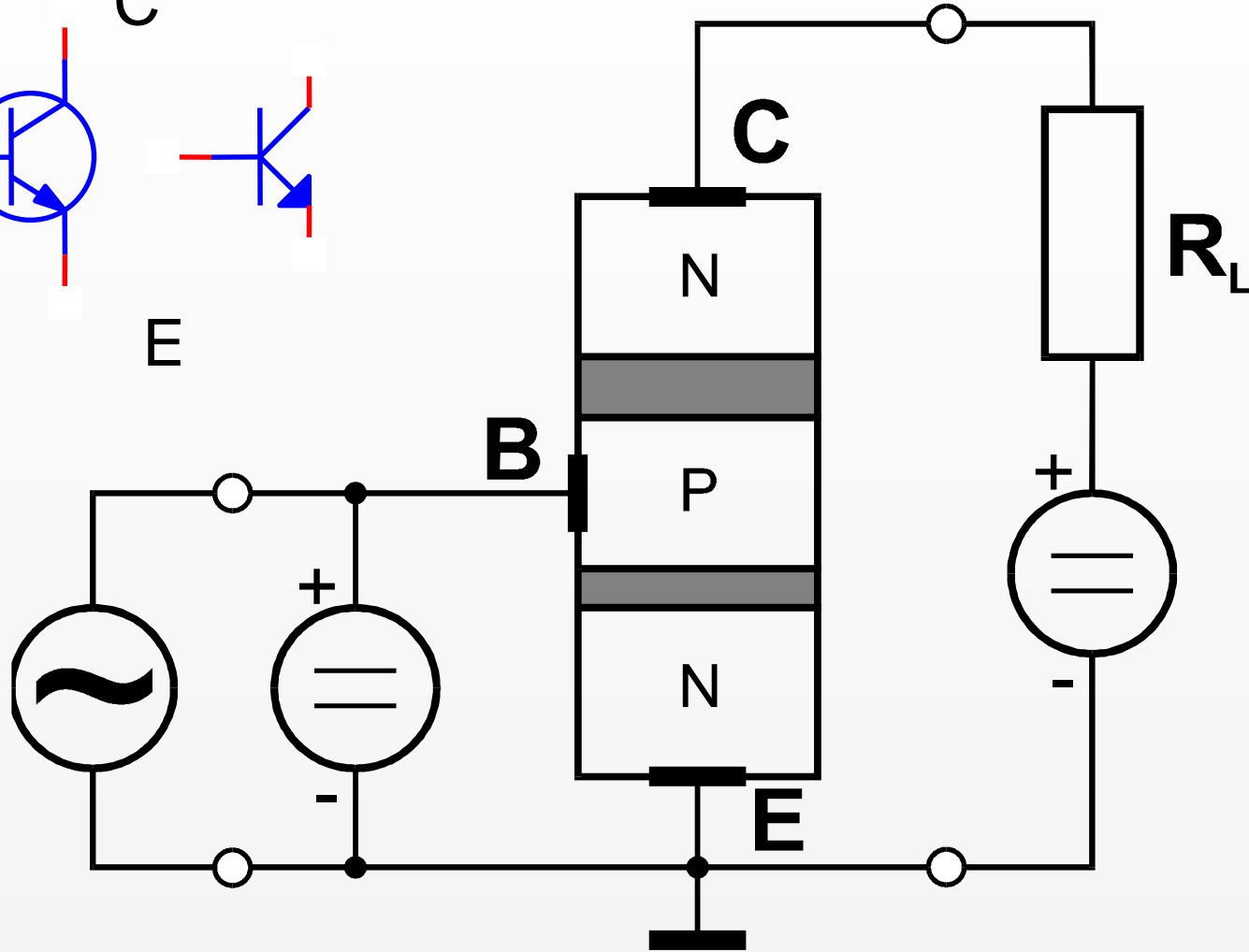
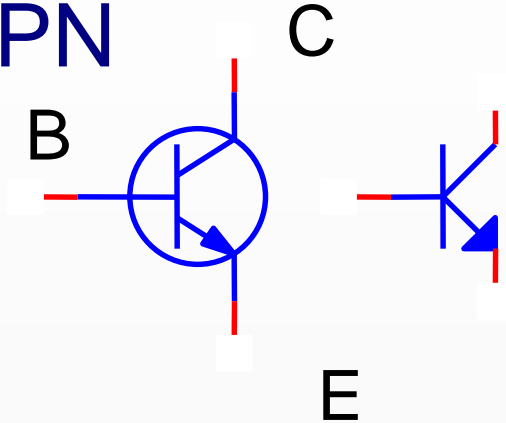
Zesílení spojitého signálu (zesilovače, oscilátory, ...)
nebo

Dvoustavové ovládání VYPNUTO (nevede proud) × ZAPNUTO (vede proud) v řídicí/regulační technice (spínače) a v číslicové technice (logické obvody, klopné obvody).



Tranzistory NPN

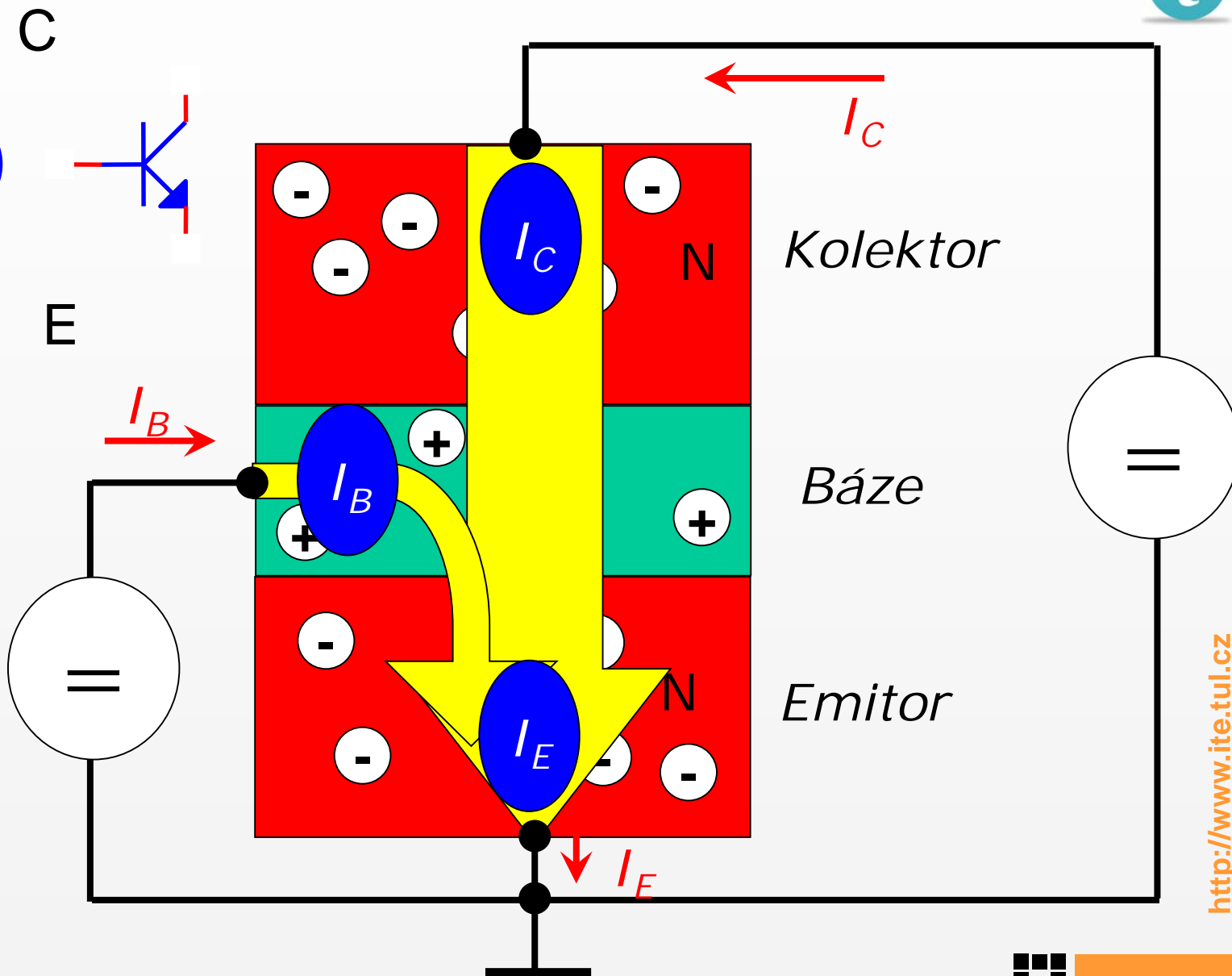
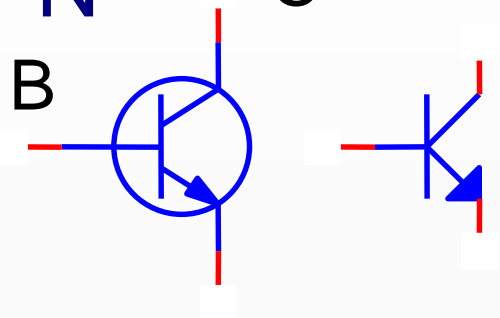
NPN





Tranzistory NPN

NPN



<http://www.ite.tul.cz>

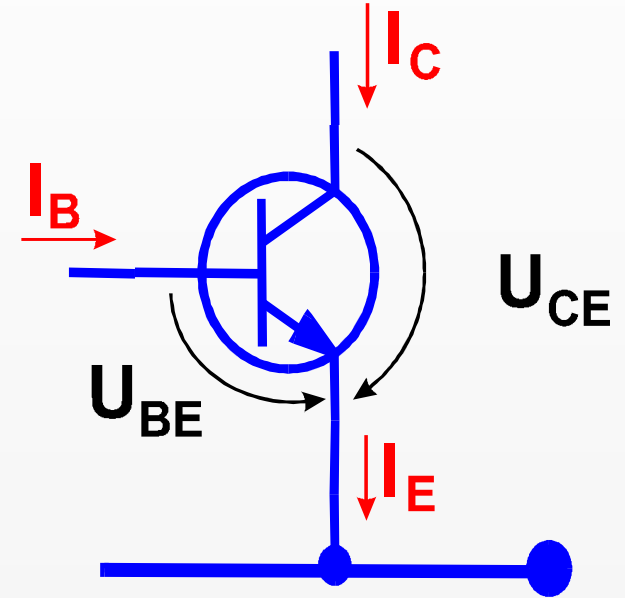


Tranzistorový obvod

$$I_E = I_C + I_B$$

Proudový zesilovací činitel (SE) β

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$





Typy zapojení

Zapojení jako dvojbran - jedna elektroda společná

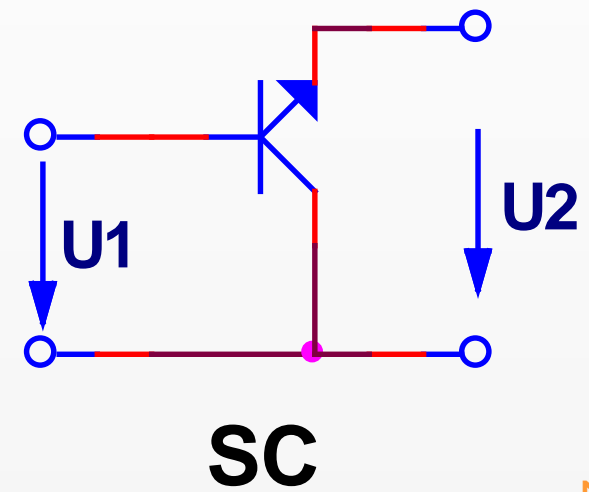
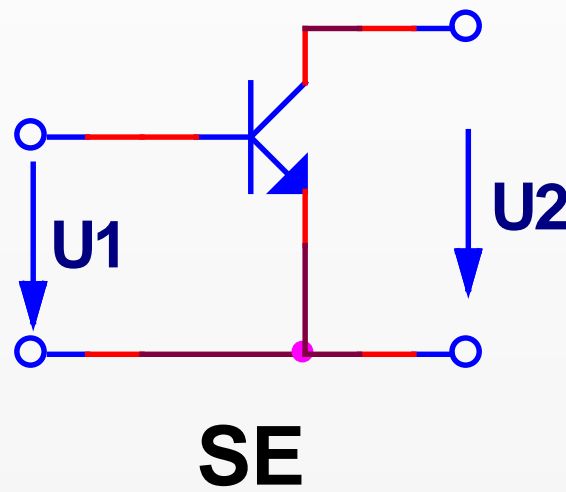
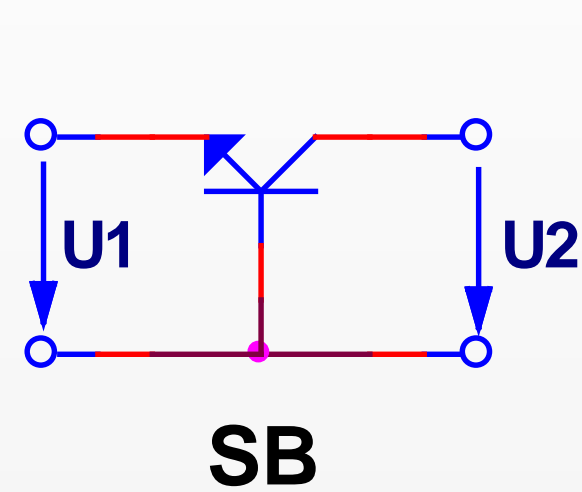
pro všechny zapojení platí: $I_E = I_C + I_B$

- **se společnou bází (SB)**
 - ss. proud. zesilovací činitel $\alpha = I_C / I_E = \beta / (1 + \beta) (< 1)$
 - velké napěťové zesílení
- **se společným emitorem (SE)**
 - ss. proudový zesilovací činitel $\beta = I_C / I_B = \alpha / (1 - \alpha)$
- **se společným kolektorem (SC)**
 - velké proudové zesílení (velká vstupní a malá výstupní impedance)
 - napěťové zesílení < 1





