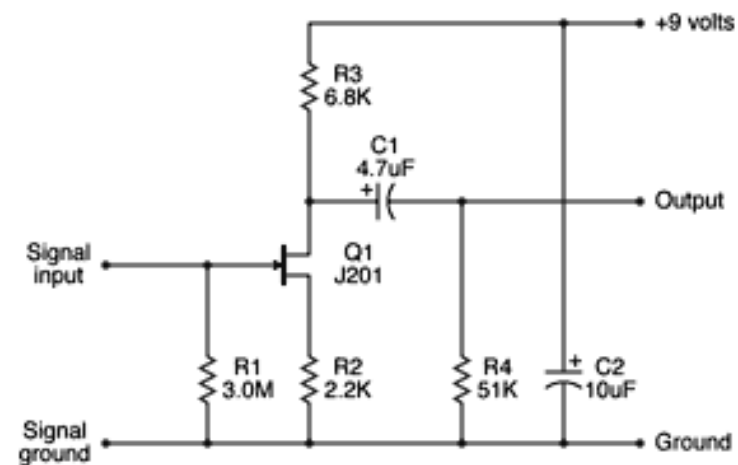
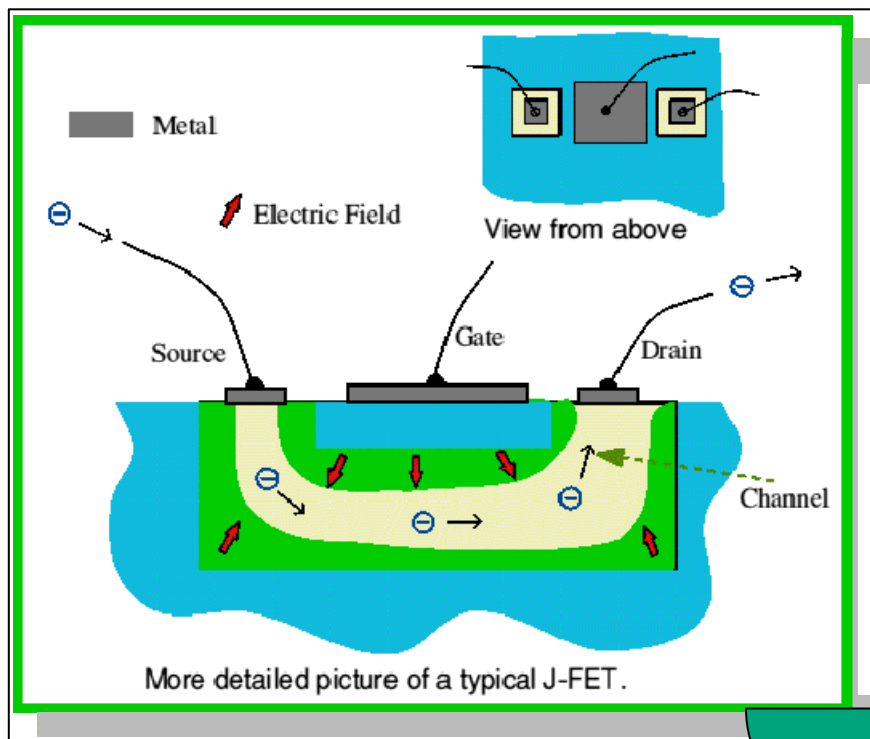


# Unipolární tranzistory



Discrete JFET Guitar Preamplifier

8.přednáška

# Tranzistory

## Bipolární

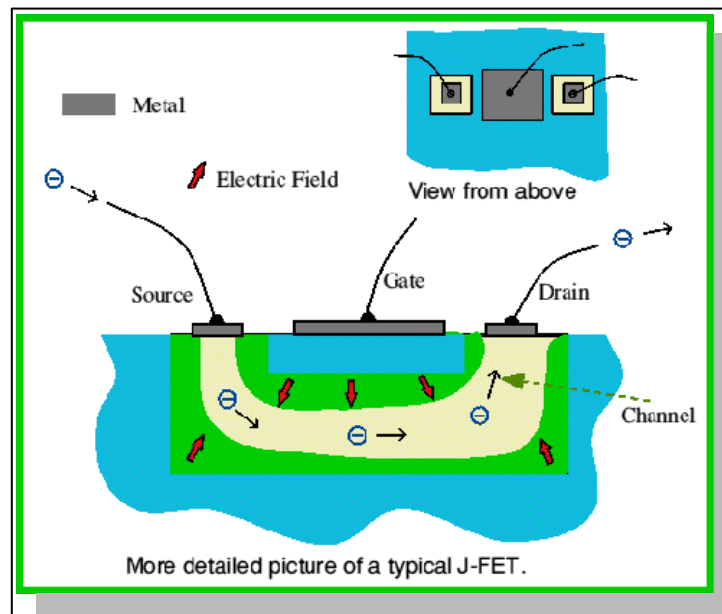
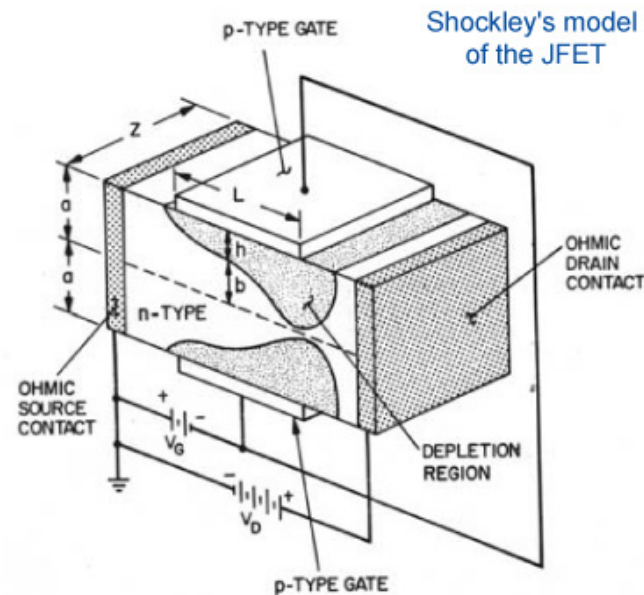
**Na jeho funkci se podílí nosiče náboje obojí polarity: elektrony a díry**

## Unipolární

**Na jeho funkci se podílí nosiče náboje jedné polarity: elektrony nebo díry**

# JFET      Junction Field Effect Transistor

1952 – návrh: W. Shockley



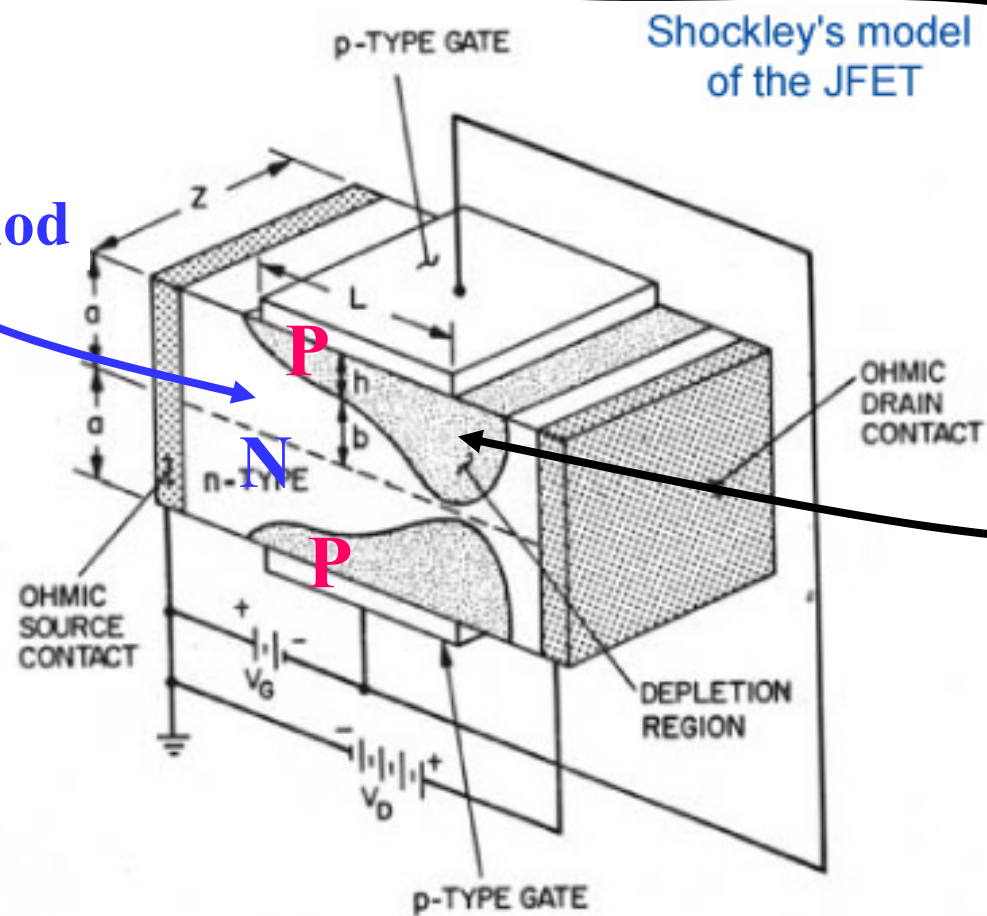
1953 – realizace:  
G. C. Dacey, I. M. Ross

# JFET

## Junction Field Effect Transistor

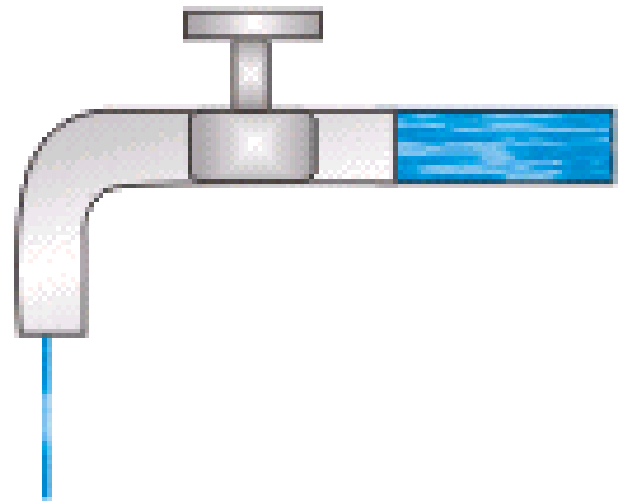
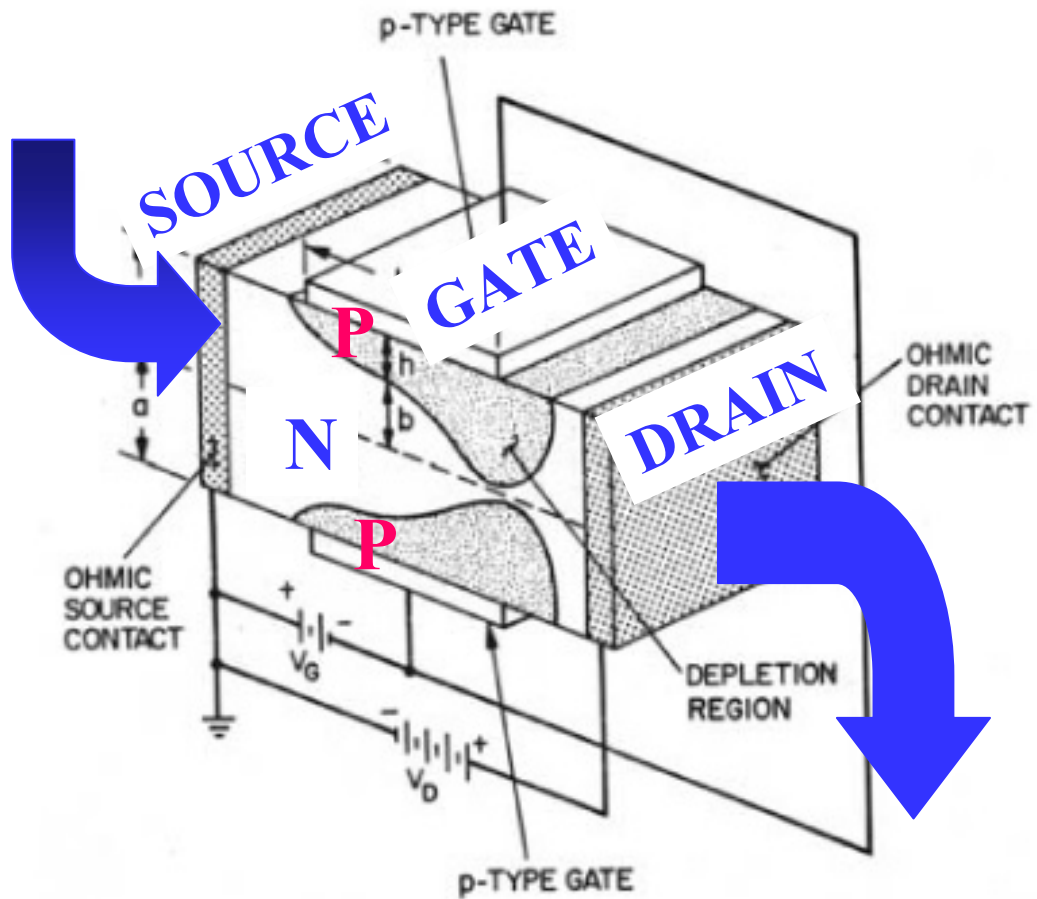
### Přechodový polem řízený tranzistor

2x p-n přechod



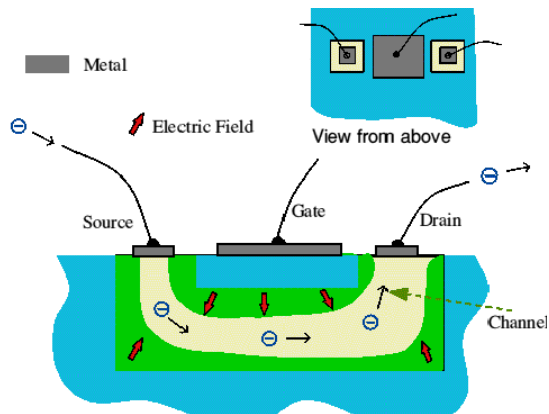
Elektrické  
pole OPN

# JFET

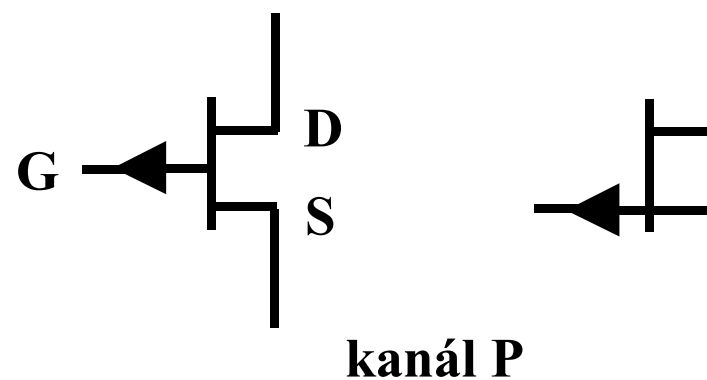
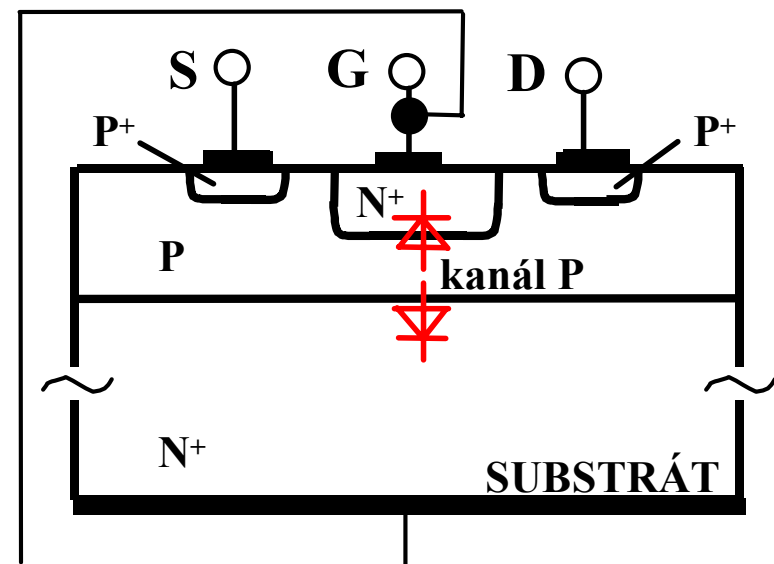
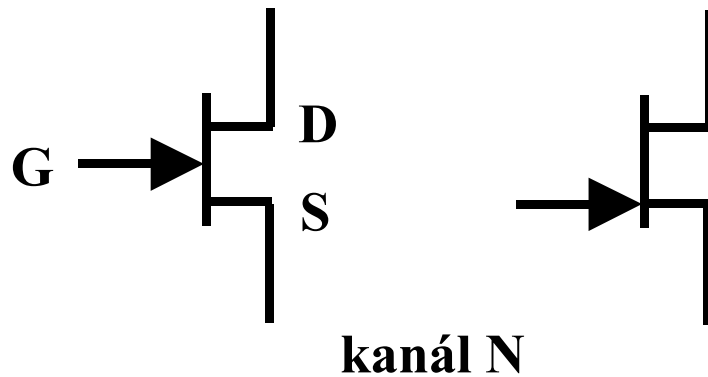
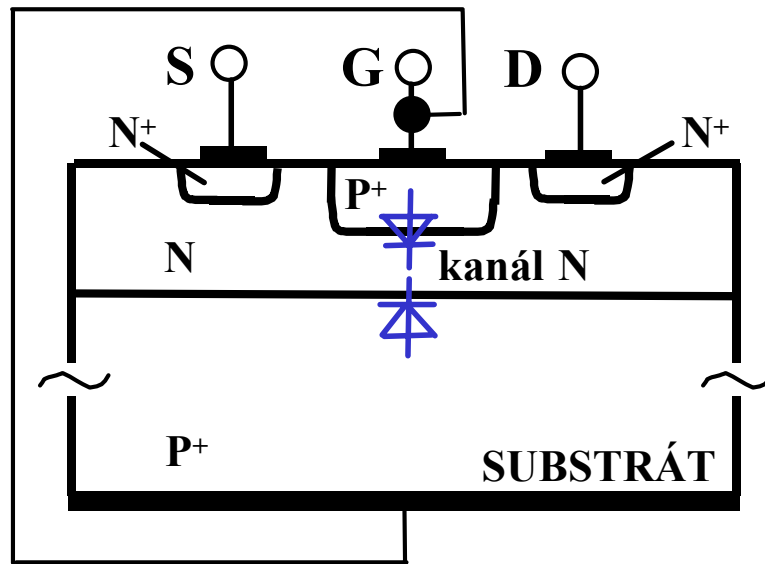
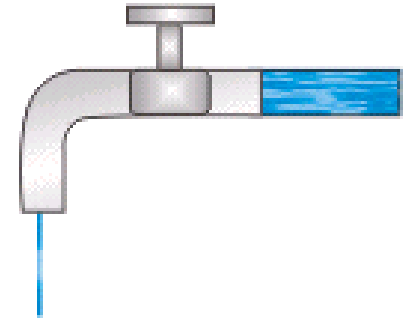


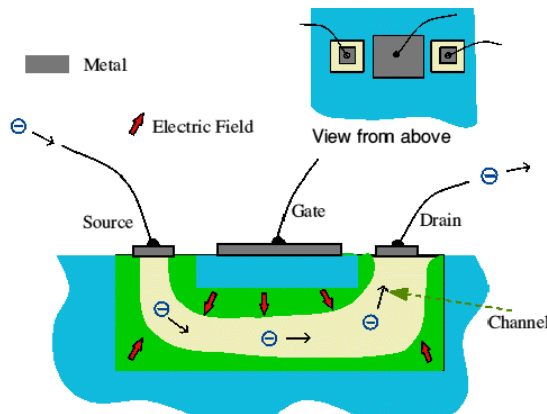
# Normally ON!!!

## Bez řídicího napětí je sepnut!

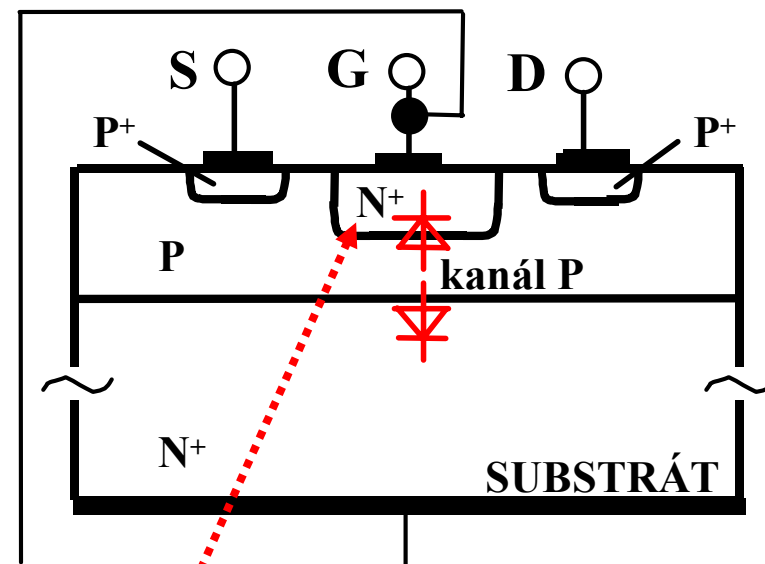
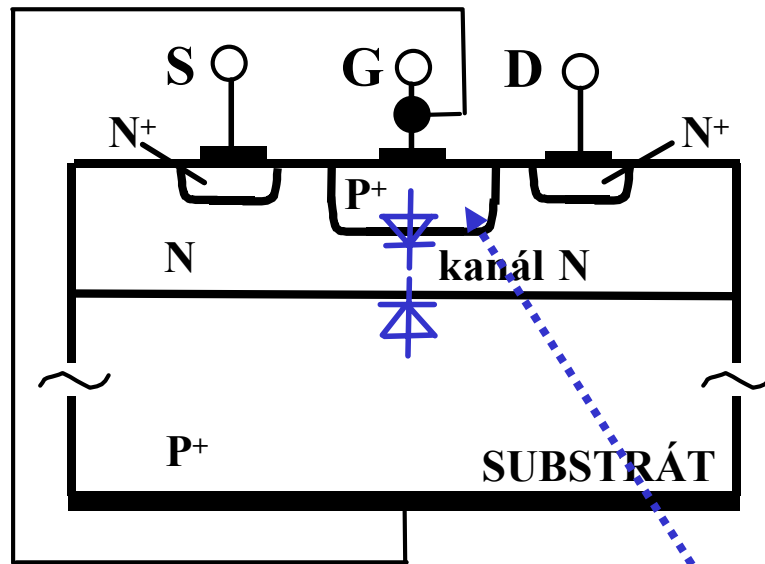


# JFET



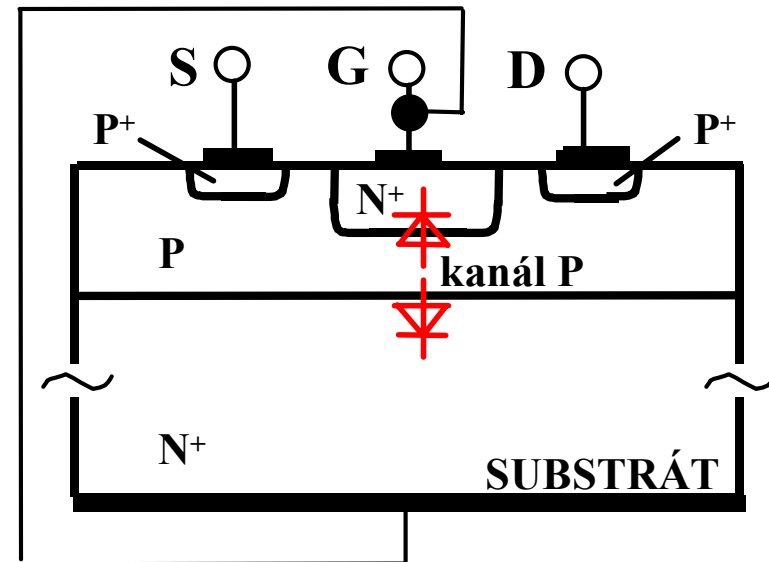
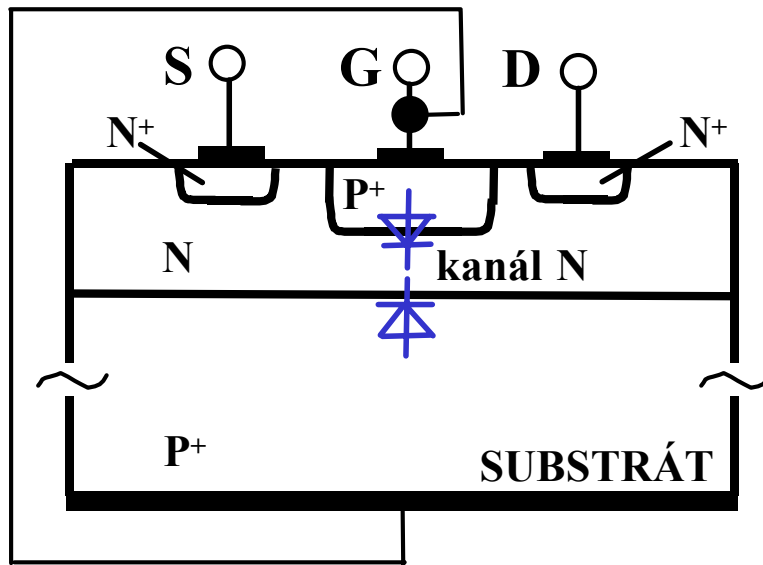


# JFET



Oblast *gate* je silně dotována ( $P^+$  nebo  $N^+$ ) oproti oblasti kanálu, aby se OPN se vzrůstajícím záporným napětím  $U_{GS}$  přednostně rozšiřovala do oblasti kanálu.