Zapojení tranzistorů



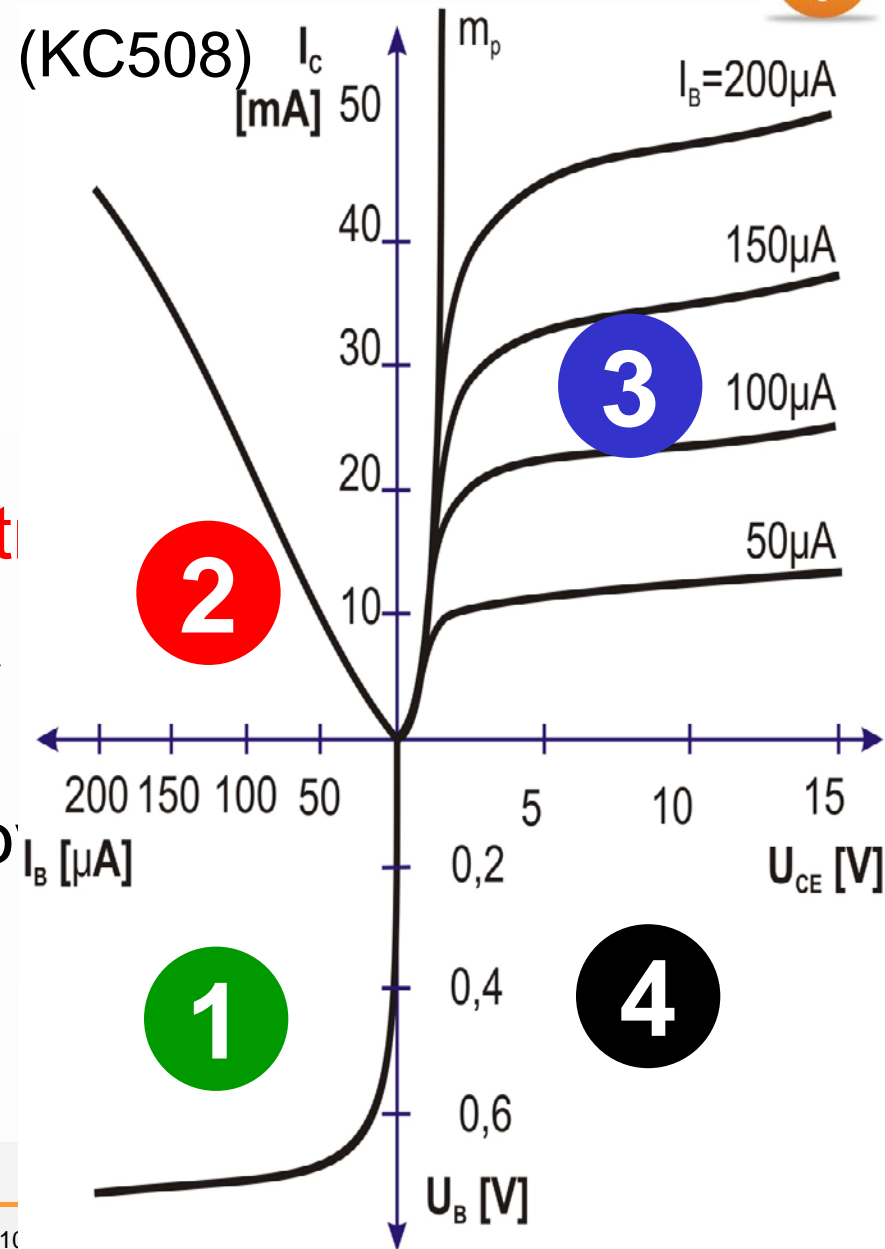


Sdružená charakteristika



Převážně v zapojení SE

1. **Vstupní charakteristika**
(parametr U_{CE})
2. **Převodní proudová charakteristika** (parametr I_B)
3. **Výstupní charakteristika**
(parametr I_B)
4. **Zpětná převodní napětí**
(parametr I_B)





Charakteristiky

Omezení výstupních charakteristik tranzistoru

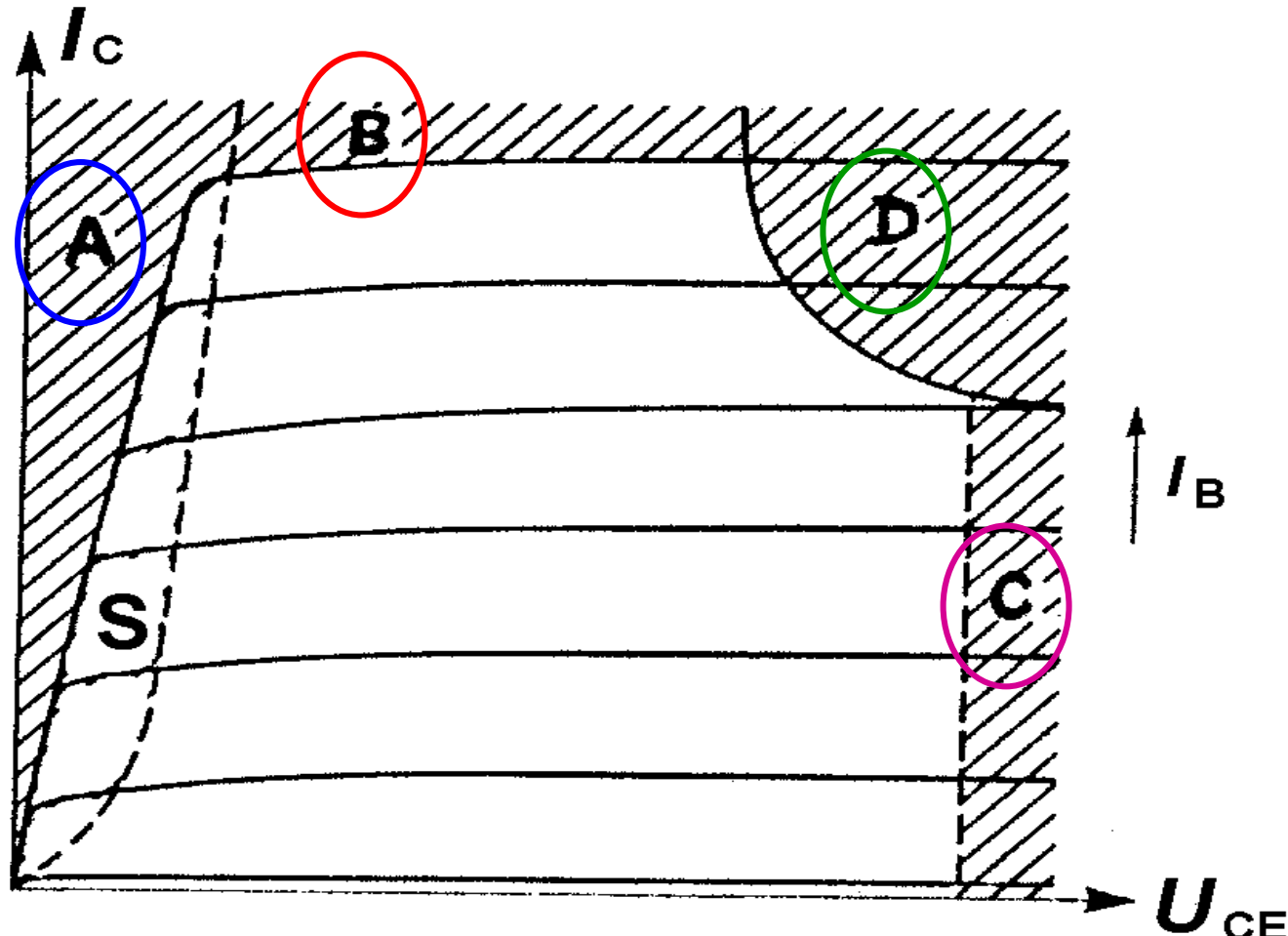
Nedovolené nebo nedosažitelné oblasti

A ~ napětím U_{CES}

B ~ hodnotou I_{CM}

C ~ hodnotou U_{CEM}
(obv. U_{CE0})

D ~ hyperbolou P_{CM}
(z P_{tot}).



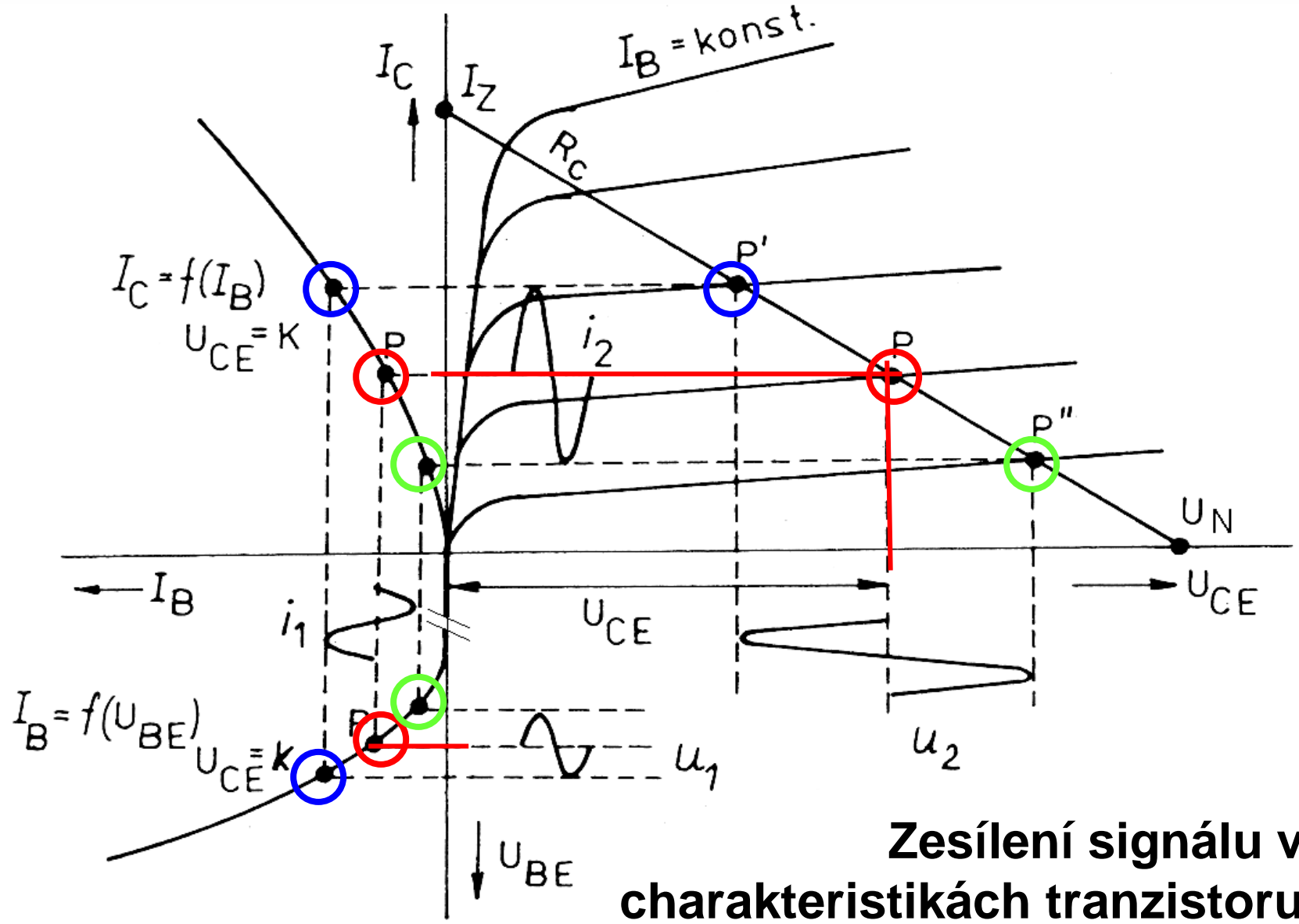
Režim **saturace** (nasycení) :

mez („počátek“): $U_{CB} = 0$, resp. $U_{CE} = U_{BE}$

úplná saturace: mezní přímka „mp“



Tranzistorový zesilovač



Zesílení signálu v charakteristikách tranzistoru



Parametry bipolárních tranzistorů

S růstem I_C (nebo ok. teploty) vzroste teplota přechodů \rightarrow změna $U_{BE}(\downarrow)$, $I_{CE0}(\uparrow)$ a $\beta(\uparrow)$; někdy je nutno stabilizovat termistorem

Parametry tranzistorů

- Proud kolektoru $I_C - >0,1 \text{ A}$
- Napětí C-E (odpojena báze) $U_{CE0} - 60 \text{ V}$
- Výkonová ztráta $P_{\text{tot}} - \sim 100 \text{ W}$
- Proudový zesilovací činitel $\beta - 300$
- Zbytkový proud C-E $- 0,1 \text{ A}$
- Saturační napětí $U_{CES} - 0,3 \text{ V}$
- Doba zapnutí/vypnutí $t_{\text{on}}/t_{\text{off}} - 10^2\text{-}10^3 \text{ ns}$
- Tranzitní kmitočet $f_T - 100 \text{ MHz}$

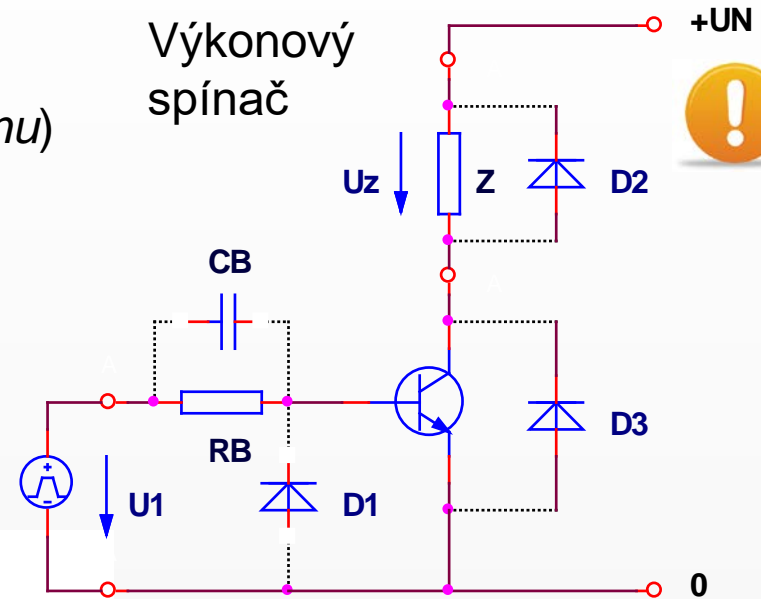
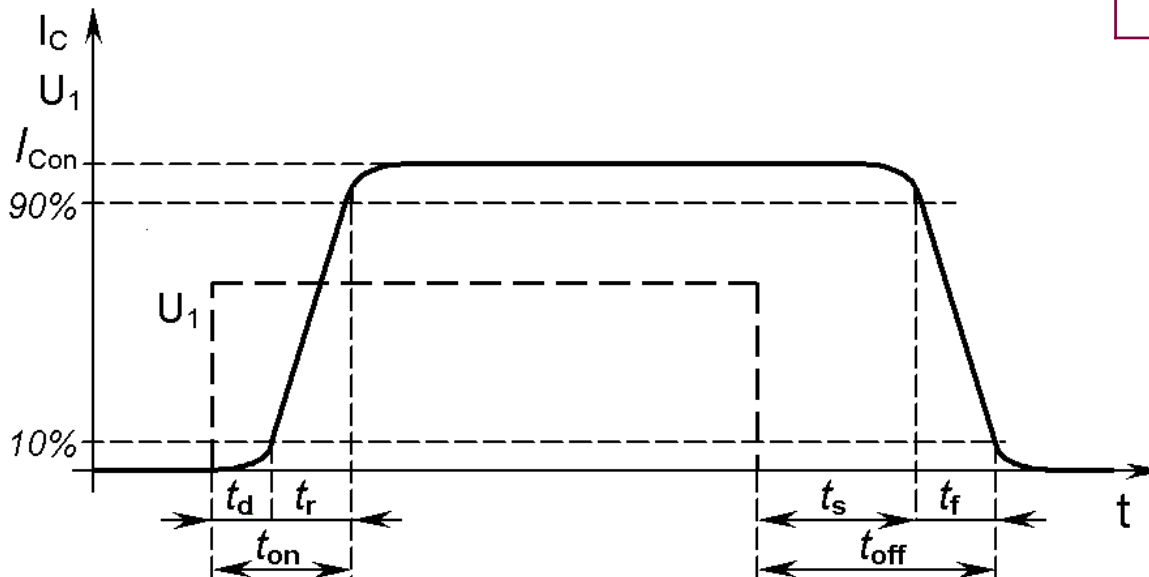


Tranzistor ve spínacím režimu

Elektronické spínače s tranzistory :

- připojování zátěže (t.j. regulace, *spínání výkonu*)
- přepínání signálu
- převodník napět'ových úrovní
- aktivní prvek logických obvodů

Spínací časy: *delay, rise, setup, fall*



Činitel nasycení $k_s \sim 2 \dots 5$
pro výpočet vstupního proudu (v saturaci klesá β)