# JFET

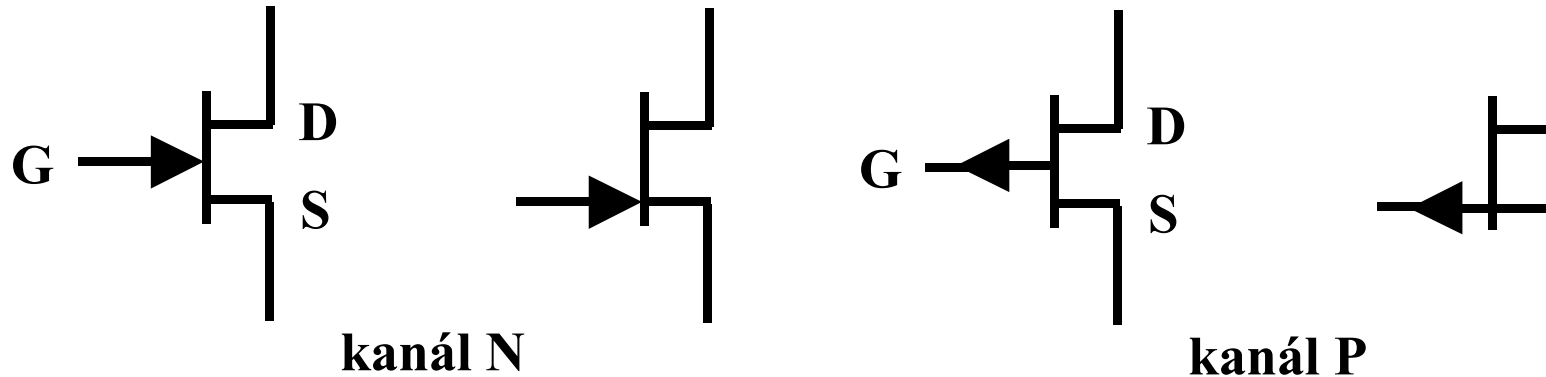


Ovládání záporným napětím  $U_{GS}$  znamená závěrnou polarizaci p-n přechodu G-S  $\Rightarrow$  **DO VSTUPU NETEČE PROUD!!!**

= TYPICKÁ VÝHODA UNIPOLÁRNÍCH TRANZISTORU

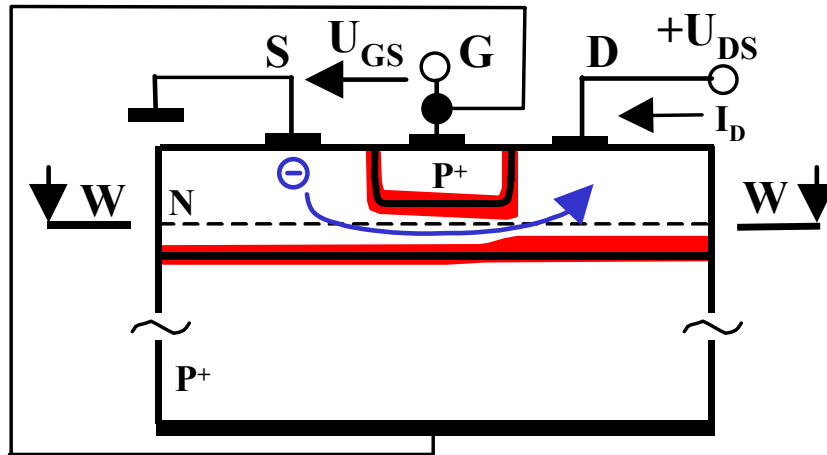


# JFET

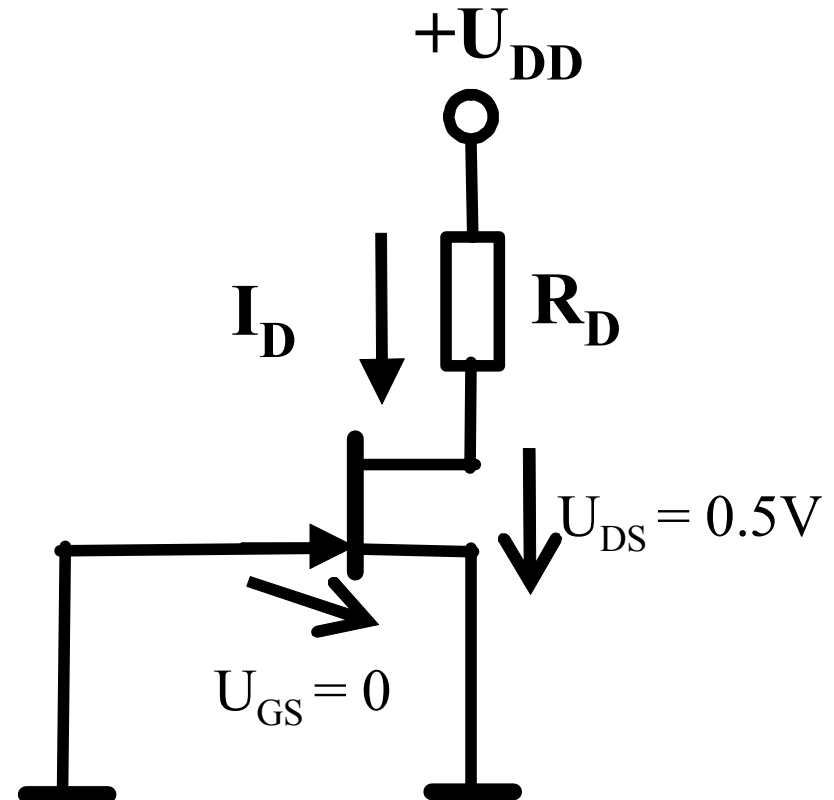
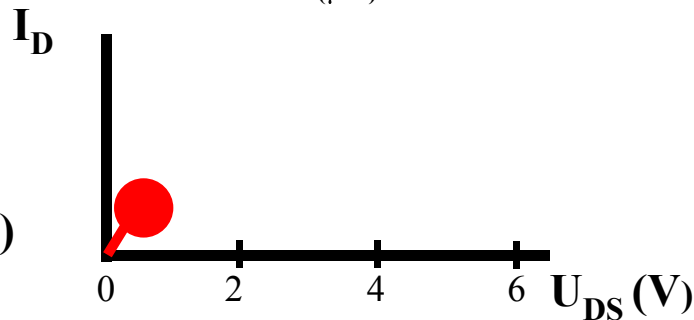
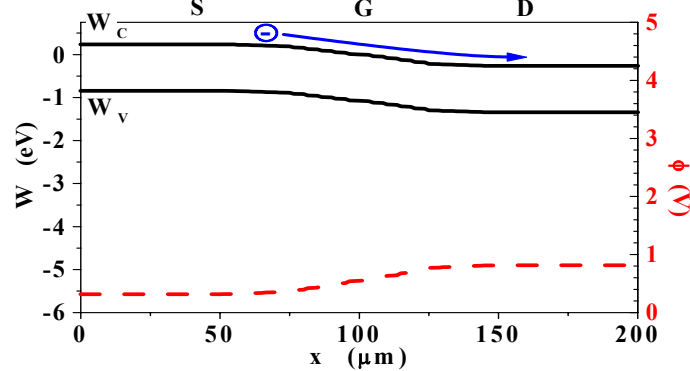


<u>Původně</u>		<u>„norma“</u>	<u>zvyk</u>
<u>G</u> ate	-	hradlo	hradlo
<u>S</u> ource	-	zdroj	emitor
<u>D</u> rain	-	nora	kolektor
<u>B</u> ody	-	substrát	substrát

# JFET

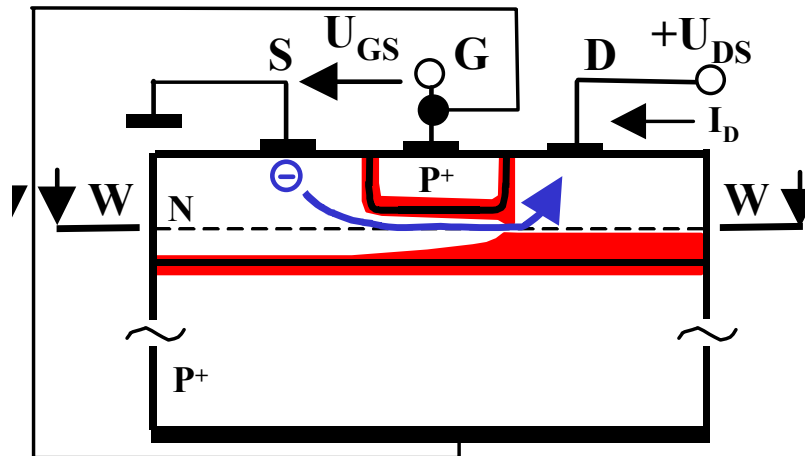


$$U_{GS} = 0V, U_{DS} = 0,5V$$

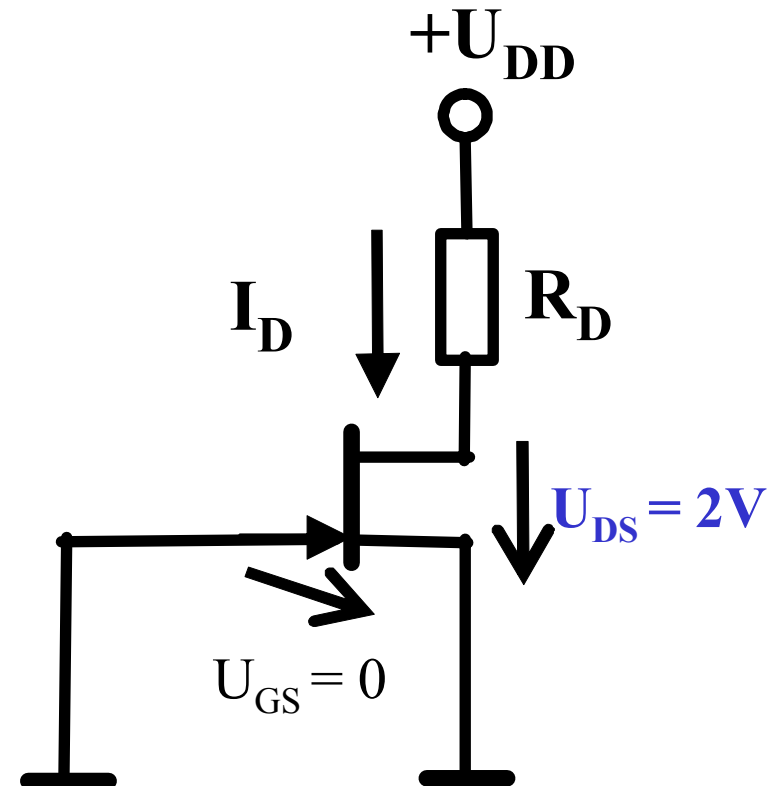
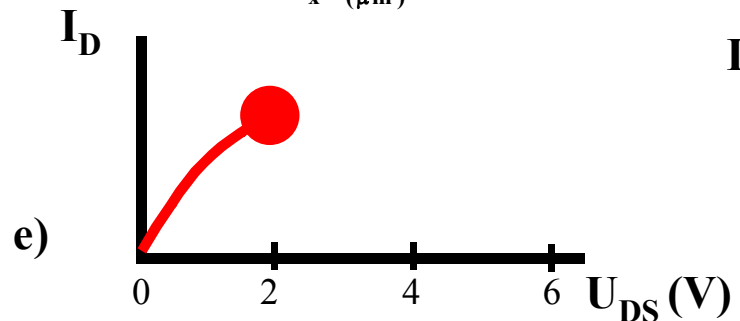
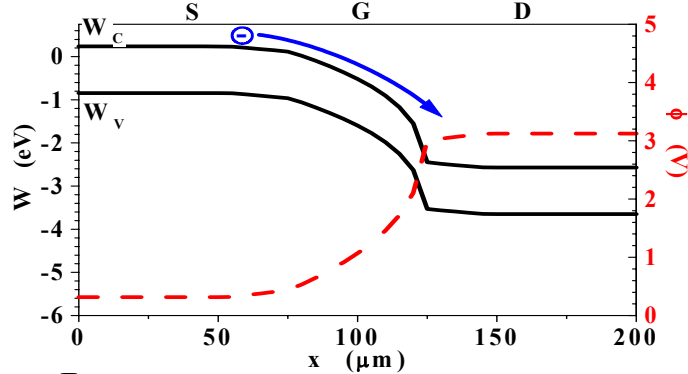