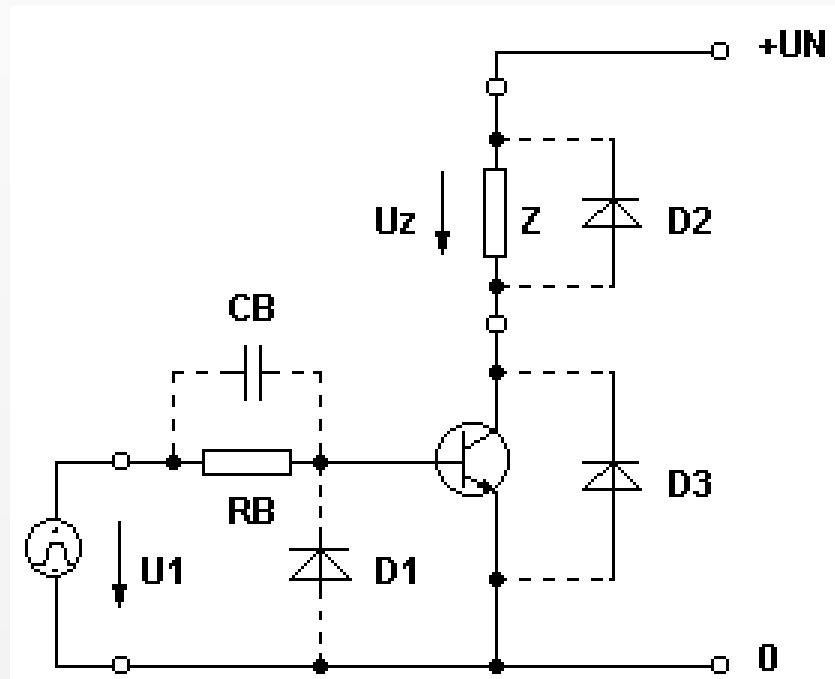
Pomocné vstupní obvody pro rychlé odvedení náboje báze

Pomocné výstupní obvody pro spínání indukční zátěže



Tranzistorové spínače

- Nejčastěji skokové připojování zátěže
- Používá se zapojení SE, výjimečně SC
- V uzavřeném stavu teče tranzistorem I_{CE0}
- V otevřeném stavu je na tranzistoru U_{CES} ,
- Sepnutí / vypnutí proběhne
velice rychle
(oproti relé či stykači)
- Činitel nasycení $k_s \sim 2 \dots 5$



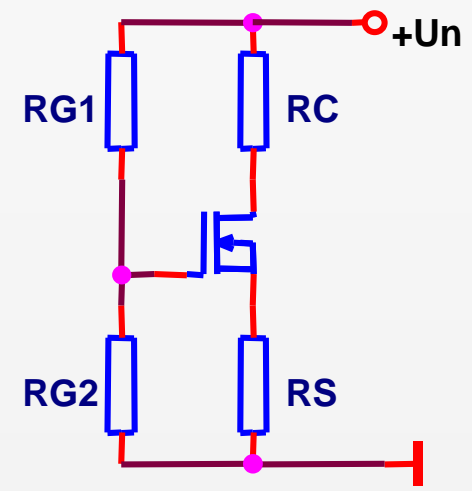
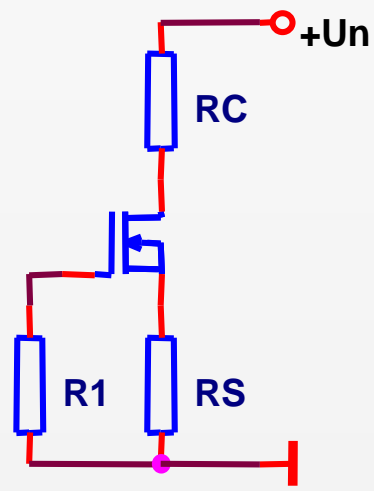
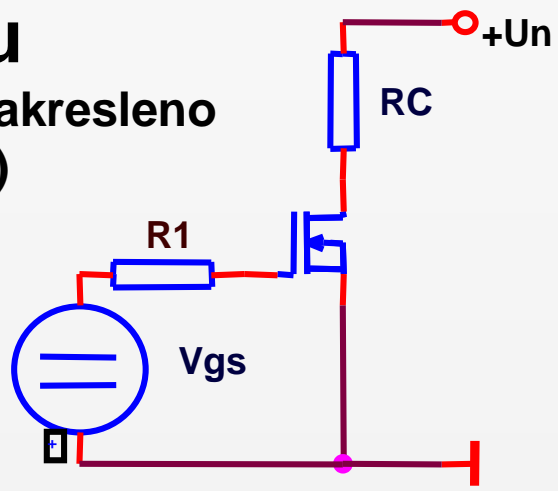
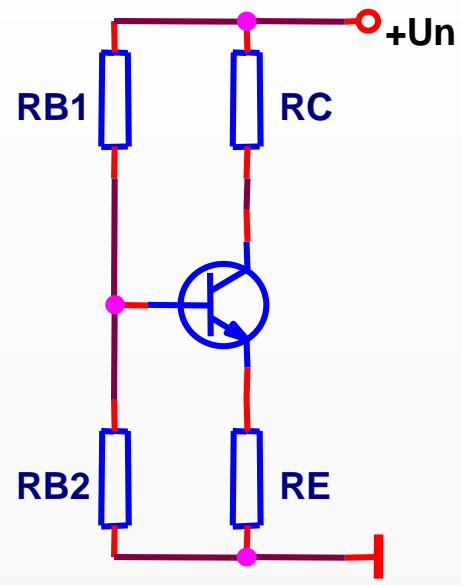
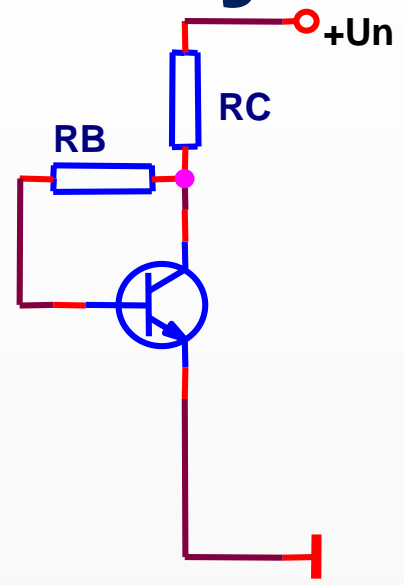
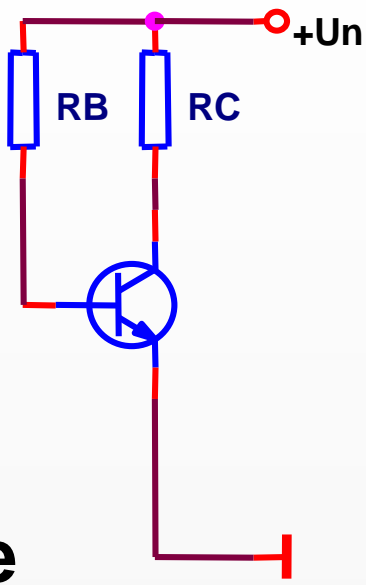


Tranzistorový zesilovač



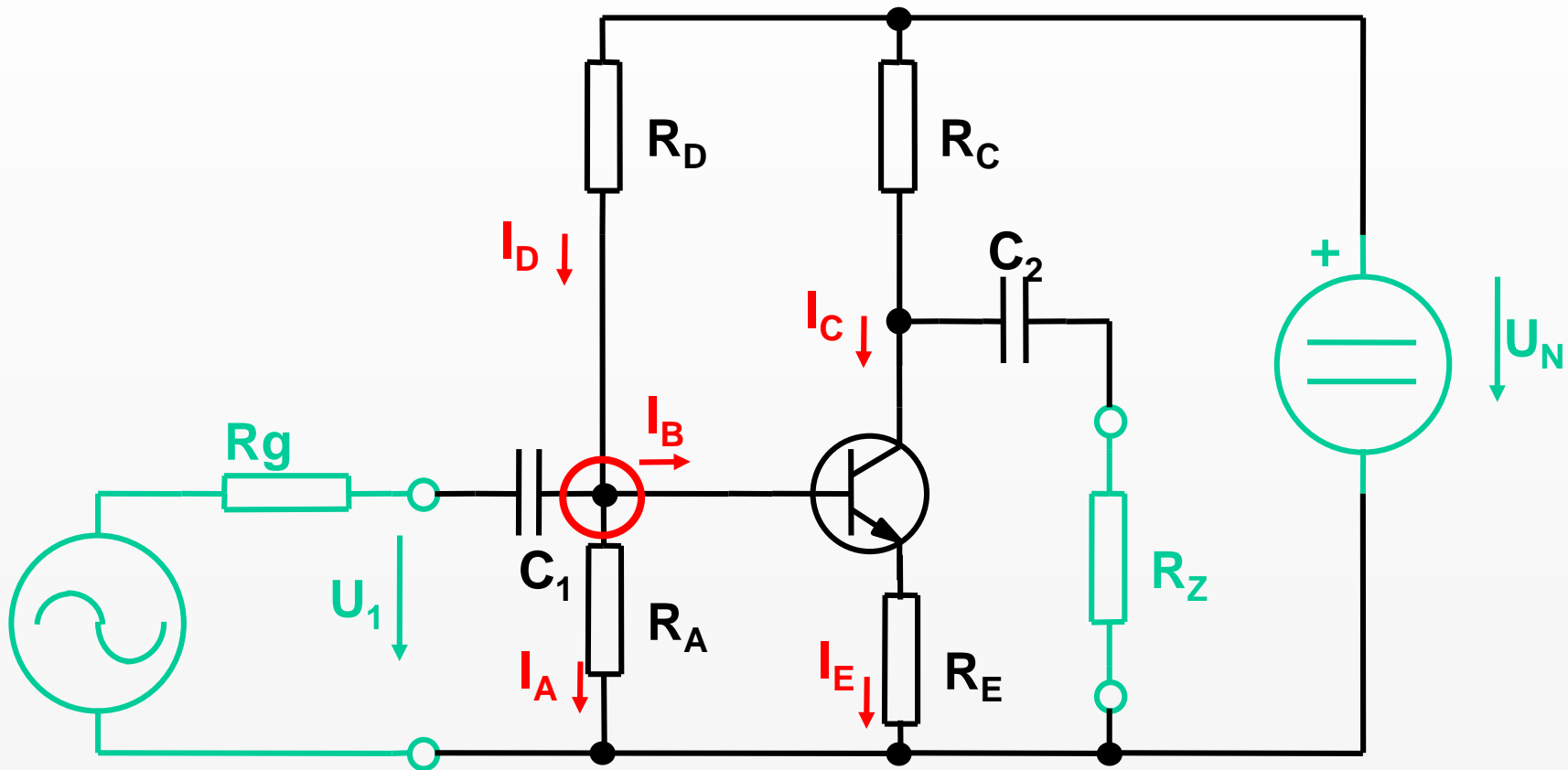
Možnosti stabilizace pracovního bodu

(není zakresleno buzení)