**Elektrony přitahovány  
+ potenciálem drainu,  
odpor kanálu je malý  
⇒ teče proud.**

# JFET

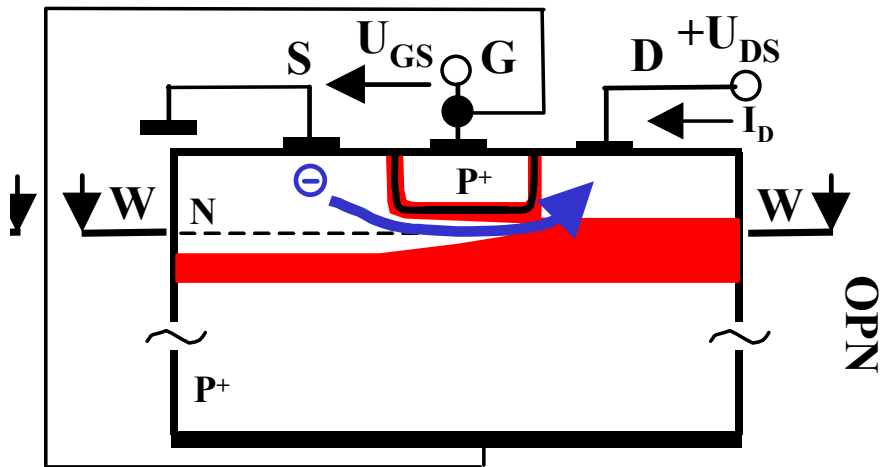


$$U_{GS} = 0V, U_{DS} = 2V$$

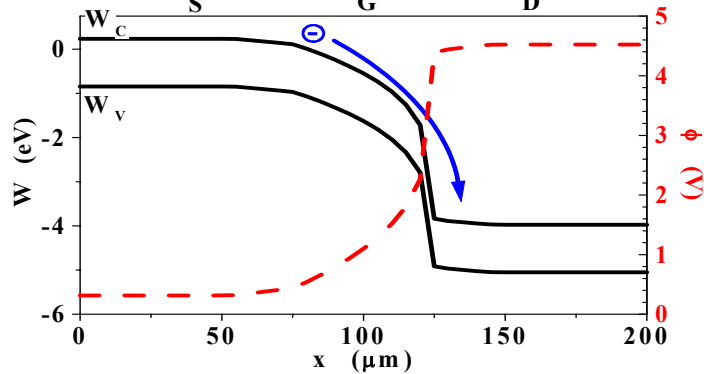


**Závěrné napětí diody G-D narůstá,  
OPN se rozšiřuje do kanálu,  
odpor kanálu roste  
⇒ nárůst proudu klesá.**

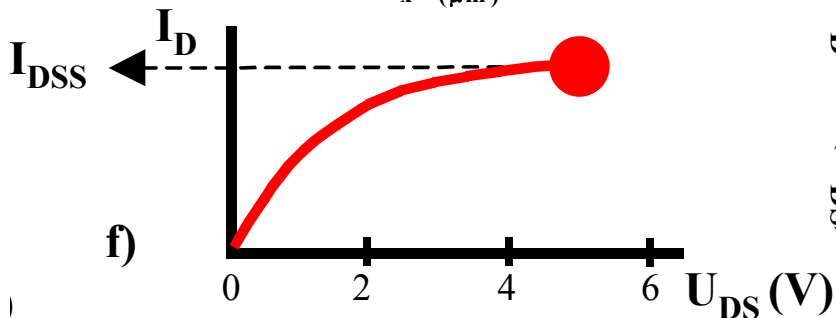
# JFET



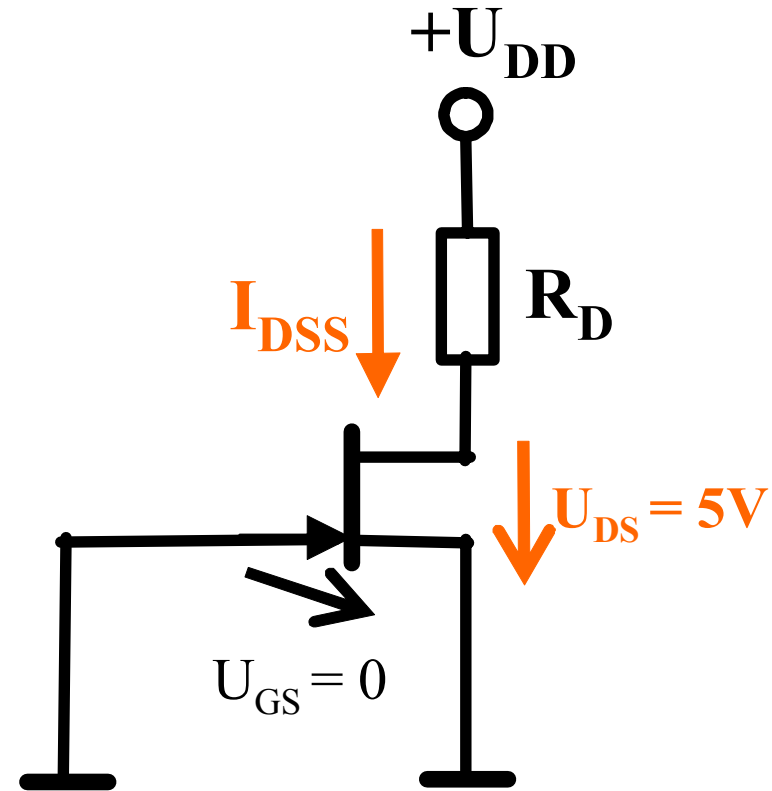
$$U_{GS} = 0V, U_{DS} = U_{DSsat} = 5V$$



ŘEZ W-W

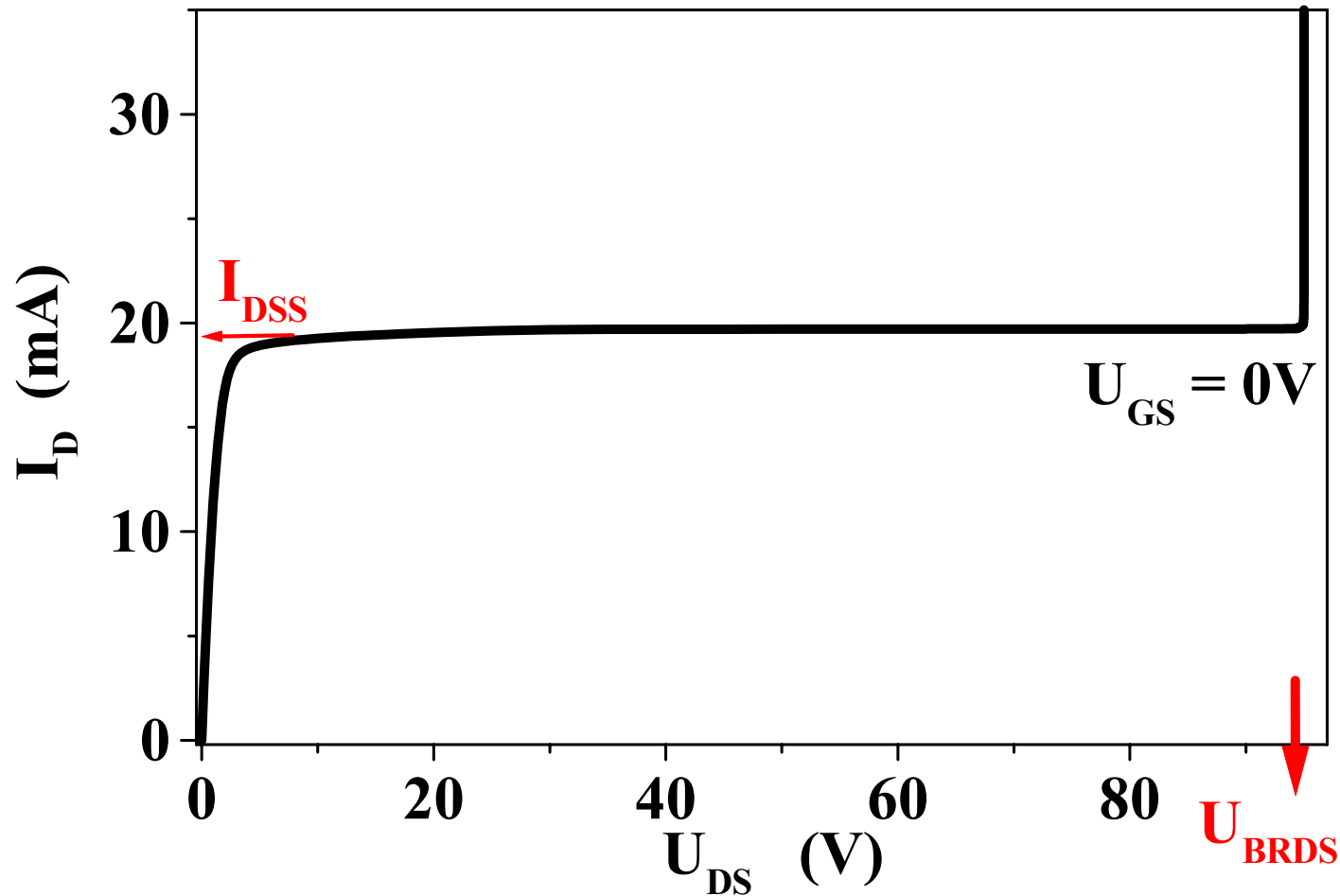


$$I_D = f(U_{DS})$$



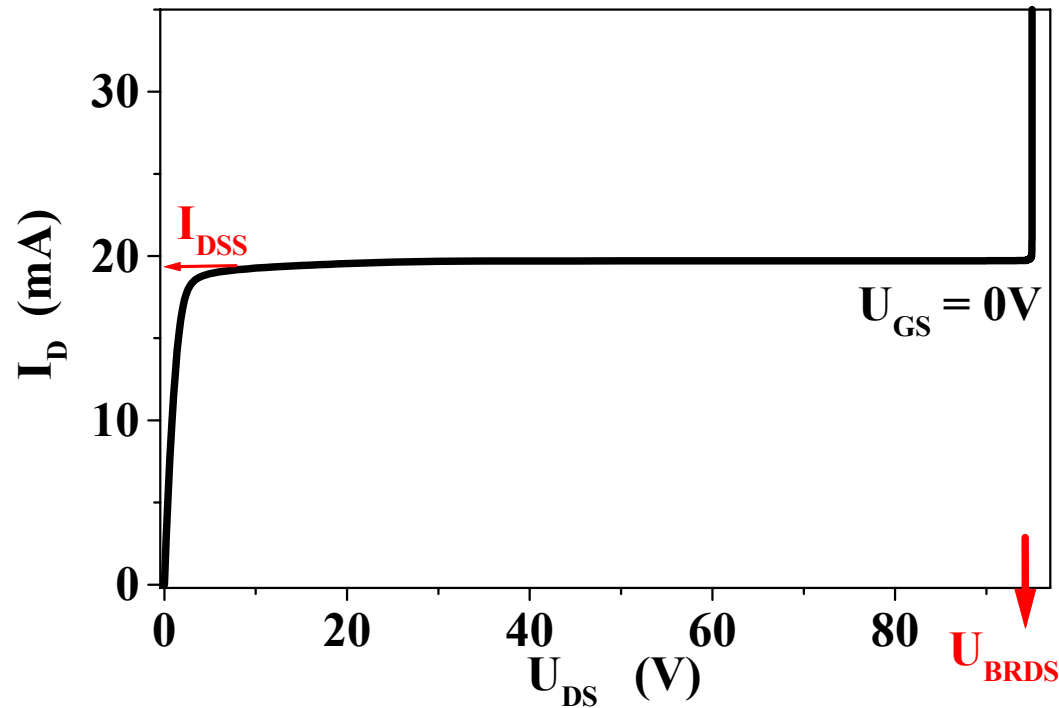
Kanál u drainu je zaškrcen,  
odpor kanálu narostl na maximum  
⇒ proud s napětím  $U_{DS}$  neroste.

# JFET – výstupní charakteristika



Kanál u drainu je lokálně zaškrcen, odpor kanálu narostl na maximum  $\Rightarrow$  proud s napětím  $U_{DS}$  neroste. Režim saturace.

# JFET – výstupní charakteristika



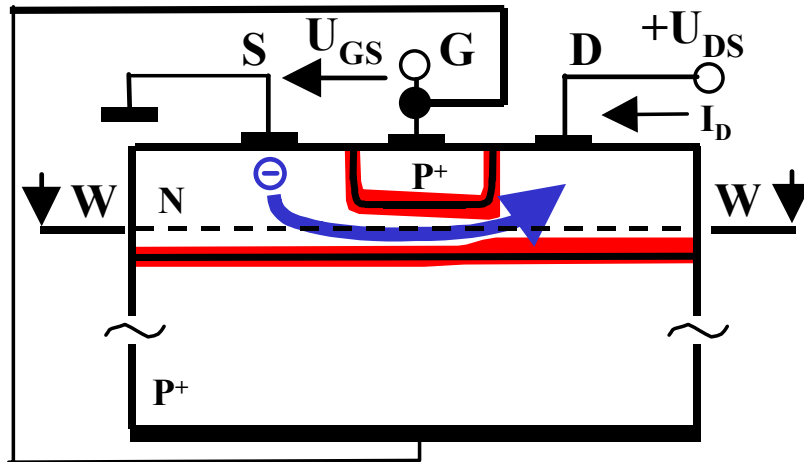
$D \rightarrow S$

Působící el. pole je podélné a nepředstavuje energetickou bariéru.

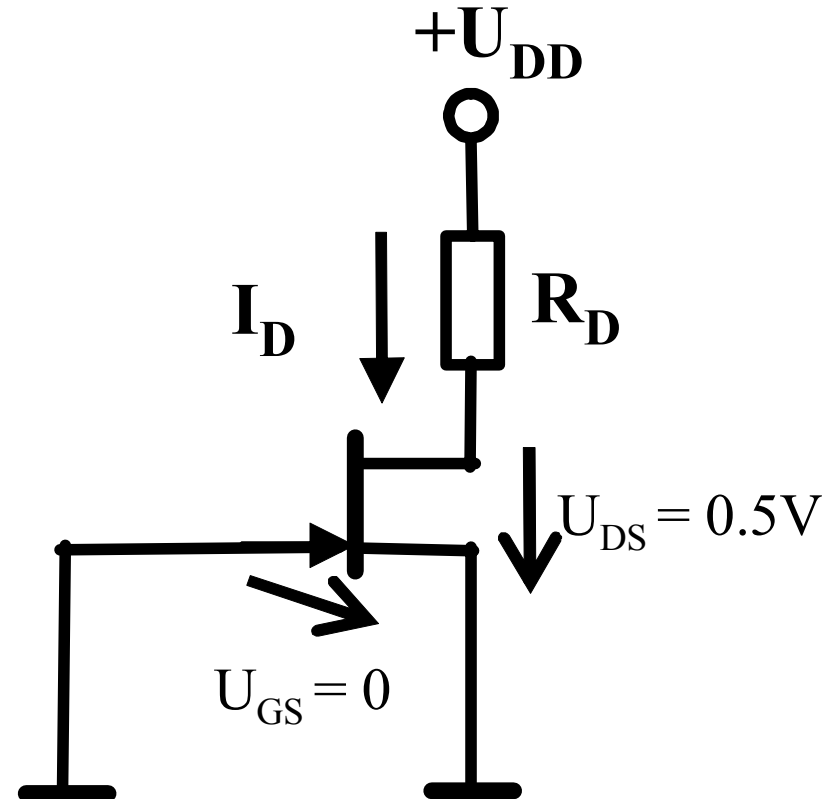
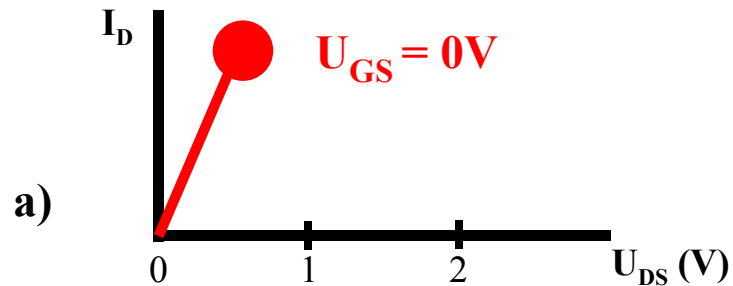
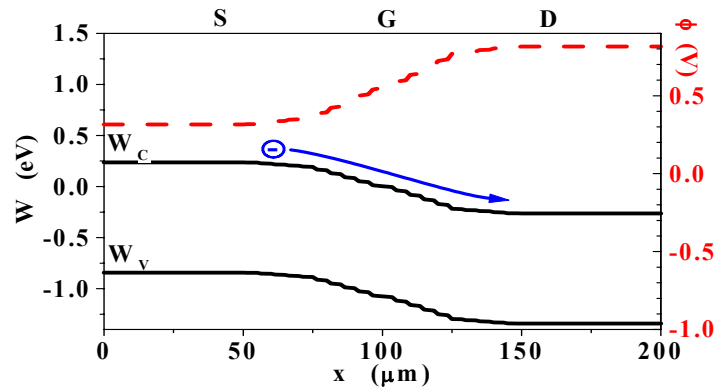
OPN nepředstavuje energetickou bariéru, ale jen oblast velkého odporu a velké intenzity elektrického pole, proto protéká proud.

Proud je tvořen pouze elektrony  $\Rightarrow$  tranzistor je **UNIPOLÁRNÍ**.

# JFET – vliv $U_{GS}$ (příčné el. pole)

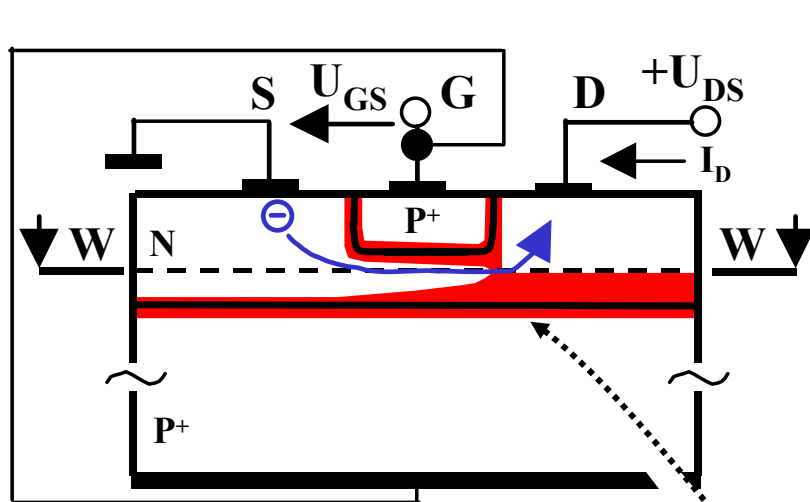


$$U_{GS} = 0V, U_{DS} = 0,5V$$

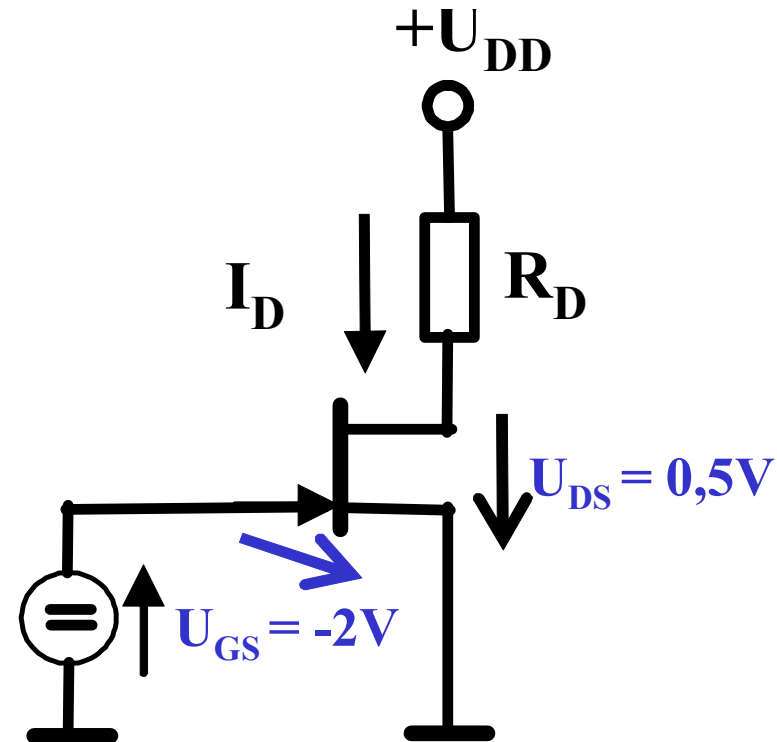
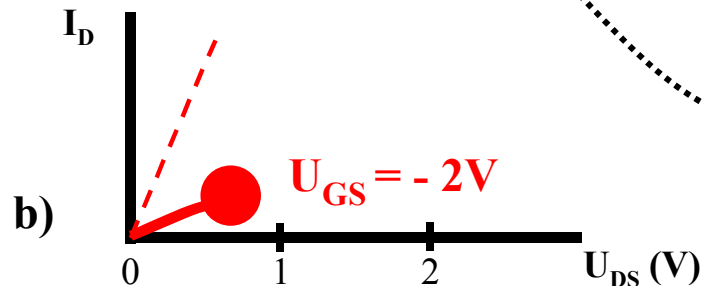
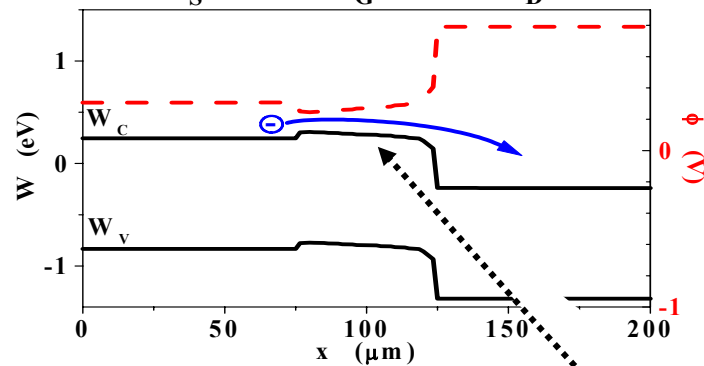


Elektrony přitahovány  
+ potenciálem drainu,  
odpor kanálu je malý  
 $\Rightarrow$  teče proud.

# JFET – vliv $U_{GS}$ (příčné elektrické pole)



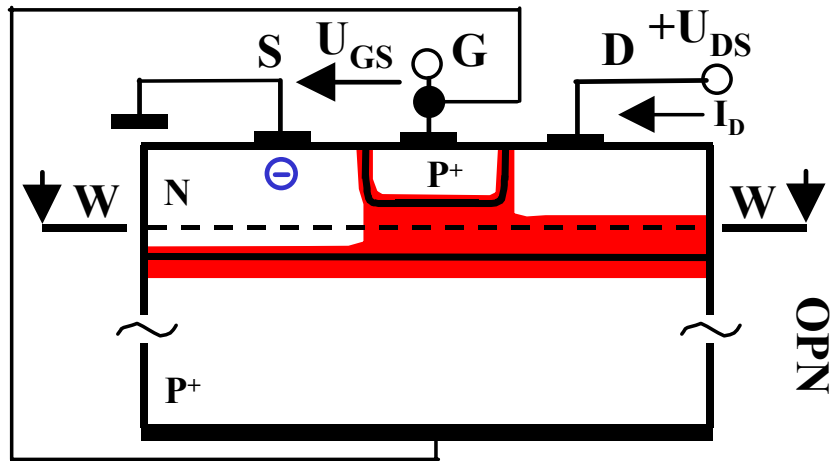
$$U_{GS} = -2V, U_{DS} = 0,5V$$



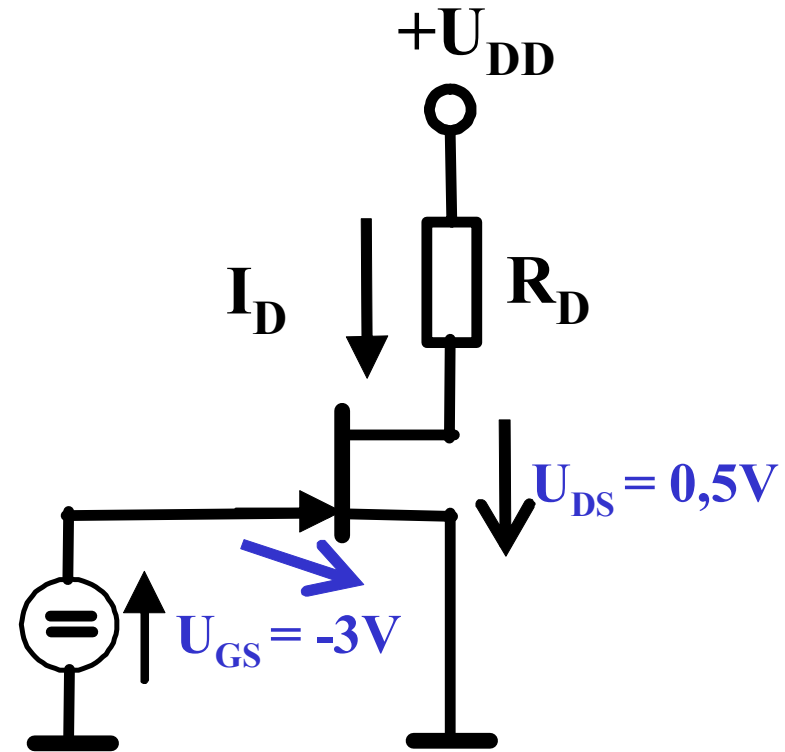
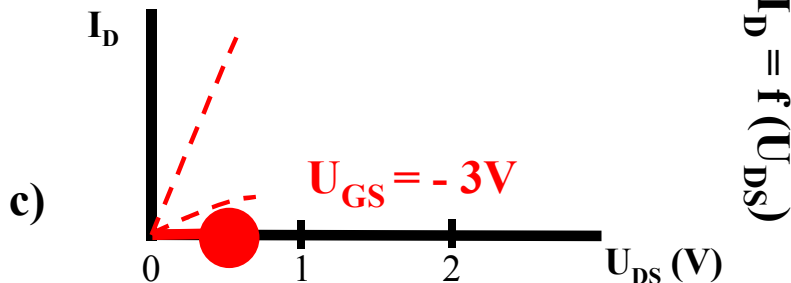
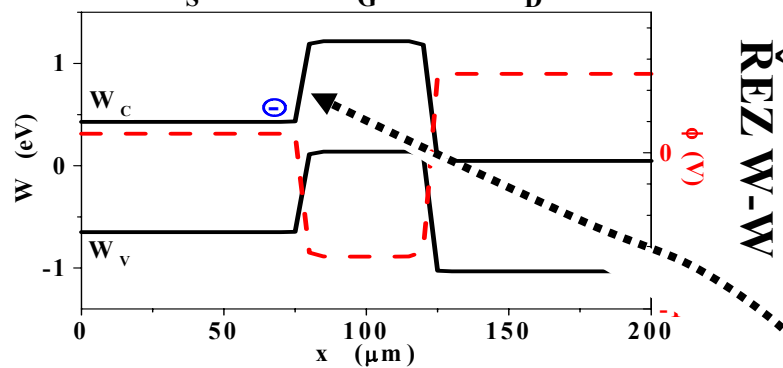
**OPN se rozšíří do kanálu.**  
**Potenciál klesne v příčném směru ↓**  
**od Gate do kanálu.**  
**⇒ zvýší se energetická bariéra**  
**pro elektrony, odpor kanálu roste.**