Tranzistorový zesilovač



$$I_E = I_B + I_C$$

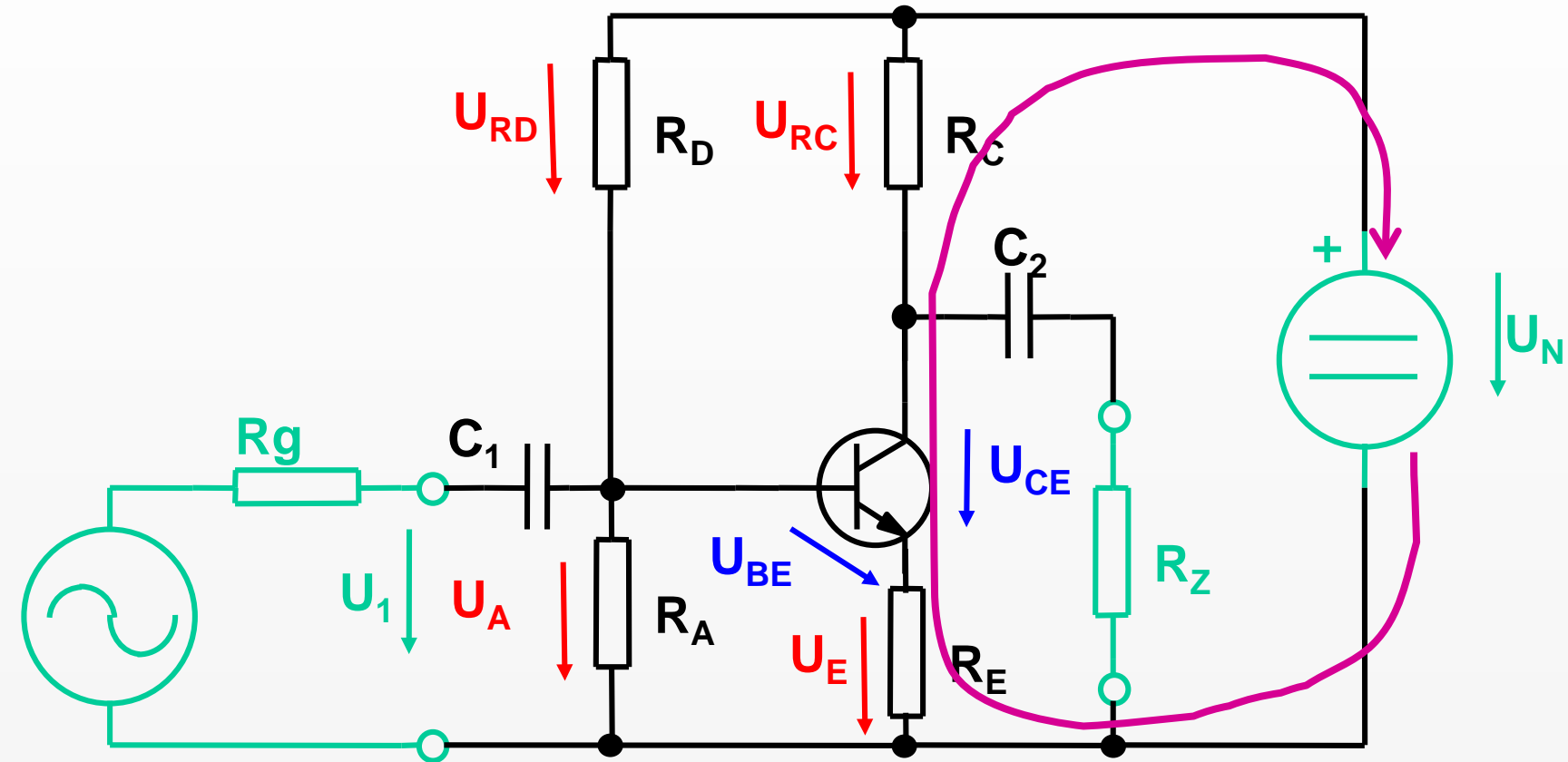
$$I_D - I_B - I_A = 0$$

$$(I_D = I_B + I_A)$$





Tranzistorový zesilovač

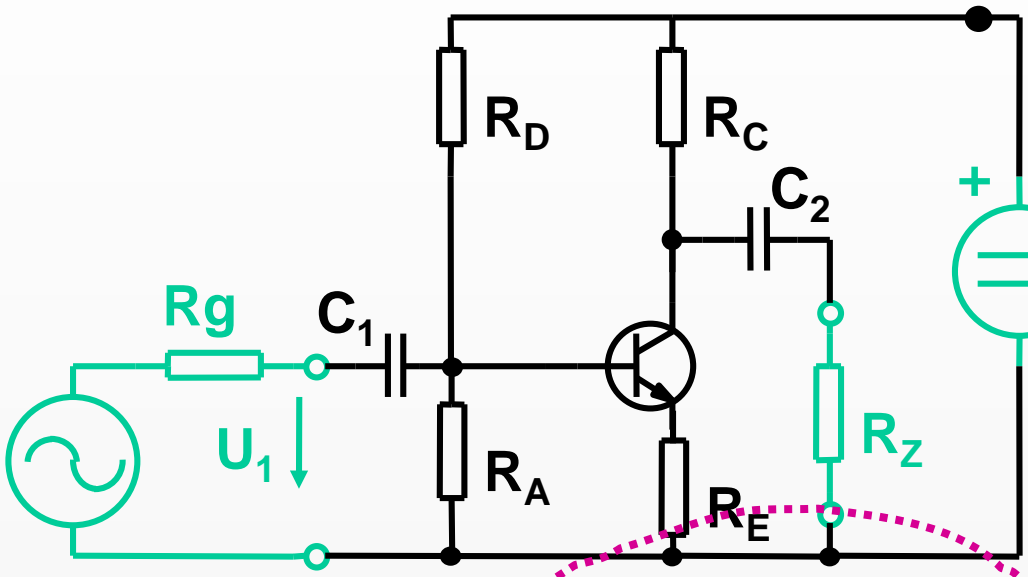


$$U_N - U_E - U_{CE} - U_{RC} = 0 \quad (U_N = U_{RC} + U_{CE} + U_E)$$





Tranzistorový zesilovač



$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_D = I_B + I_A$$

$$U_{RC} = I_C * R_C$$

$$U_N = U_{RC} + U_{CE} + U_E$$

$$U_N = U_{RD} + U_{BE} + U_E$$

$$U_N = U_{RD} + U_A$$

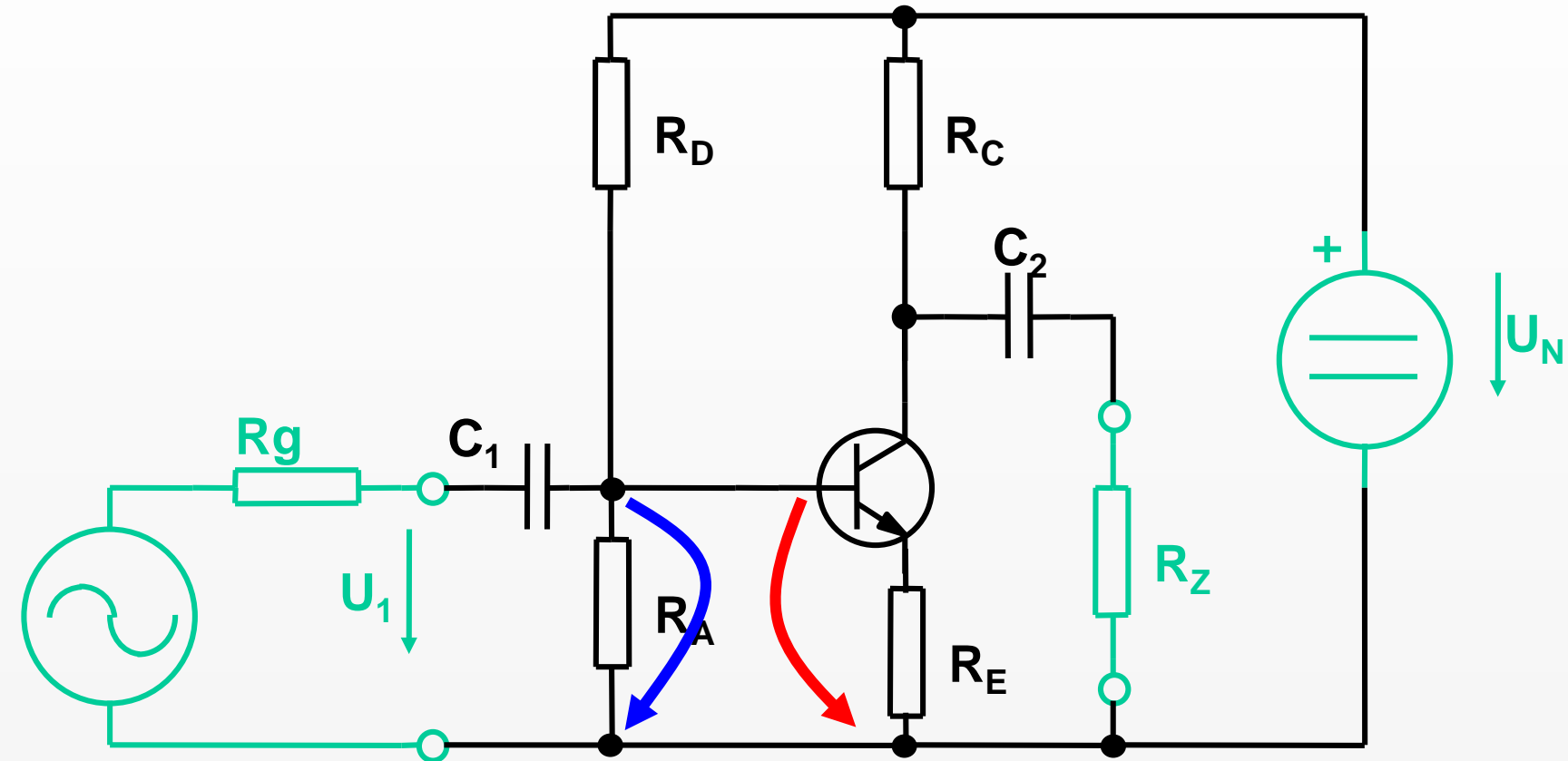
$$U_A = U_E + U_{BE}$$

atd...





Tranzistorový zesilovač



$$U_{RA} \equiv U_B (= U_{BE} + U_E)$$





Parametry zesilovačů

Provozní parametry linearizovaných bloků (dvojbranů) :

napět'ové zesílení (přenos)

$$A_u = U_2 / U_1$$

proudové zesílení (přenos)

$$A_i = I_2 / I_1$$

výkonové zesílení (přenos)

$$A_p = P_2 / P_1$$

vstupní impedance

$$Z_1 = U_1 / I_1$$

výstupní impedance

$$Z_2 = U_2 / I_2$$

Zesílení obv. v logaritmické míře :

zisk, příp. **útlum** (= záporný zisk s kladným znaménkem) v **decibelech (dB)**

$$A_p = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad A_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad A_i = 20 \log \frac{I_2}{I_1}$$

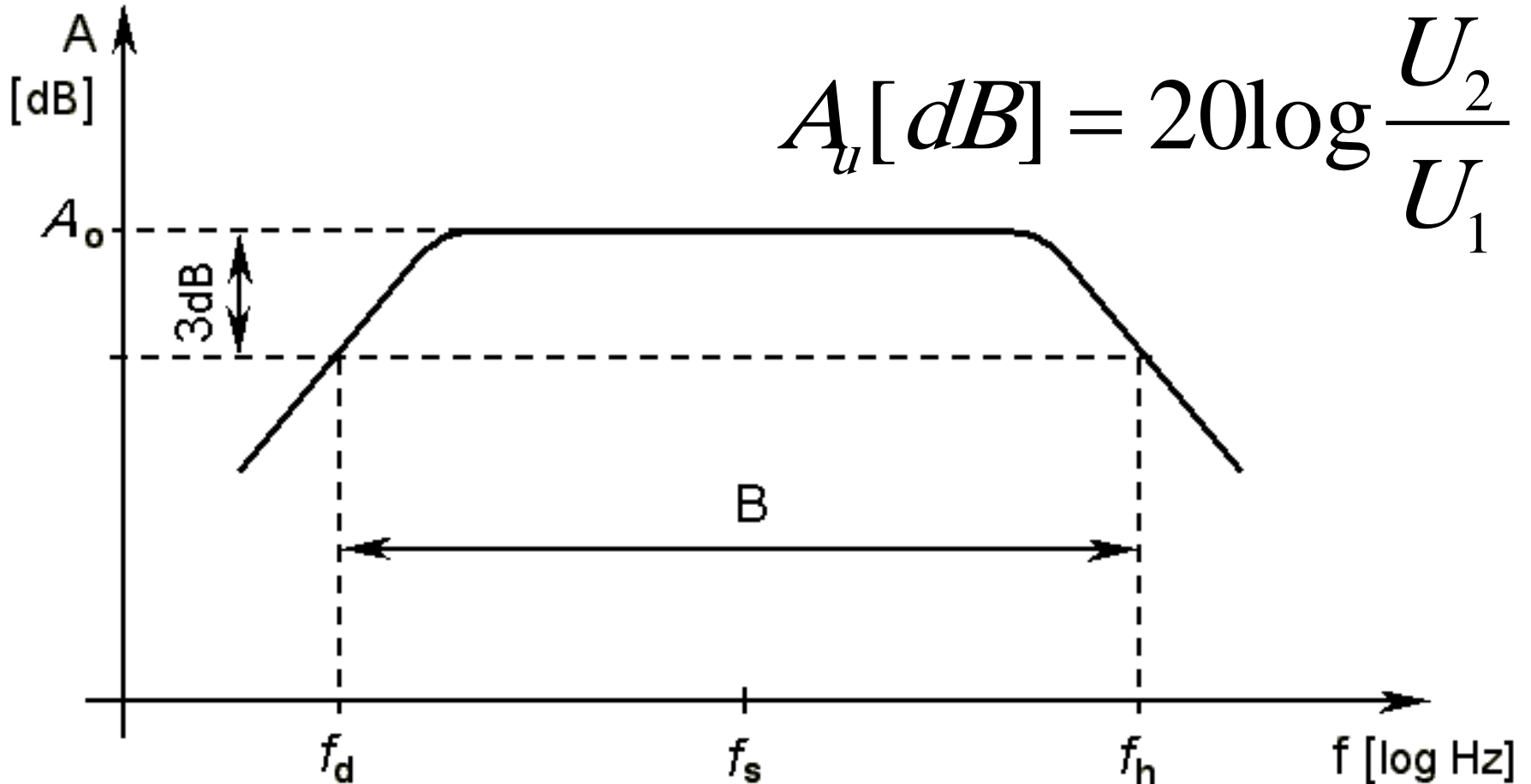
úroveň :

0 dBm $\Leftrightarrow P = 1$ mW, na standardním odporu $U = \sqrt{PR}$
v elektroakustice $600 \Omega \equiv 775$ mV





Tranzistorový zesilovač



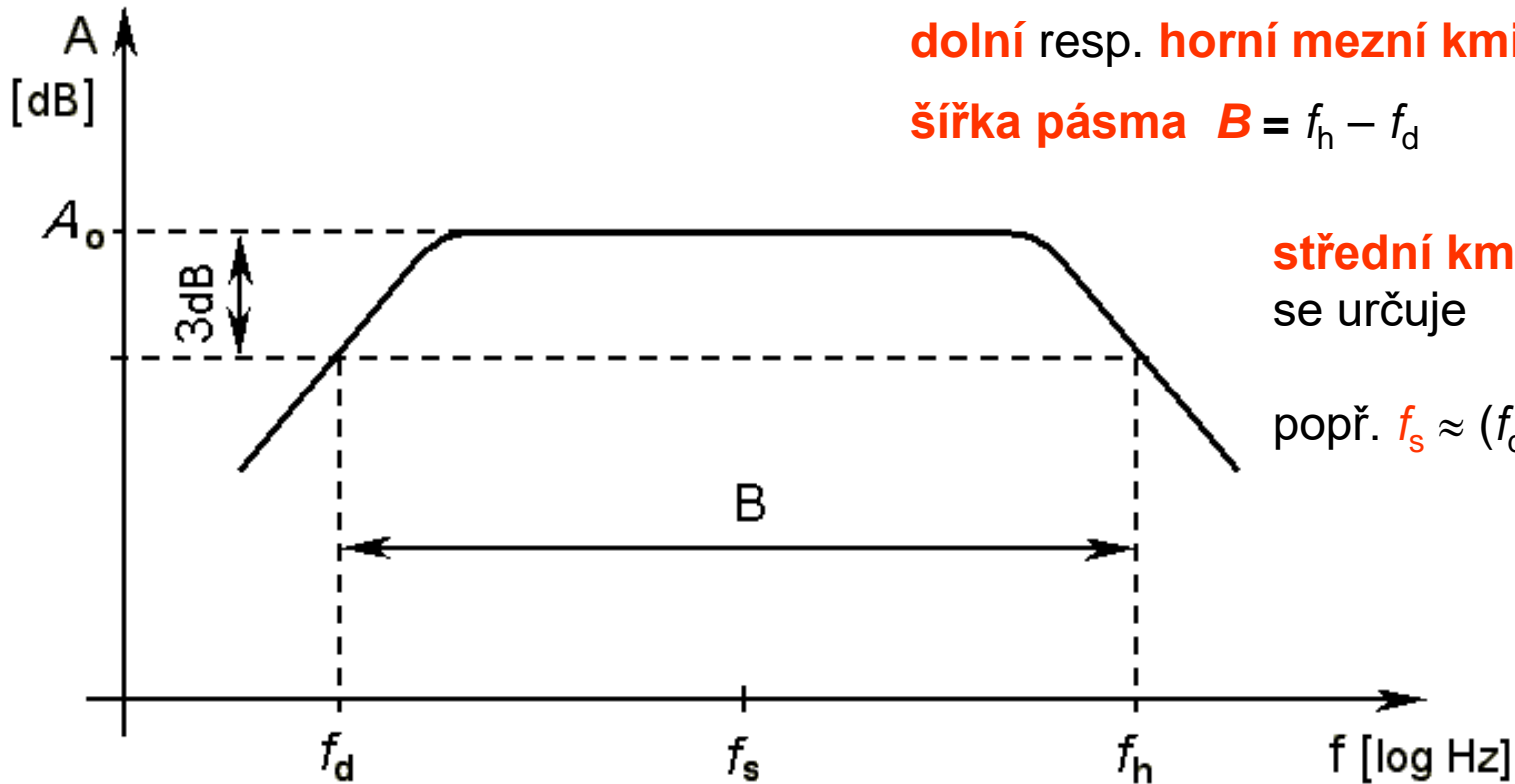
Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače





Tranzistorový zesilovač

(amplitudová / fázová) frekvenční charakteristika



dolní resp. horní mezní kmitočety f_d a f_h

šířka pásma $B = f_h - f_d$

střední kmitočty pásma

se určuje $f_s = \sqrt{f_d f_h}$

popř. $f_s \approx (f_d + f_h)/2$

Ovlivněno především
derivačními a integračními RC články,
resp. mezním kmitočtem aktivních prvků.