# JFET – vliv $U_{GS}$ (příčné elektrické pole)

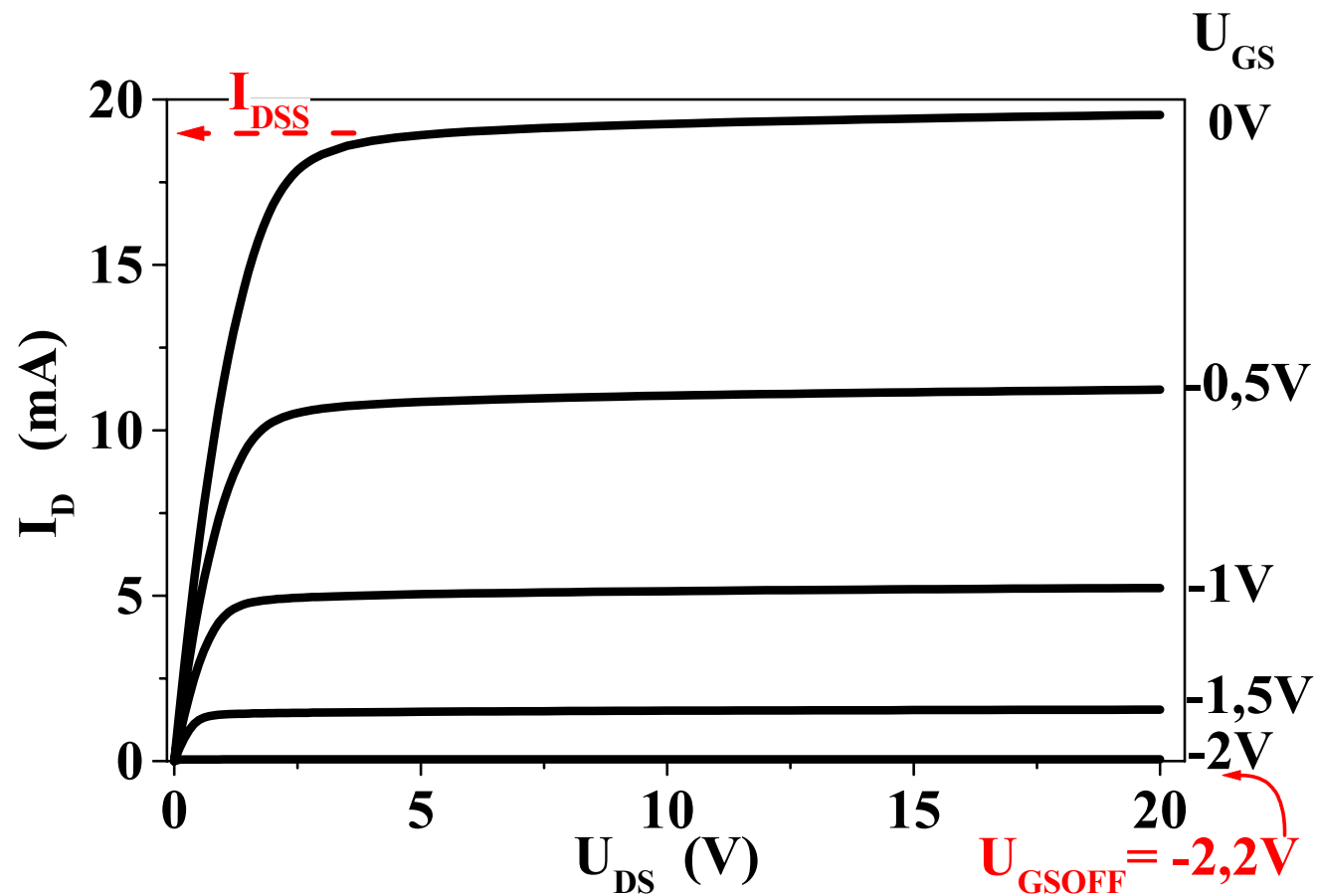


$$U_{GS} = -3V, U_{DS} = 0,5V$$



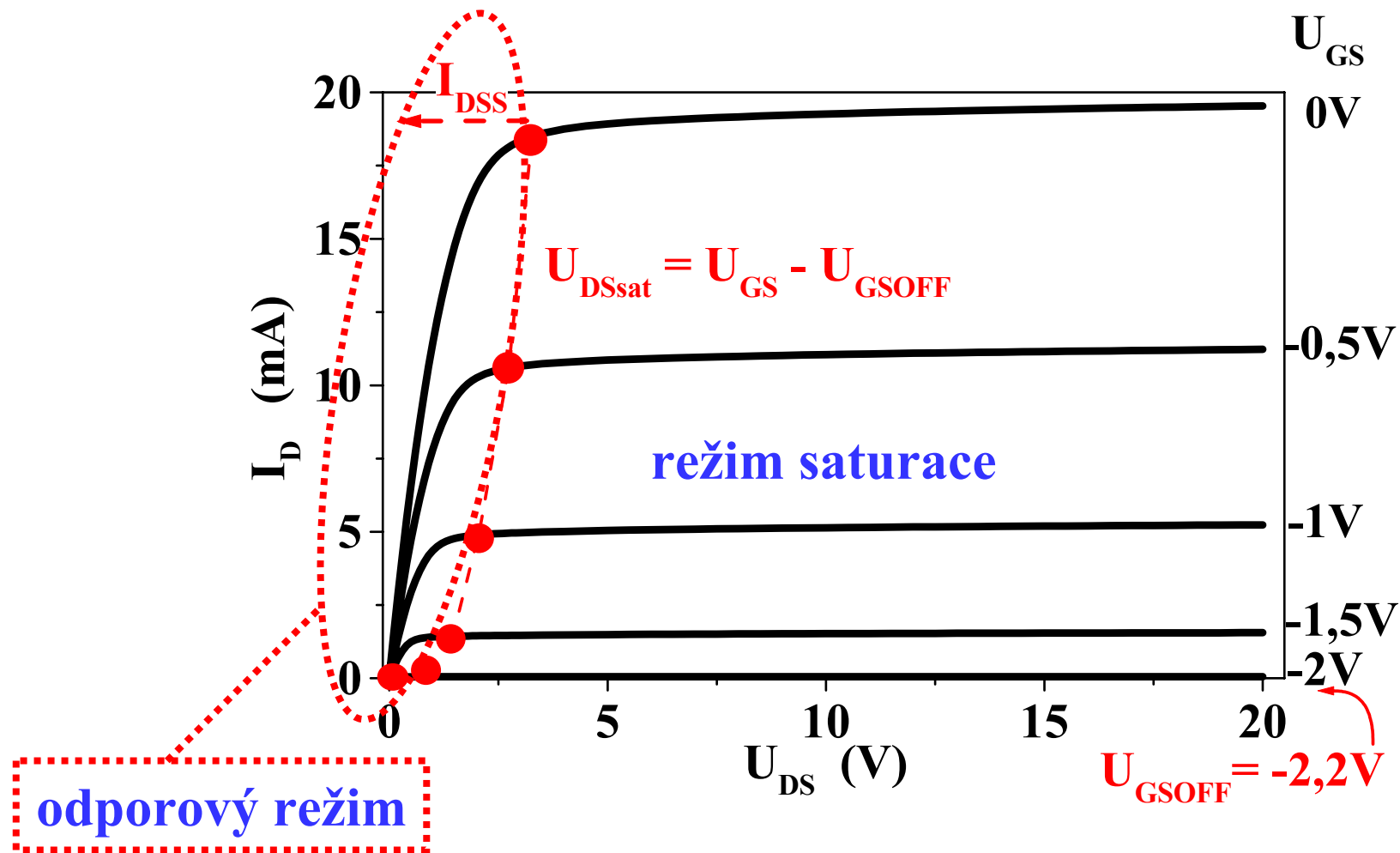
Příčné el. pole  $\downarrow$  způsobí pokles potenciálu po celé délce kanálu  $\Rightarrow$  vzniklou energet. bariéru nemohou elektrony překonat. Úplné uzavření kanálu (Pinch-off).

# JFET – výstupní charakteristika



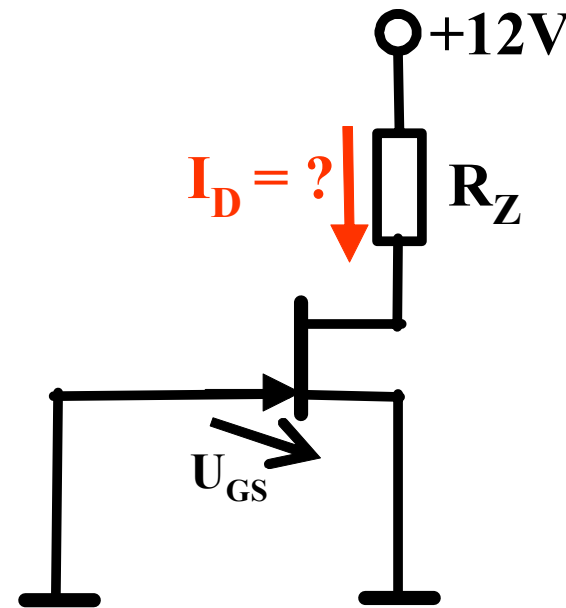
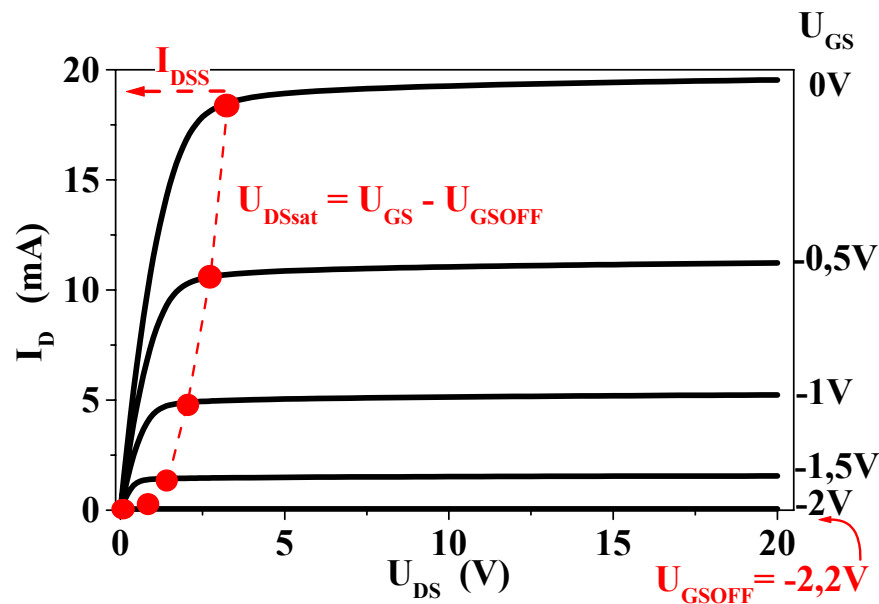
**Tranzistorový jev:**  
napětím  $U_{GS}$  ovládáme proud  $I_D$ .

# JFET – výstupní charakteristika



Saturace nastává při lokálním zaškrcení kanálu u drainu.  
Napětí  $U_{DSsat}$  klesá s rostoucím  $|U_{GS}|$ . Příčné x podélné pole.  
Pro  $U_{GS} = U_{GSOFF}$  je  $U_{DSsat} = 0$ .

# JFET – výstupní charakteristika



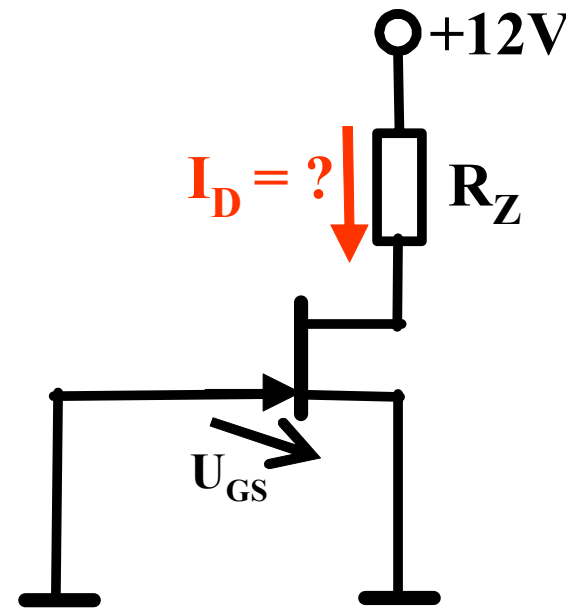
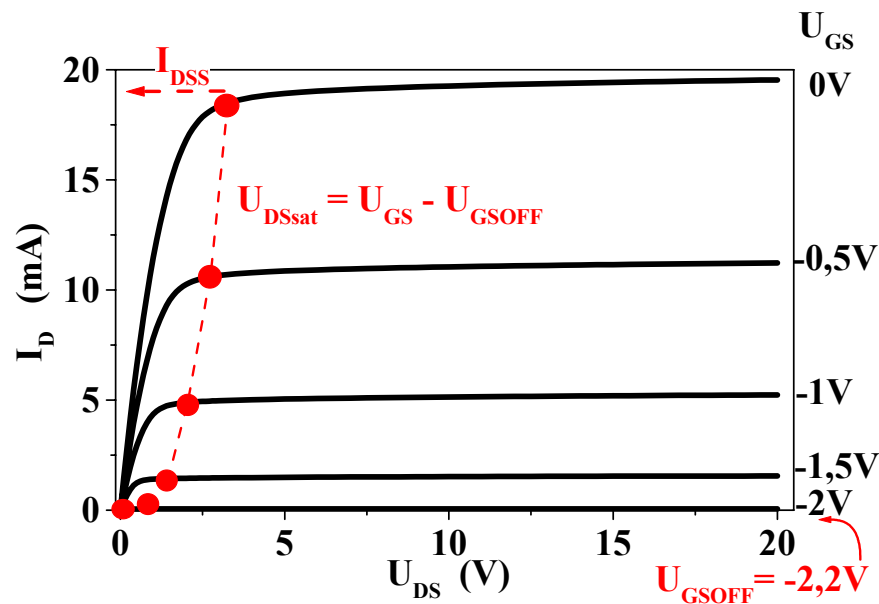
Příklad:  $U_{GS} = ?$ ,  $I_D = ?$

$$U_{GS} = 0$$

$$\Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

$I_{DSS}$  je proud z 1.elektrody (Drain) v indexu do 2.elektrody v indexu (Source) pro v indexech neuvedenou elektrodu (Gate) zkratovanou (Short) na 2.elektrodu v indexu ( $U_{GS}=0$ ).