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\tau = RC$$





Rozdělení zesilovačů



- **Podle OBVODOVÉ VELIČINY:**
Zesilovače *napětí* (režim naprázdno), *proudu* (režim nakrátko) nebo *výkonu* (jmenovitá zátěž)
- **Podle ROZKMITU SIGNÁLU:**
Předzesilovače – linearizovatelné zes. malých signálů : zesílení \uparrow , šum \downarrow , brum \downarrow , THD $\downarrow\downarrow$
Výkonové zesilovače využívají celou charakteristiku aktivního prvku, $\eta \uparrow$, $Z_2 \downarrow$, THD \downarrow

THD – činitel zkreslení
 η - účinnost





Rozdělení zesilovačů



- **Podle KMITOČTOVÉHO PÁSMÁ:**
 - *Stejnoseměrné* (ss, =, DC) – $f_h \approx 10^7$ Hz.
 - *Střídavé* (stř, ~, AC) – od $f_d \approx 10^0$ Hz
 - *nízkofrekvenční* (nf): 16 Hz ... 20 kHz
 - *vysokofrekvenční* (vf) obv. $f_d \geq 100$ kHz, f_h až 10^{10} Hz.
- **Podle ŠÍŘKY PÁSMÁ**
 - *Širokopásmové* : $f_h/f_d \geq 10$ – např. nf nebo video (50 Hz ... 6 MHz / 250 MHz)
 - *Úzkopásmové (selektivní)* : $B/f_s \leq 0,1$ – např. mezifrekvenční, TV kanálové

B – bandwidth; f_s – střední km.pásma





Rozdělení zesilovačů

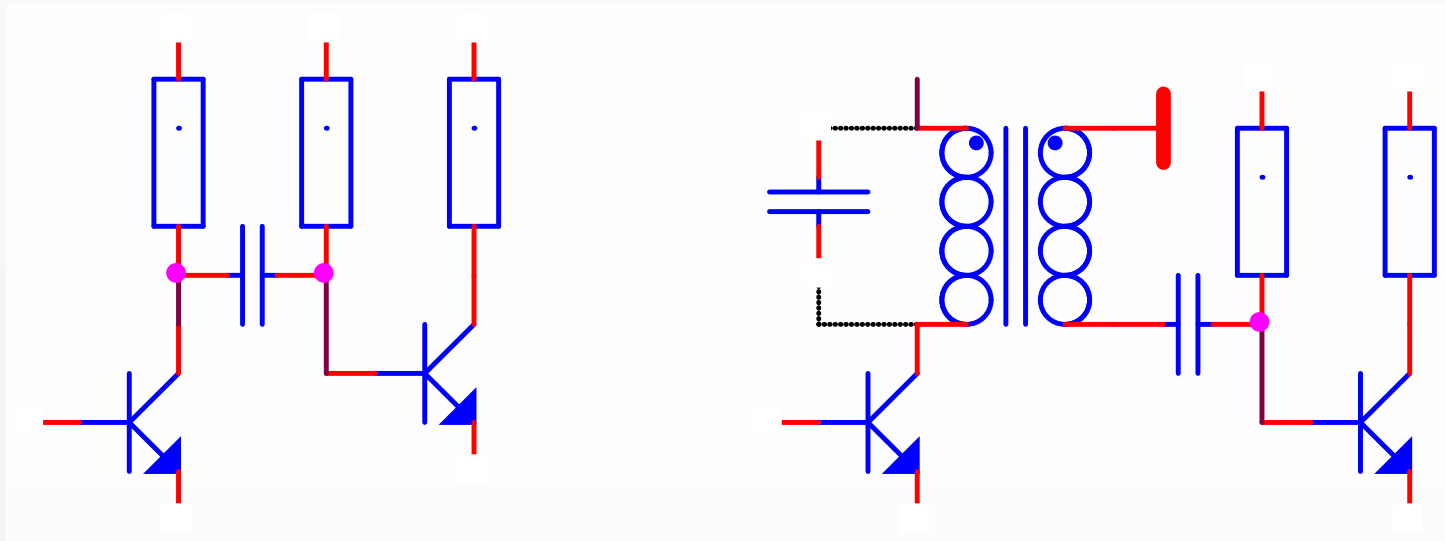


- Podle **ZÁKLADNÍHO ZAPOJENÍ**
SB, SE, SC a jejich kombinace
- Podle **PRACOVNÍ ZÁTĚŽE**
R, L, LC (rezonanční), aktivní (nelineární) se stabilizátorem proudu (%)



Rozdělení zesilovačů

- Podle VAZBY mezi stupni
 - Galvanická - nezbytná u ss, ale užívá se i u stř.
 - Kapacitní – kmitočtově závislá (deriv. RC čl.)
 - Transformátorová – jak u indukční, tak u rezonanční zátěže; kmitočtově závislá



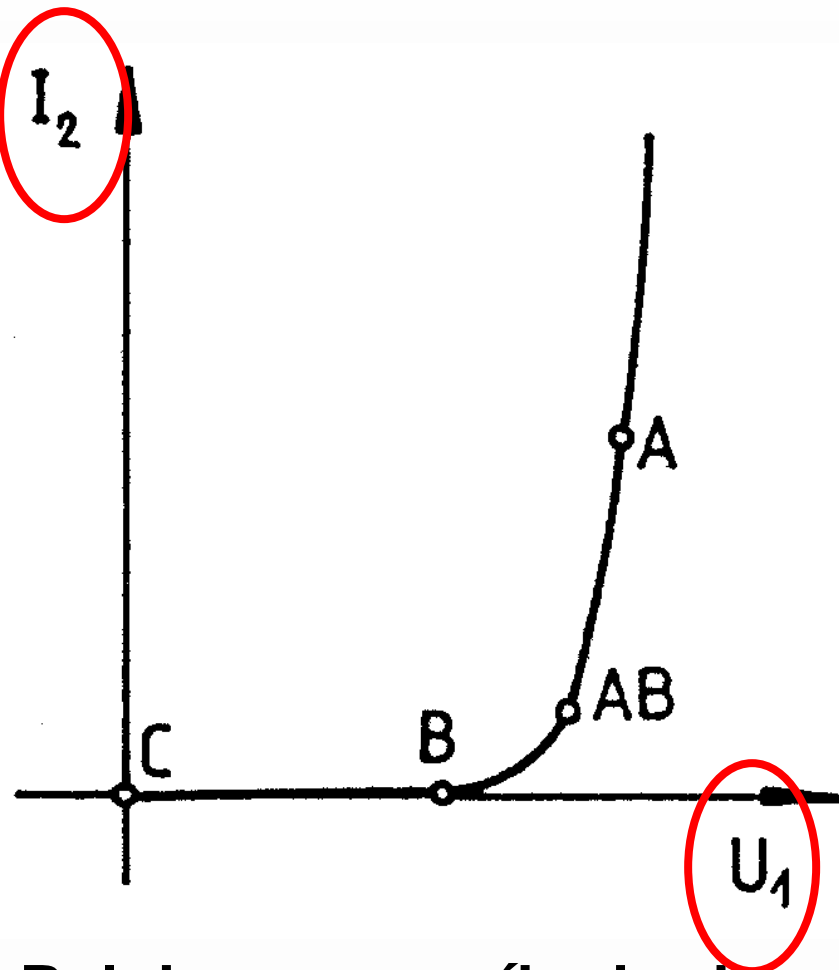


Rozdělení zesilovačů

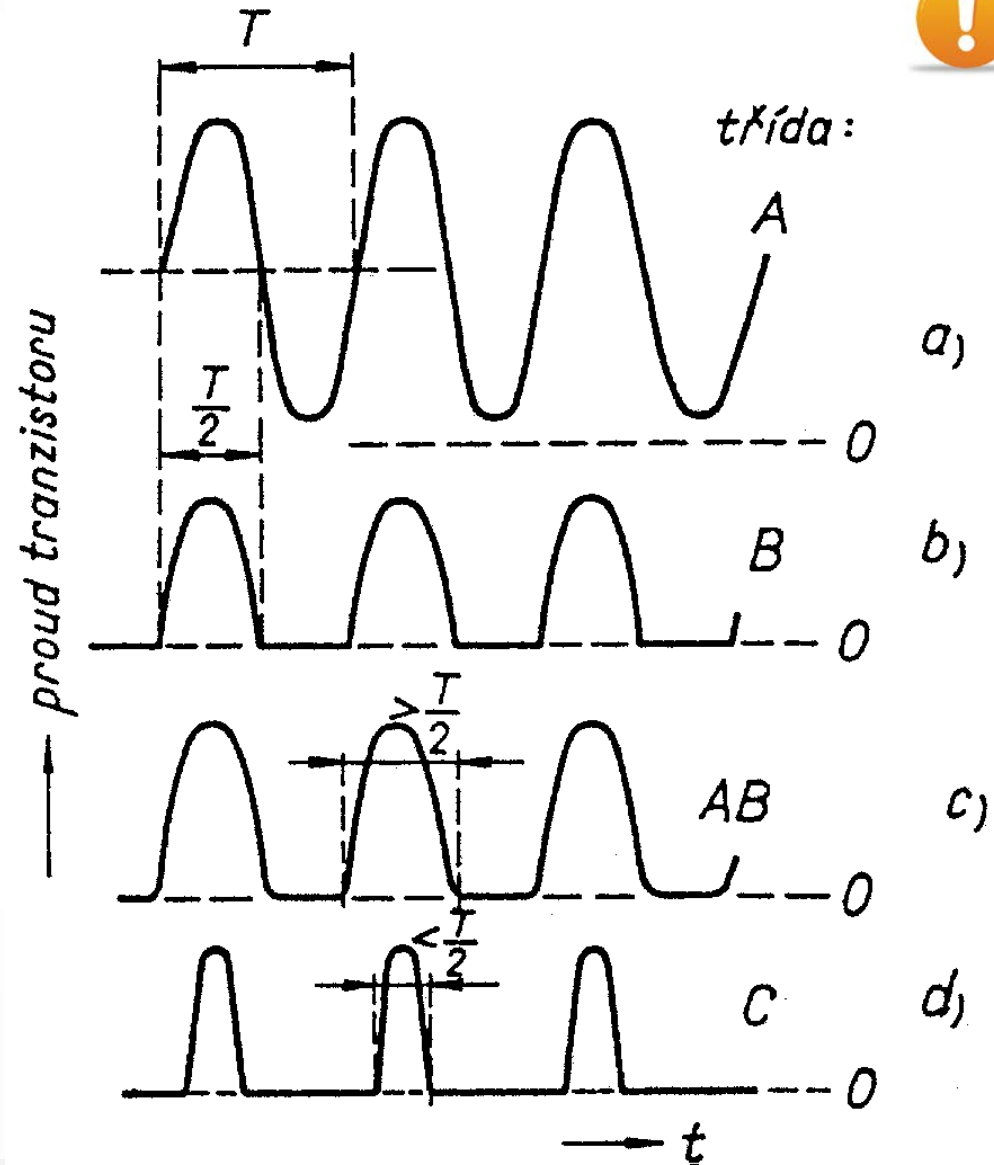
- Podle **POLOHY KLIDOVÉHO PRACOVNÍHO BODU** na **převodní charakteristice**
Třídy: A, AB, B, C



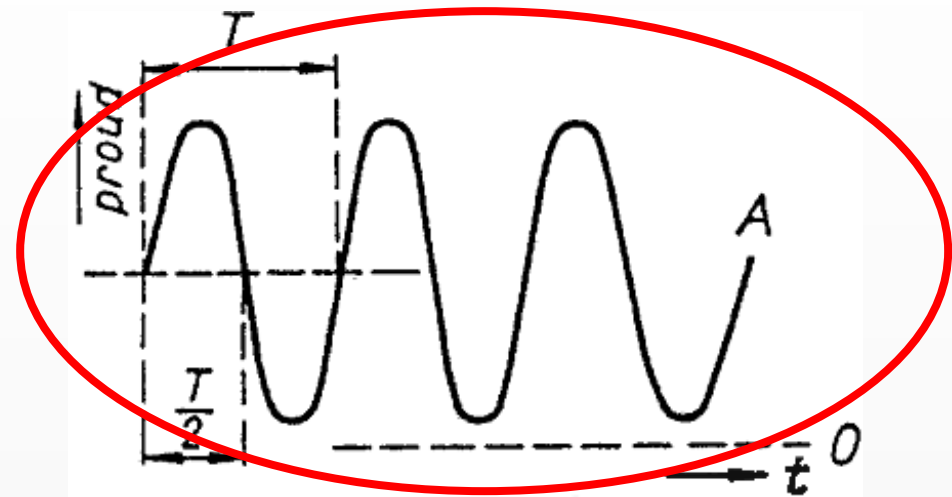
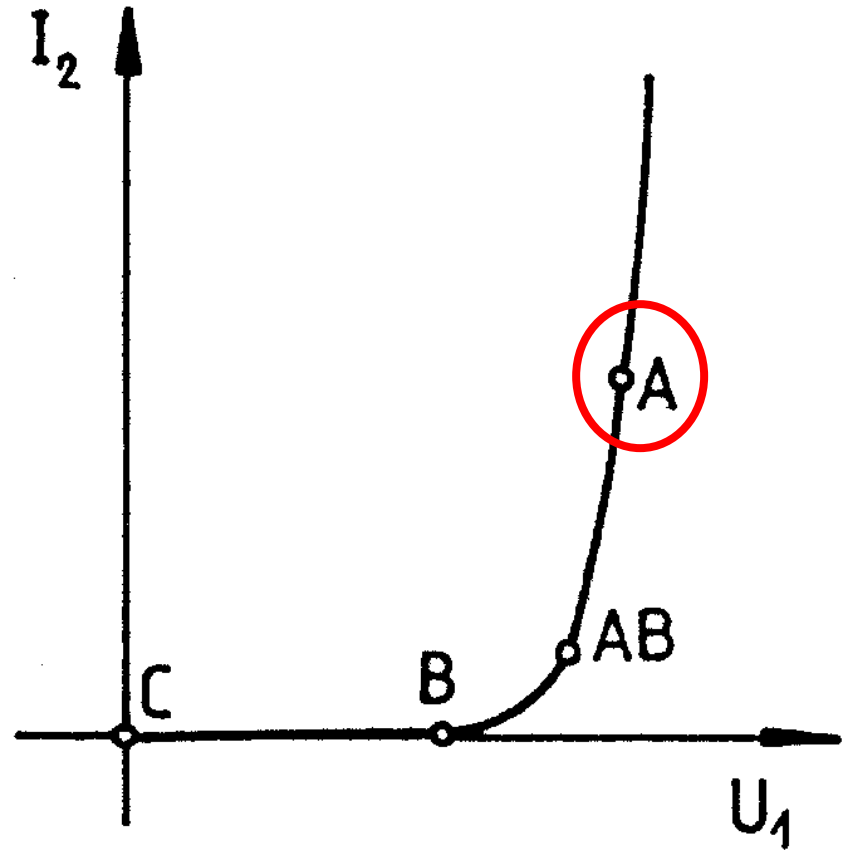
Tranzistorový zesilovač



Poloha pracovního bodu podle třídy zesilovače a tvar výstupního signálu



Tranzistorový zesilovač



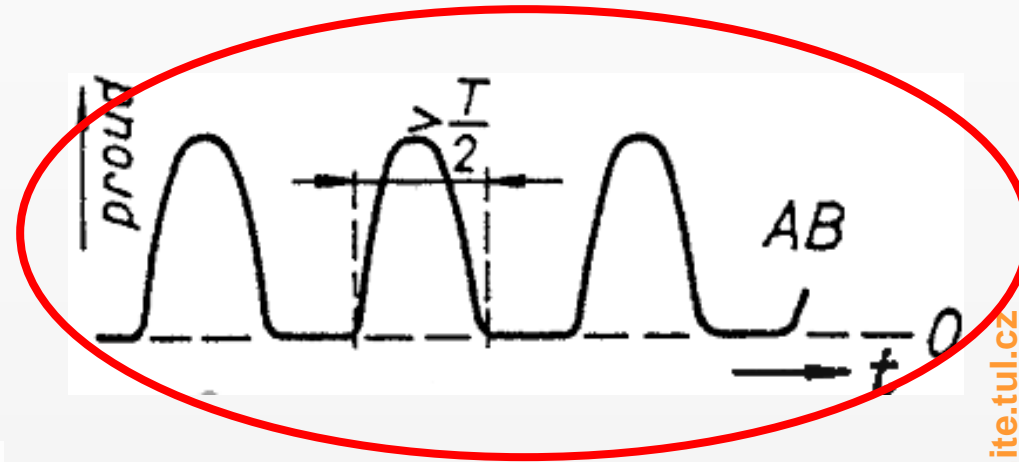
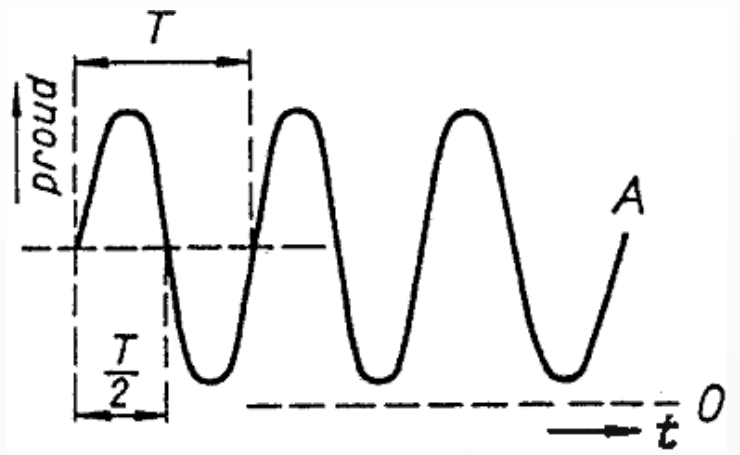
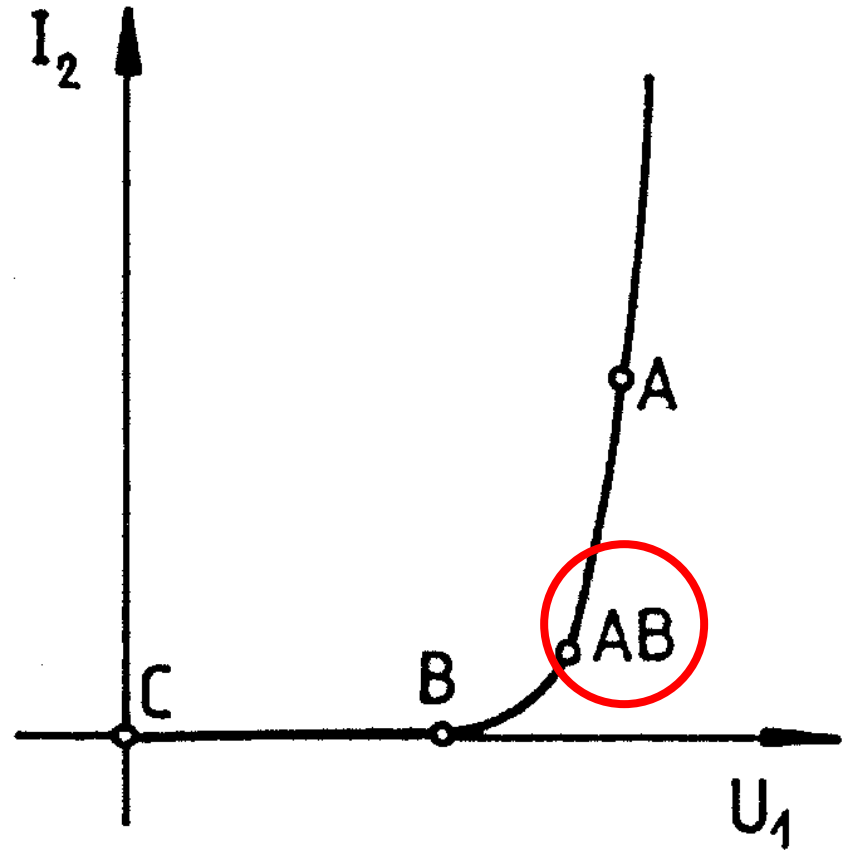
Poloha pracovního bodu podle třídy zesilovače a tvar výstupního signálu

Třída A a AB – pracovní bod leží uprostřed charakteristik, minimální zkreslení, velký klidový příkon
účinnost ~ 30% (třída A) až 50% (třída AB),
(např. nf technika, předzesilovače)





Tranzistorový zesilovač

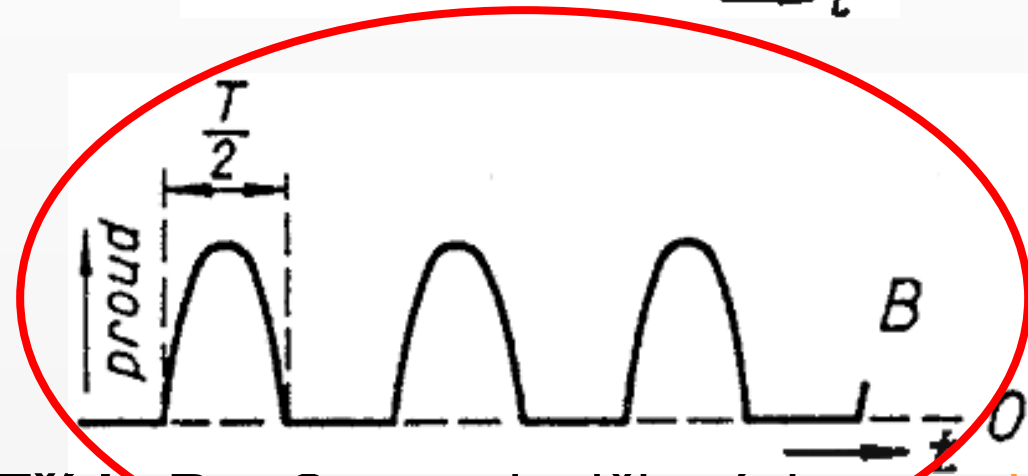
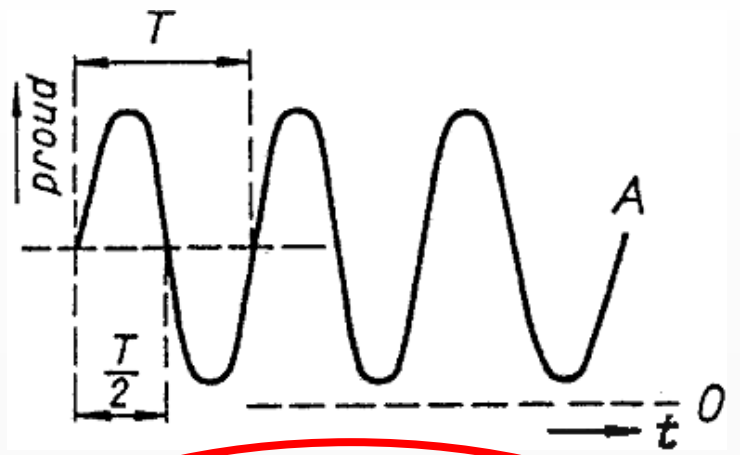
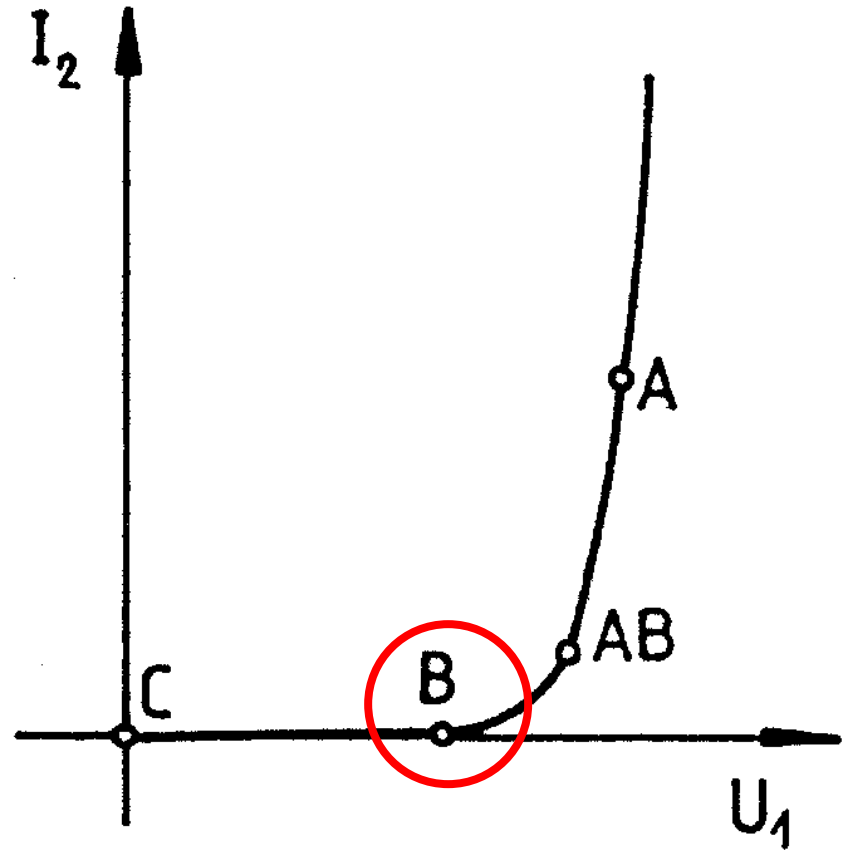


Poloha pracovního bodu podle třídy zesilovače a tvar výstupního signálu





Tranzistorový zesilovač



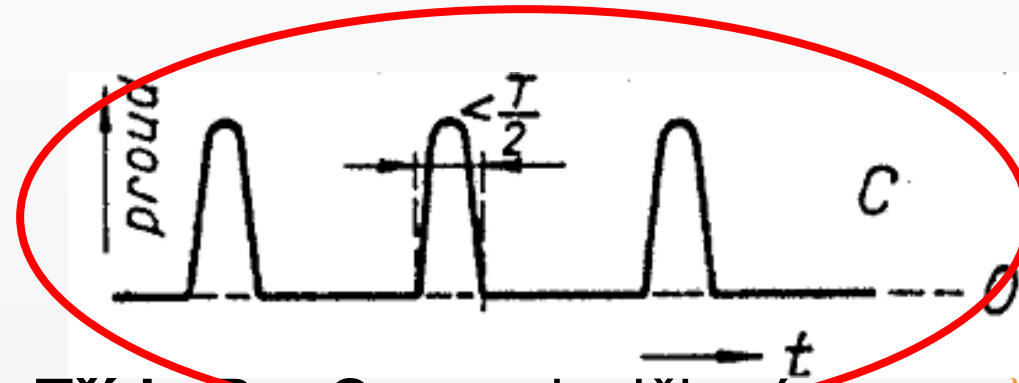
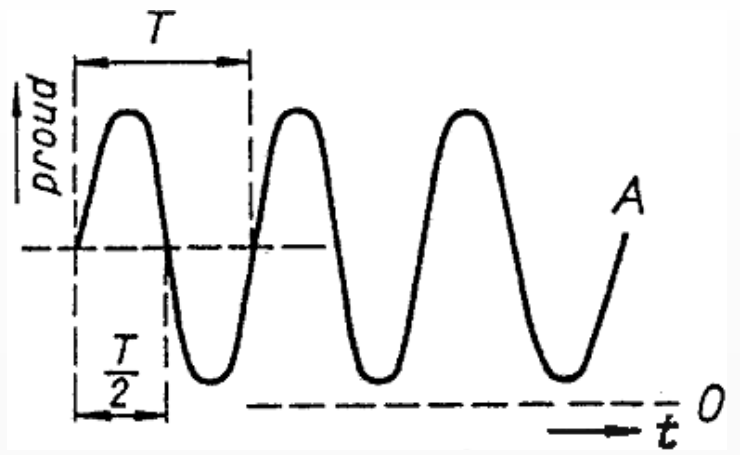
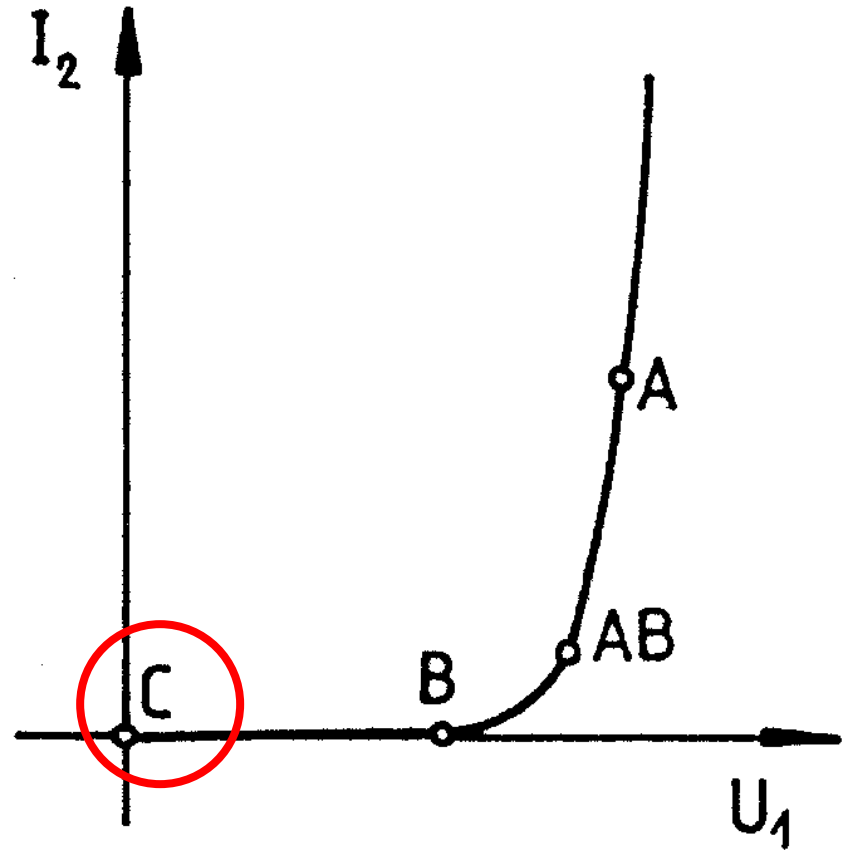
Poloha pracovního bodu podle třídy zesilovače a tvar výstupního signálu

Třída B a C – ve dvojčinných výkonových stupních (push-pull) velké zkreslení, účinnost ~ 60% (třída B) až 80% (třída C)





Tranzistorový zesilovač



Poloha pracovního bodu podle třídy zesilovače a tvar výstupního signálu

Třída B a C – ve dvojčinných výkonových stupních (push-pull)
velké zkreslení, účinnost ~ 60% (třída B) až 80% (třída C)



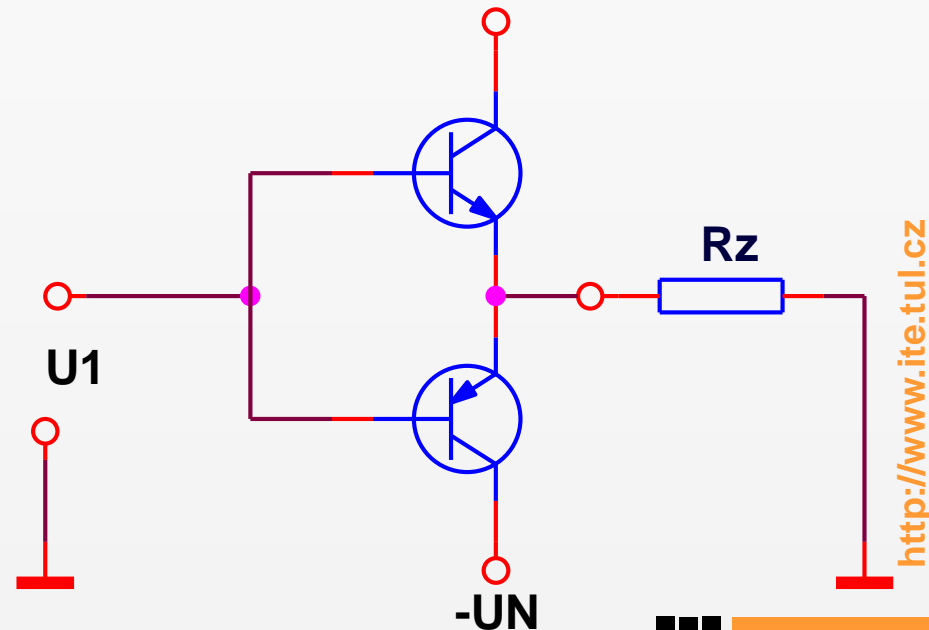


Dvojčinný komplementární stupeň (push-pull)