# JFET jako zdroj konstantního proudu



$$U_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

$I_{DSS}$  je největší proud, který může JFETem protékat!

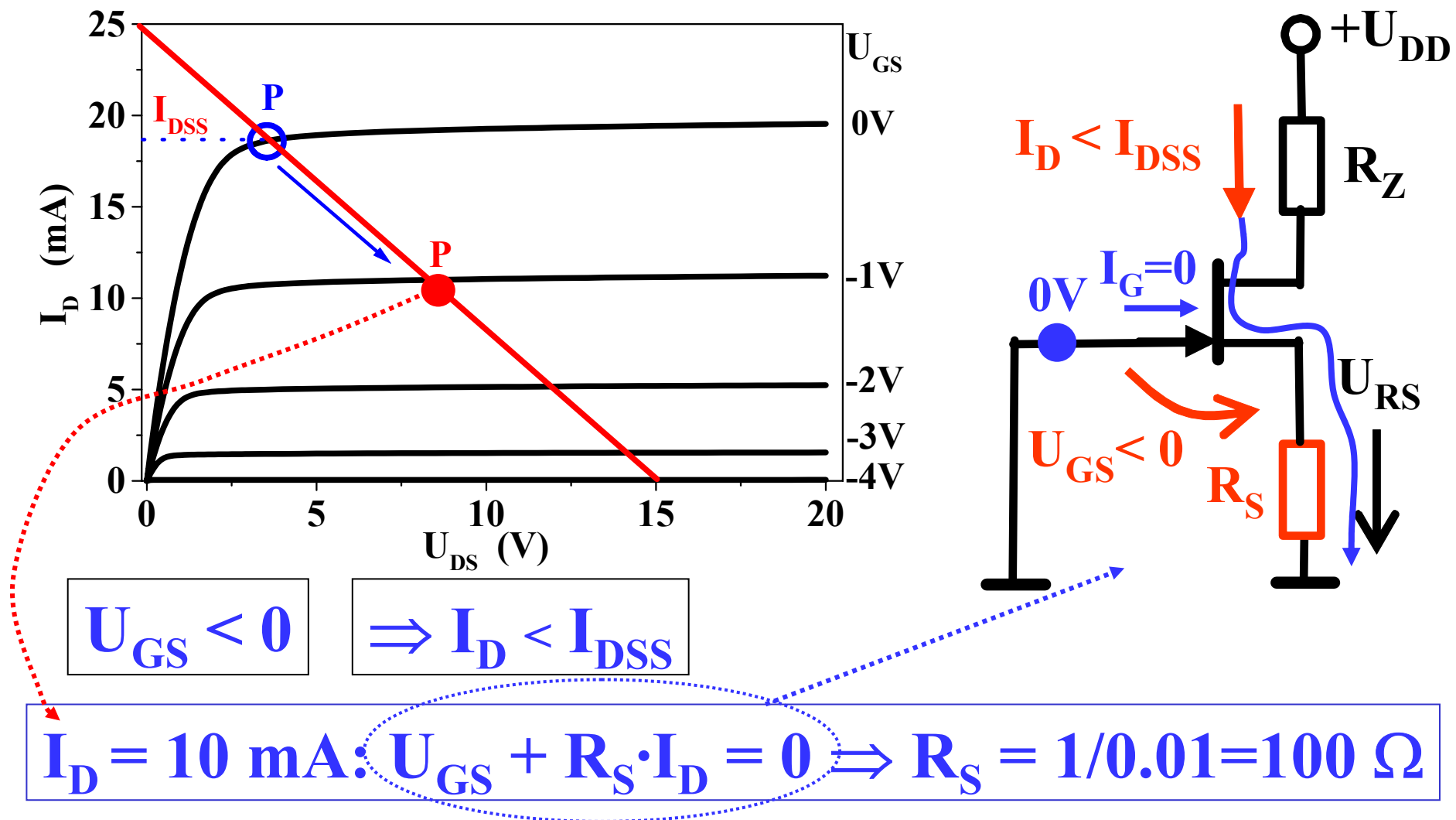
Aplikace: jednoduchý zdroj proudu,  
ale s předem neznámou hodnotou (výrobní rozptyl).

## STATIC CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; unless otherwise specified.

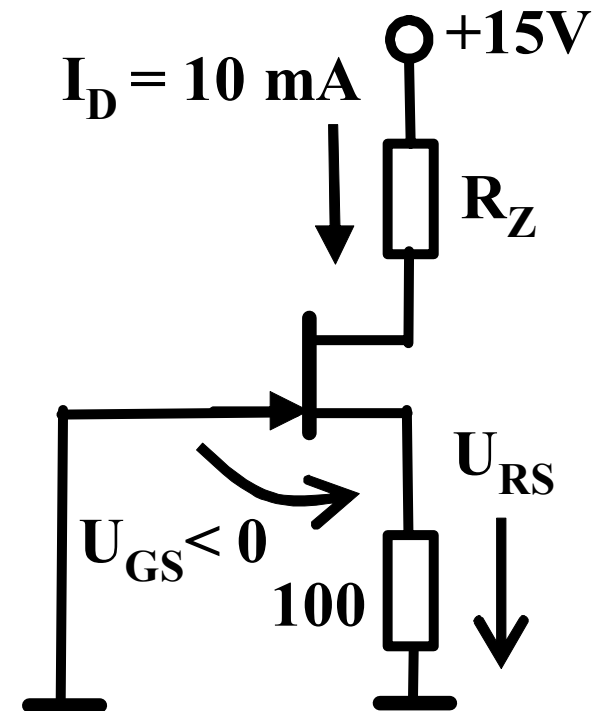
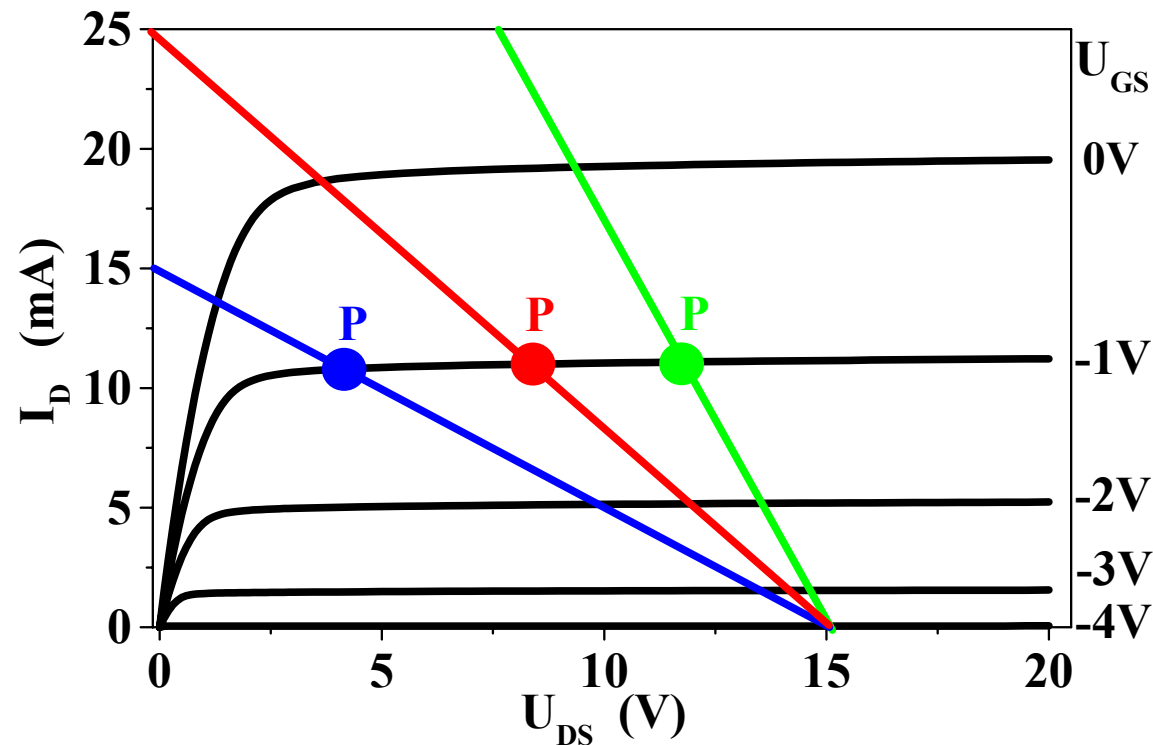
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)GSS}$	gate-source breakdown voltage	$I_G = -1\text{ }\mu\text{A}$ ; $V_{DS} = 0$	-30	–	V
$V_{GSoff}$	gate-source cut-off voltage	$I_D = 10\text{ nA}$ ; $V_{DS} = 15\text{ V}$	-0.25	-8.0	V
$V_{GS}$	gate-source voltage	$I_D = 200\text{ }\mu\text{A}$ ; $V_{DS} = 15\text{ V}$			
	BF245A		-0.4	-2.2	V
	BF245B		-1.6	-3.8	V
	BF245C		-3.2	-7.5	V
$I_{DSS}$	drain current	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; note 1			
	BF245A		2	6.5	mA
	BF245B		6	15	mA
	BF245C		12	25	mA
$I_{GSS}$	gate cut-off current	$V_{GS} = -20\text{ V}$ ; $V_{DS} = 0$	–	-5	nA
		$V_{GS} = -20\text{ V}$ ; $V_{DS} = 0$ ; $T_j = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	–	-0.5	$\mu\text{A}$

# JFET jako zdroj konstantního proudu



Aplikace: jednoduchý zdroj proudu s nastavitelnou hodnotou.

# JFET jako zdroj konstantního proudu



$$I_D = 10 \text{ mA} \Rightarrow R_S = 100 \Omega$$

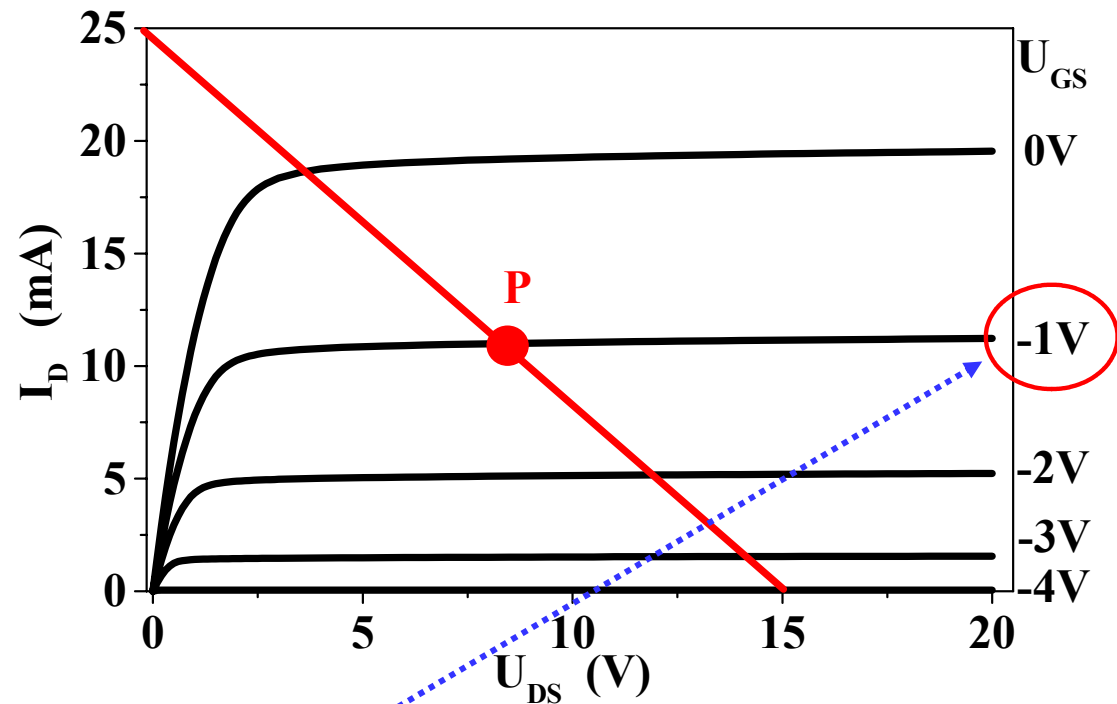
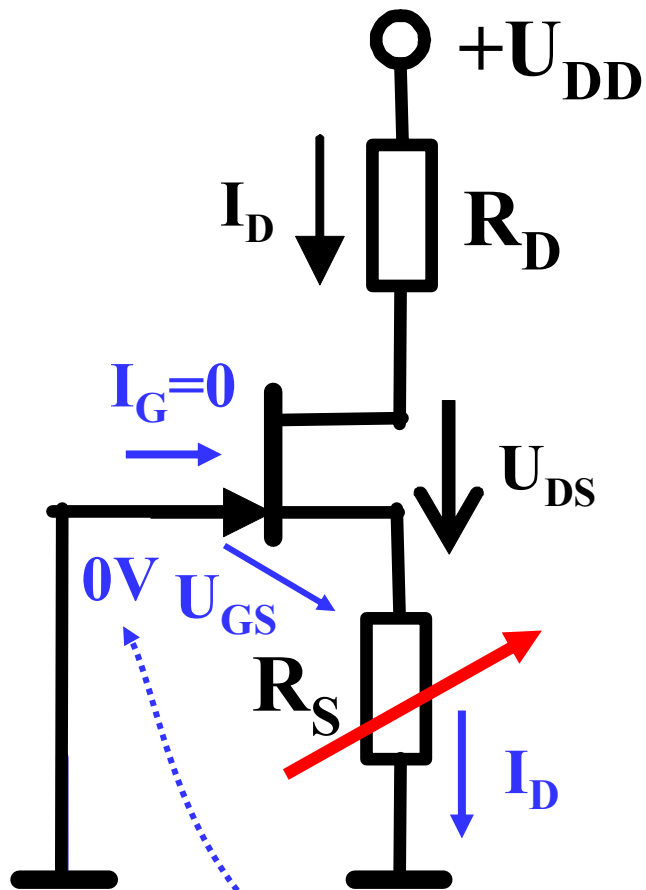
$$R_Z > R_Z > R_Z$$

Jednoduchý zdroj konstantního proudu  
s hodnotou nastavitelnou pomocí  $R_S$ .