- koncový stupeň nf zesilovačů a ss servoz zesilovačů
 - zapojení SC = zesilovač proudu
 - symetrické napájení – pro stř. signál (nf) může být i jednoduché s kapacitní vazbou
- zapojení push-pull s komplementární (doplňkovou) dvojicí tranzistorů, t.j. s tranzistory opačné vodivosti, zpracování kladné/záporné půlvlny signálu. **+UN**

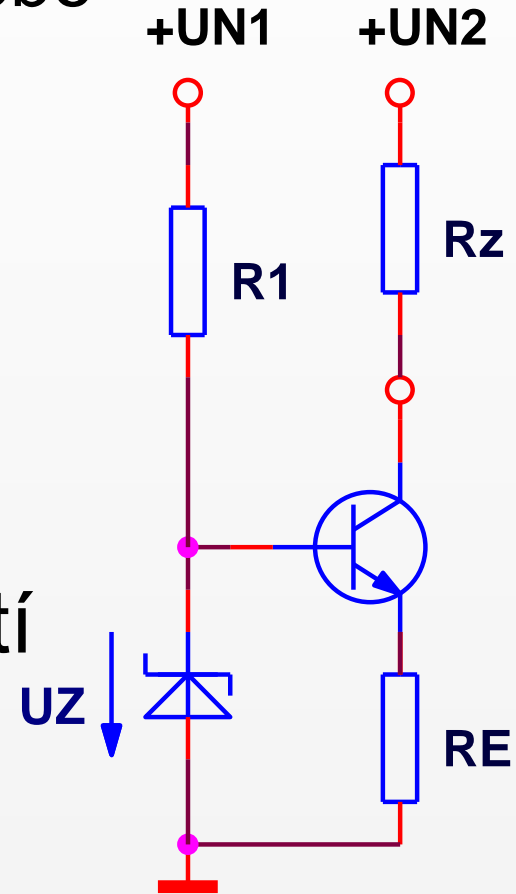
- přímo spojené vstupy obou paralelních větví (báze tranzistorů) → třída C (bez předpětí)





Stabilizátor proudu

- Udržuje konst. proud zátěží R_z
 - při **změnách napájecího napětí** nebo **odporu zátěže**,
 - pokud se tranzistor nedostane do saturace
- Využívá stabilizátor napětí (Zenerova dioda, LED, sériové spojení diod), příp. jen tvrdý dělič stabilizovaného napájecího napětí

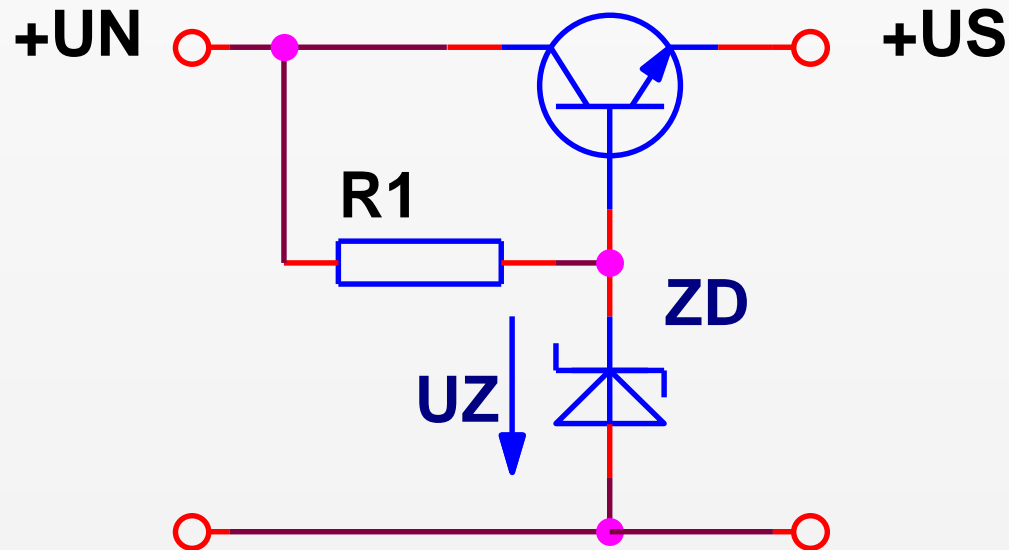




Výkonový stabilizátor napětí



- Využívá stabilizátor napětí se Zenerovou diodou, doplněný proudovým zesilovačem SC, takže je zatížen $\beta \times$ menším proudem než je proud výstupní
- Na výstupu napětí nižší o U_{BE} než je U_Z



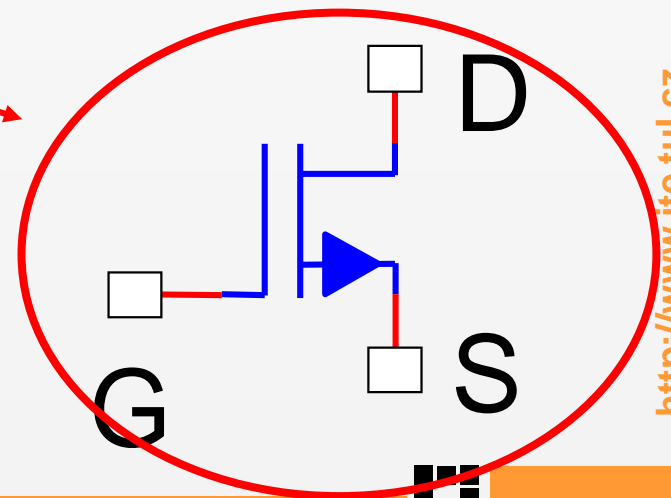
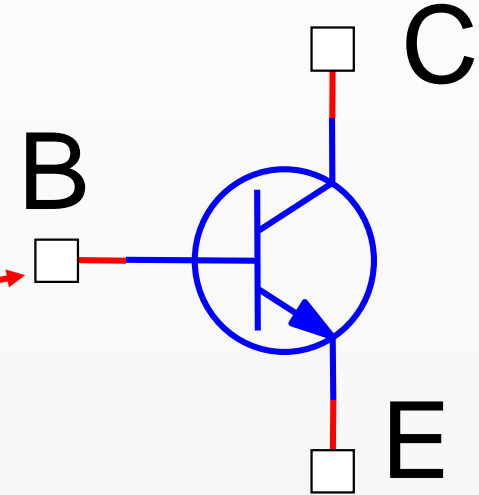


Tranzistory



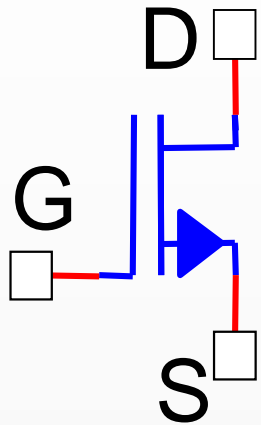
Tranzistory:

- ✓ Bipolární
- Unipolární





FET tranzistory



FET – Field Effect Transistor (tranzistor řízený el. polem)

- **MOSFET** (Metal Oxid Semiconductor FET)
- **JFET** (Junction FET)

Proud mezi elektrodami tvořen nosiči jednoho typu (tj. *unipolární*)

Ve vrstvě polovodiče se vytvoří kanál ovládaný příčným elektrickým polem (**kanál typu P** nebo **N**)

Zdroj proudu řízený napětím

Elektrody:

- source** S (E)
- drain** D (C)
- gate** (hradlo – G)

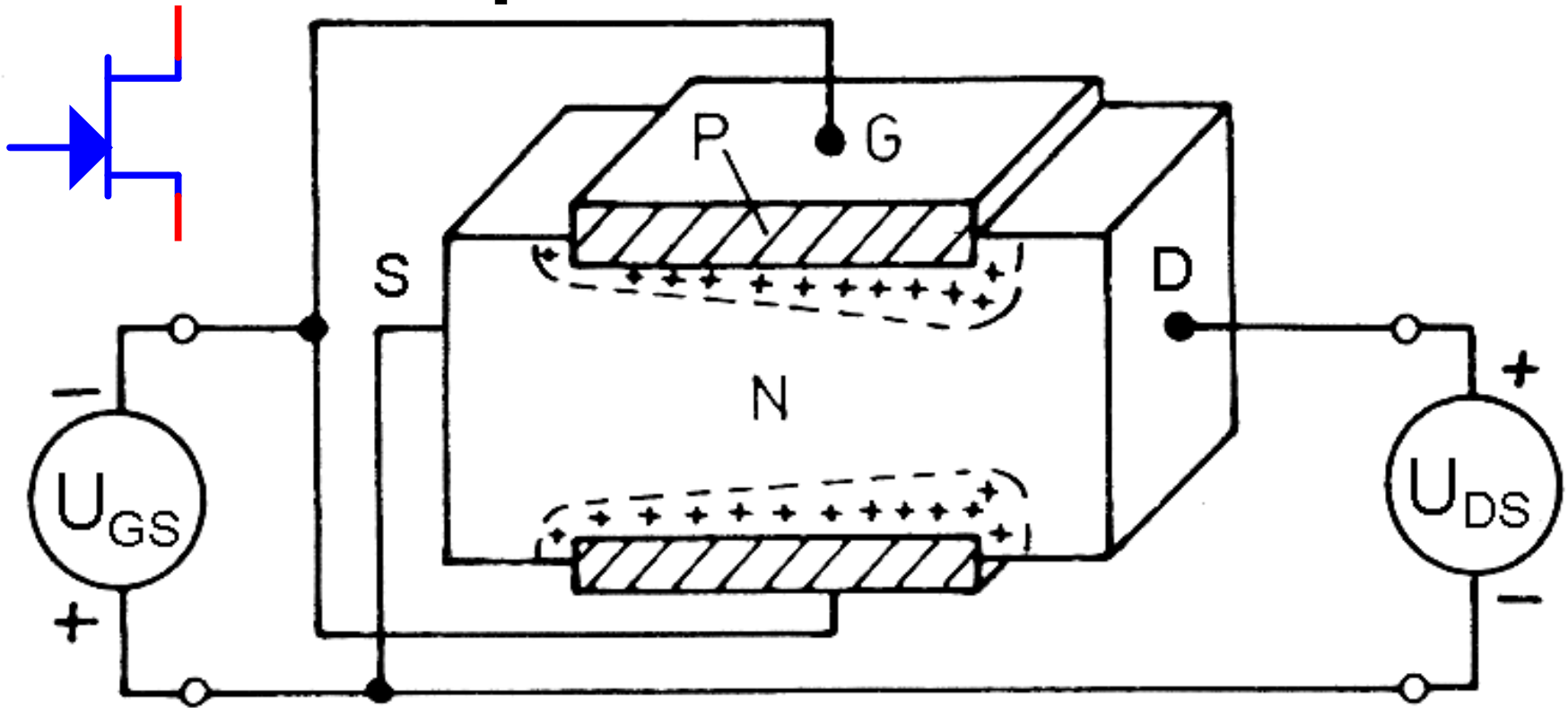
D=C

S=E



FET tranzistory

Princip tranzistoru JFET

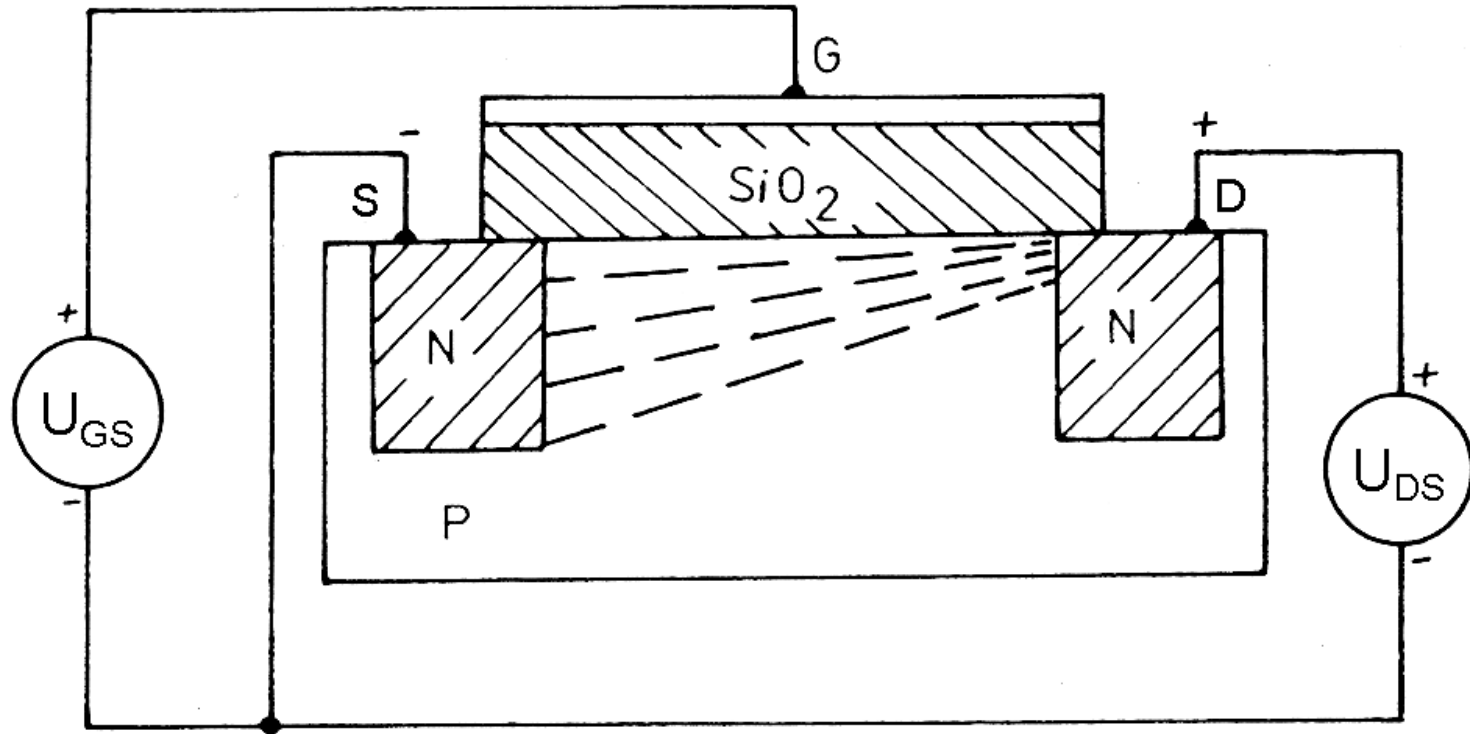
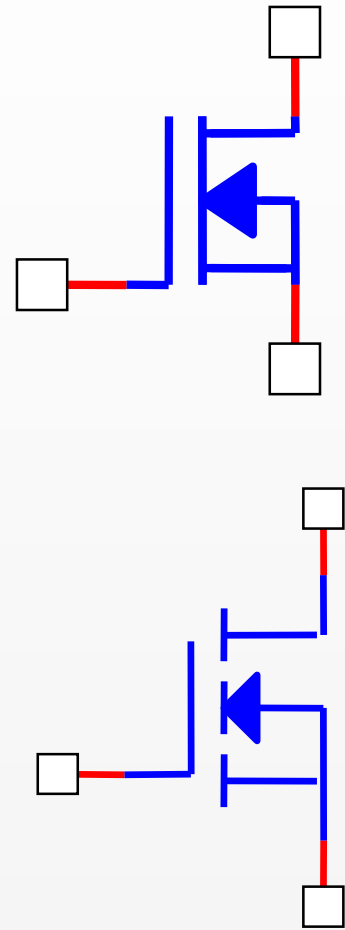


Hradlo odděleno závěrně polarizovaným P-N přechodem (nebo přechodem kov-polovodič - MESFET); pouze zabudovaný kanál (nelze obohacovat, jen ochuzovat)



FET tranzistory

Princip tranzistoru MOSFET



- Hradlo odděleno izolační vrstvou - oxidem křemíku / nitridem Si
- zabudovaný kanál (lze obohacovat nebo ochuzovat)
- indukovaný kanál (vede od určitého prahového napětí)





FET tranzistory

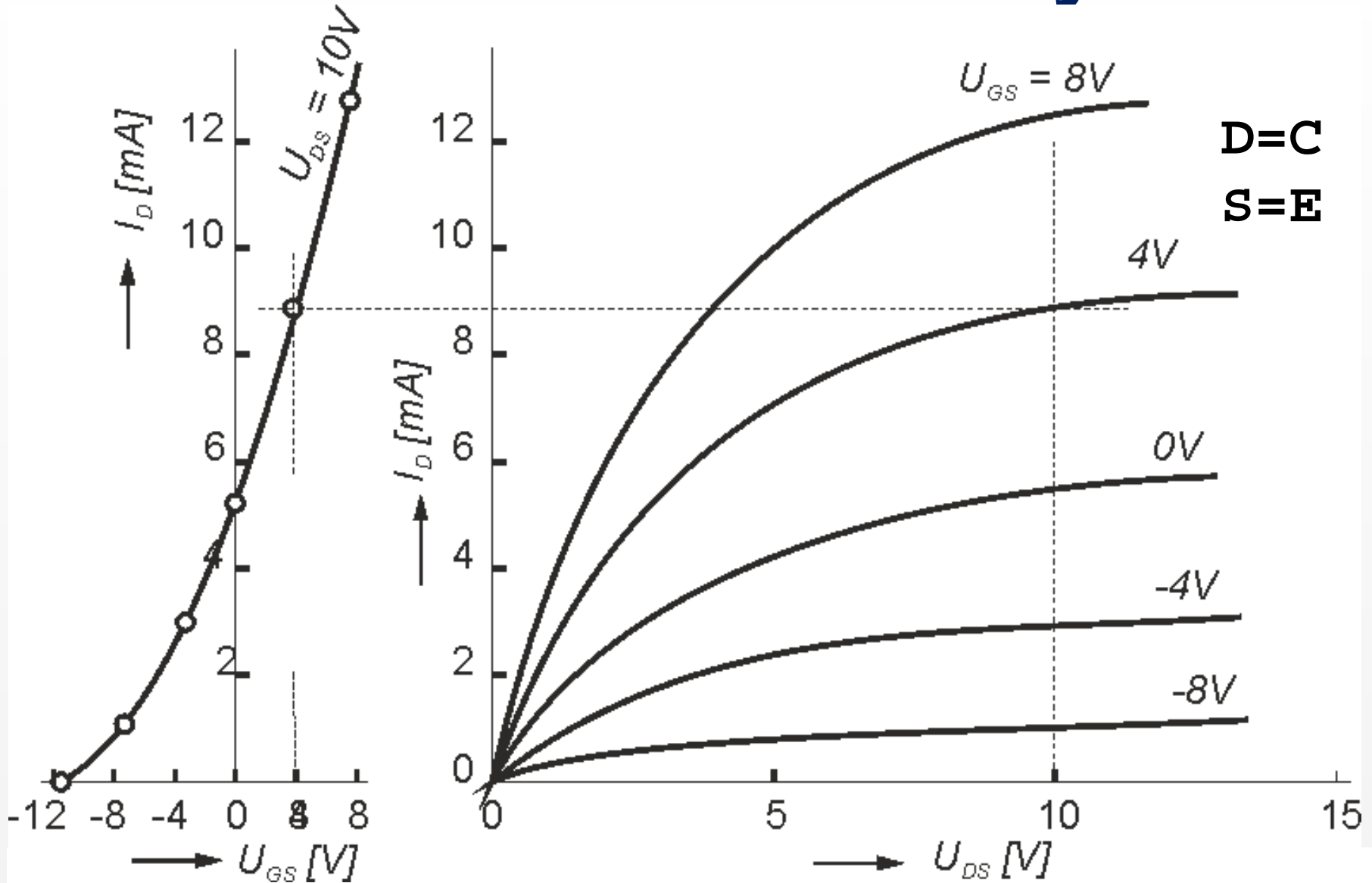
typ	JFET	MOSFET		FET
kanál	Zabudovaný	zabudovaný	Indukovaný	(obecný)
N				
P				
Převodní charka				

<http://www.ite.tul.cz>





FET charakteristiky



Charakteristiky tranzistoru MOSFET malého výkonu (zab.kanál)



FET parametry

Maximální proud kolektoru $I_{DM} \sim 0,01 \dots 40 \text{ A}$

Maximální napětí C-E $U_{DSM} \sim 30 \dots 1500 \text{ V}$

Maximální napětí G-E $|(\pm, +, -)U_{GSM}| \sim 10 \dots 100 \text{ V}$

Celková výkonová ztráta $P_{tot} \sim 0,1 \dots 250 \text{ W}$

Odpor ve vypnutém stavu $r_{DSoff} \sim 10^7 \dots 10^{10} \Omega$

Odpor v sepnutém stavu $r_{DSon} \sim 0,03 \dots 300 \Omega$ (závisí na I_{Dmax})

Svodový odpor hradla $R_{GS} \sim 10^6 \dots 10^8 \Omega$ (JFET)
 $10^{12} \dots 10^{14} \Omega$ (MOSFET)

Mezní kmitočet $f_T \sim 0,5 \dots 10 \text{ GHz}$

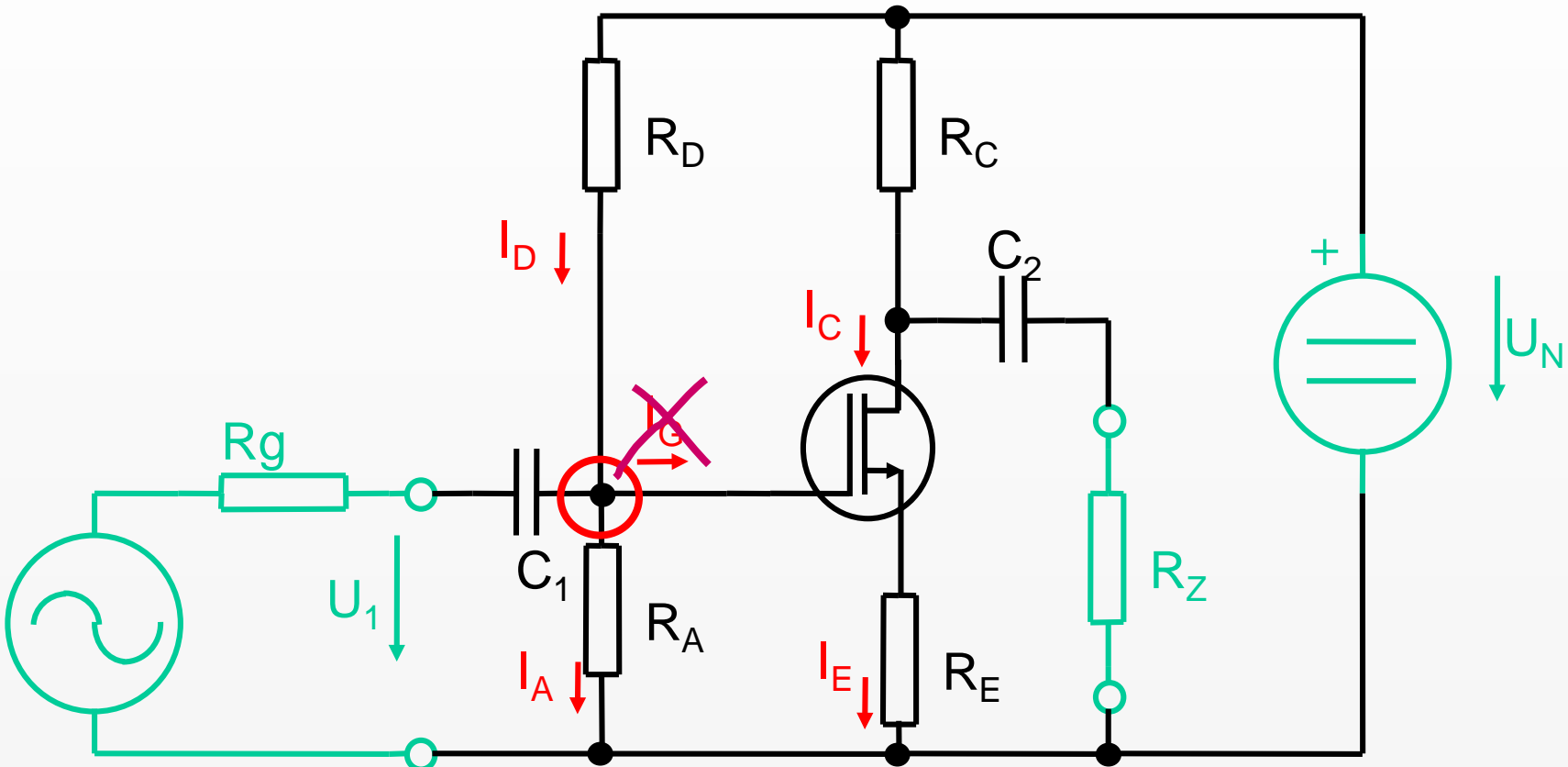
Strmost $S \sim 0,03-10 \text{ [A/V]}$

$$S = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}} \quad [\text{mA/V}, \text{ A/V}]$$





Zapojení s tranzistory



$$I_E = I_C$$
$$I_D - I_A = 0 \quad (I_D = I_A)$$





Unipolární spínače



- Nevýhodou je velké saturační napětí (u velkých výkonů)
- Nedochozí u nich k hromadění náboje
⇒ rychle vypínají
- Sepnutý stav se udrží v podstatě s nulovým příkonem
- Při vypínání nelze hradlo odpojit (nutno uzemnit)
- Rychlé periodické spínání může znamenat velké proudy při vybíjení / nabíjení parazitní kapacity hradla
(doplňuje se omezovací rezistor o malém odporu)
- Vhodné pro spínání signálů





Spínače signálu



- Použití tranzistorů MOSFET s indukovaným kanálem
- Řídicí napětí neproniká do signálové cesty
- Polarita spínaného napětí má minimální vliv na funkci spínače
- Odpor v sepnutém stavu je téměř konstantní
- Používá se paralelně spojený komplementární pár (PMOS + NMOS = CMOS)

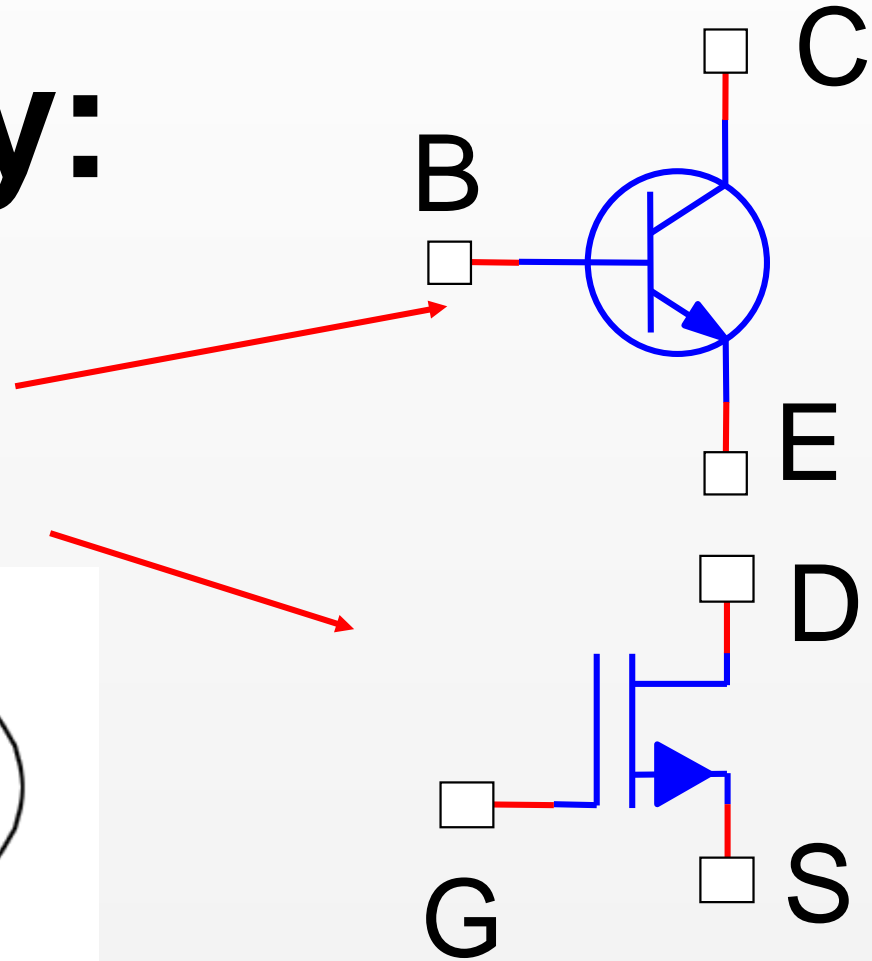
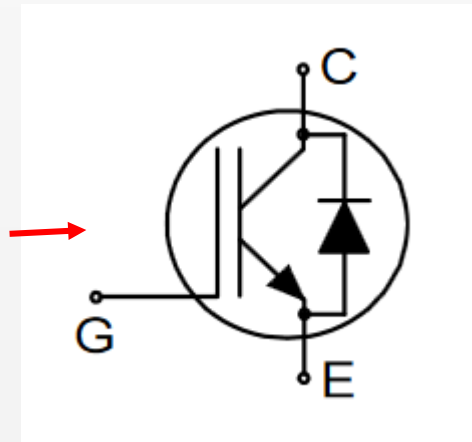


Tranzistory:

Bipolární

Unipolární

IGBT





IGBT - spínače signálu



- Kombinují výhody unipolárních a bipolárních tranzistorů
- Vstup je unipolární - řízeno napětím
- Pro spínání velkých proudů

Wiki praví :

Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Anglicky *Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT*) je druh [tranzistorů](#), který je zkonstruován pro velký rozsah spínaných výkonů (od zlomků W až po desítky MW)^[zdroj?] a vysokou [pulzní frekvenci](#). IGBT je integrovaná kombinace unipolární a bipolární součástky. Čip tranzistoru má hradlo izolované tenkou oxidovou vrstvou stejně, jako výkonový [MOSFET](#). Na kolektorové straně je vytvořen PN přechod, který injektuje minoritní nosiče do kanálu, když je IGBT sepnut. To výrazně snižuje úbytek napětí a tím i ztrátový výkon v sepnutém stavu.

(<https://cs.wikipedia.org/wiki/IGBT>)





Děkuji za pozornost...

Zdeněk Plíva
zdenek.pliva@tul.cz
Tel.: 3536