# JFET jako zesilovač malého signálu

## 1. **nastavení** ss pracovního bodu ve třídě A ( $U_{DS} = U_{DD}/2$ )

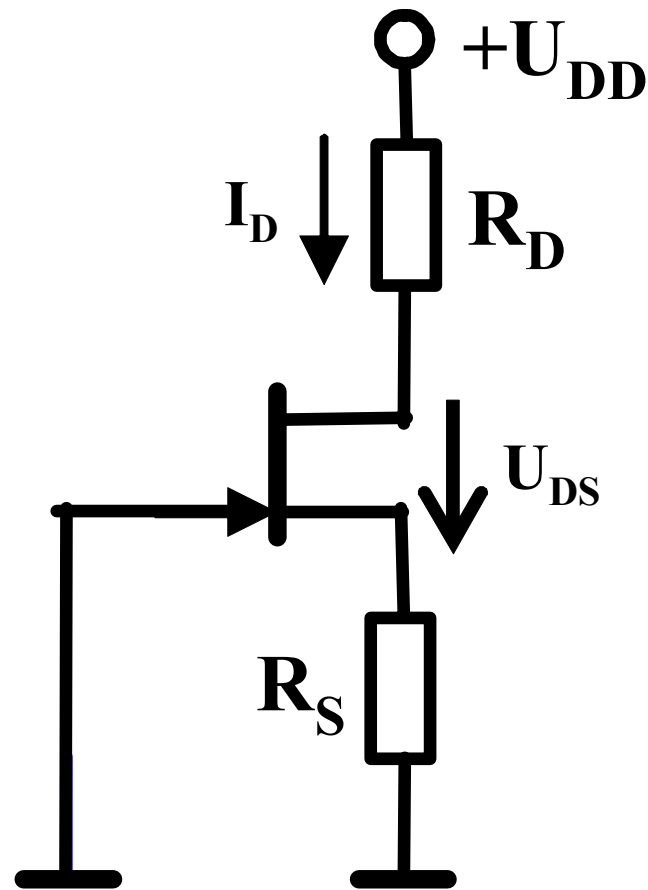


$$U_{GS} + R_S \cdot I_D = 0$$

# JFET jako zesilovač malého signálu

## 2. přivedení harmonického signálu

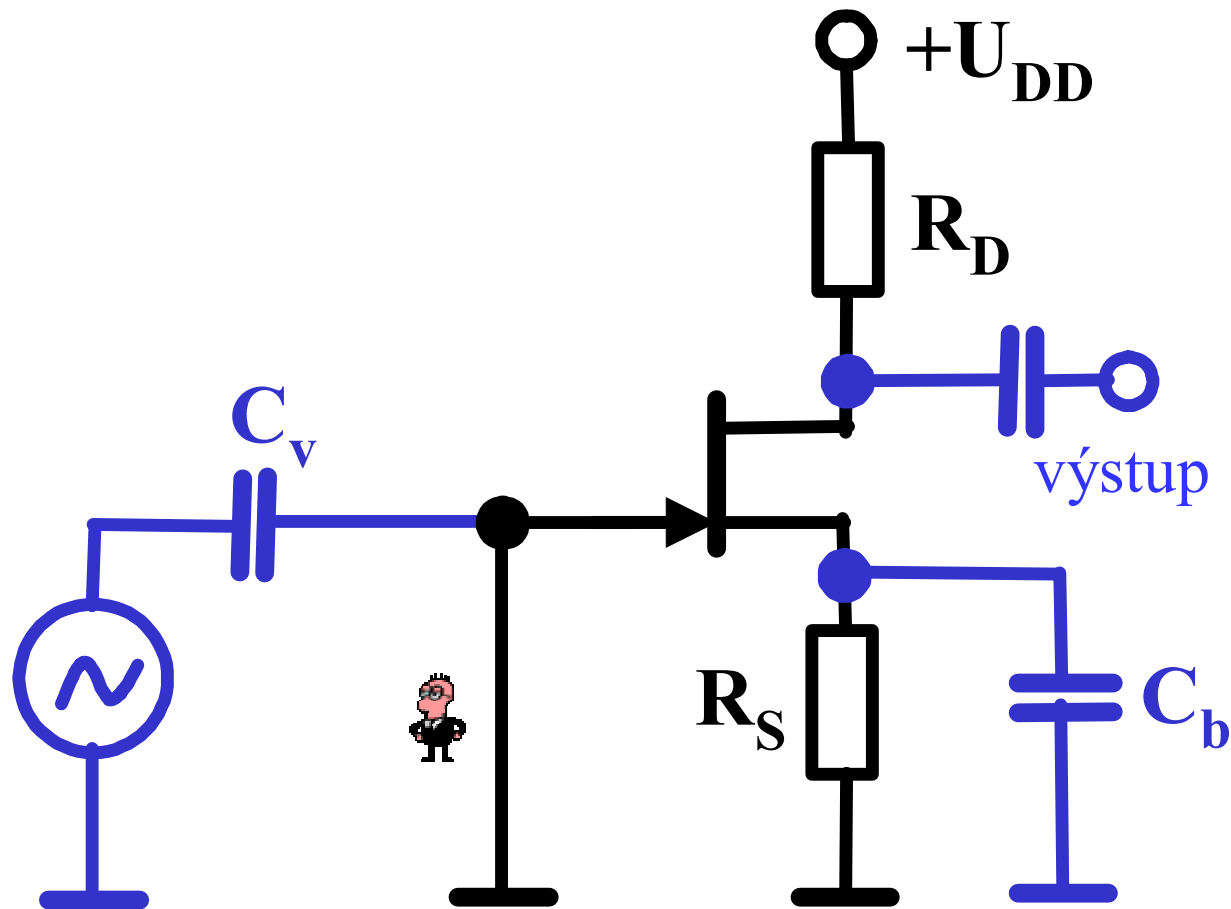
⇒ připojíme generátor, vazební a blokovací kapacitory.



# JFET jako zesilovač malého signálu

## 2. přivedení harmonického signálu

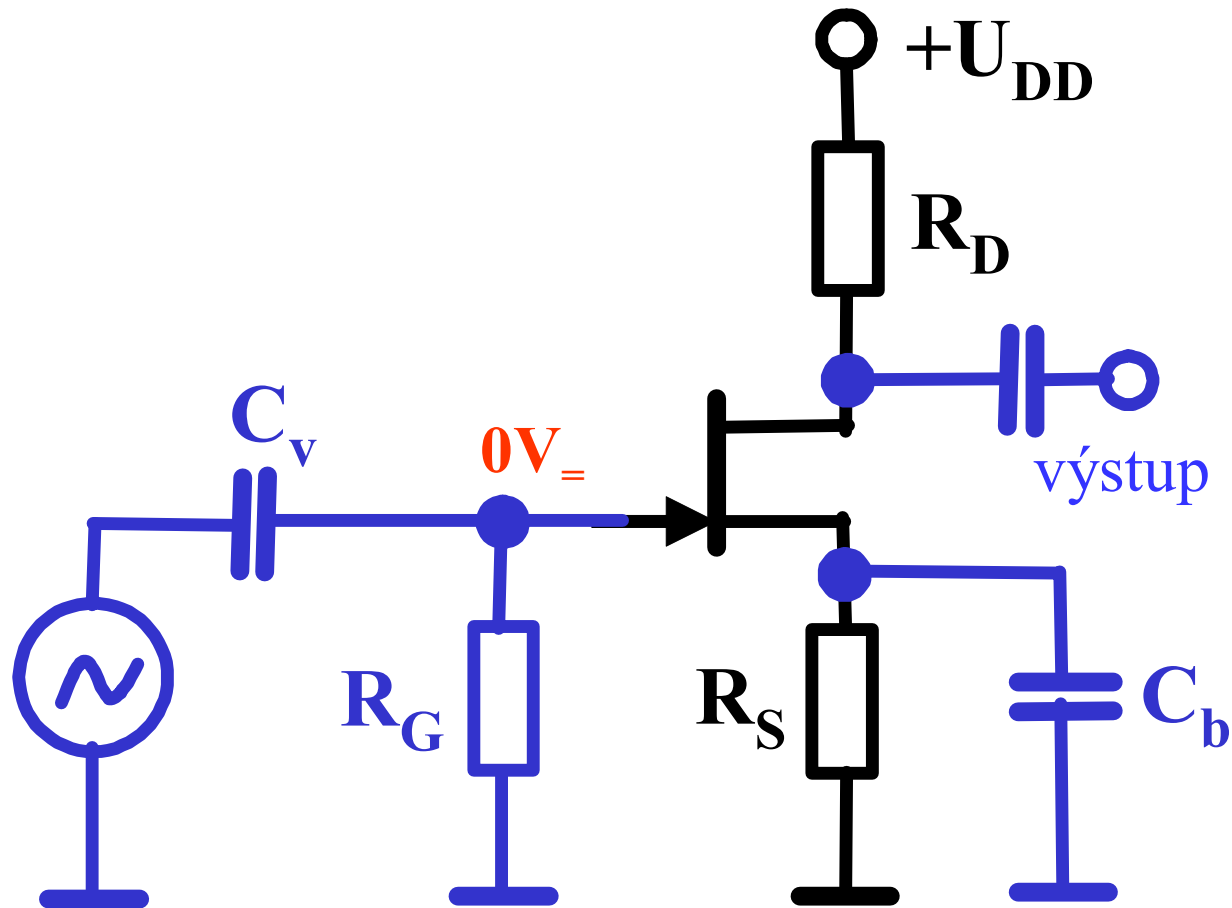
⇒ připojíme generátor, vazební a blokovací kapacitory.



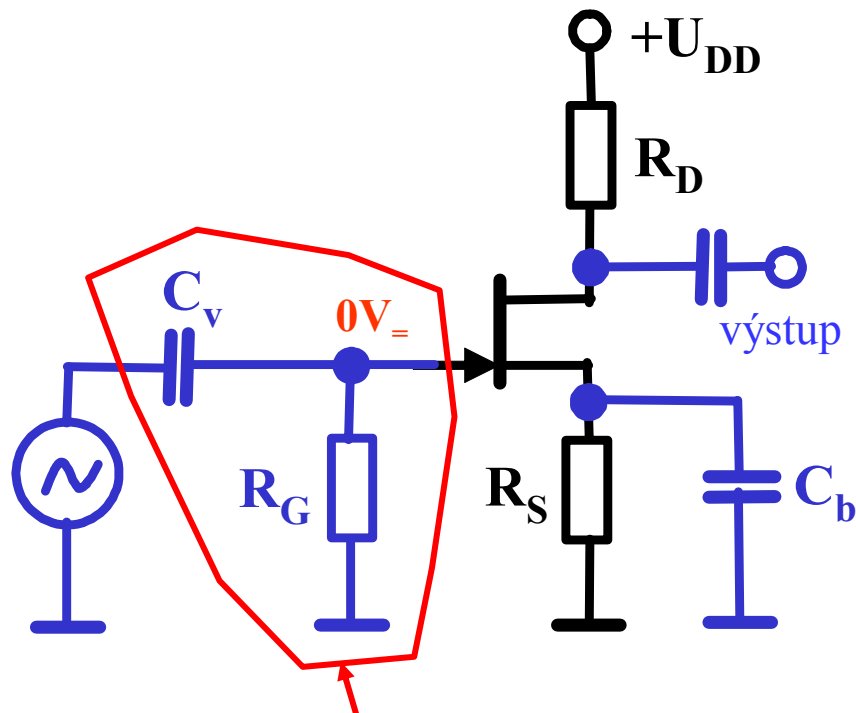
# JFET jako zesilovač malého signálu

## 2. přivedení harmonického signálu

⇒ připojíme generátor, vazební a blokovací kapacitory.



# JFET jako zesilovač malého signálu

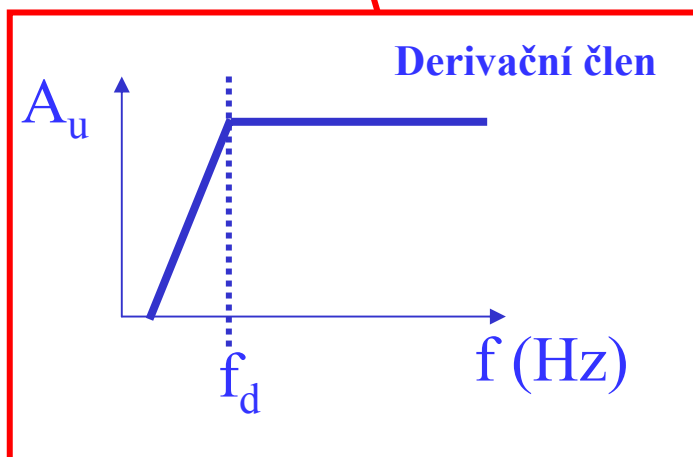


Volba vazebního kapacitoru

$$1/\omega C_v \ll R_G, f = 1\text{kHz}, R_G = 1\text{M}\Omega$$

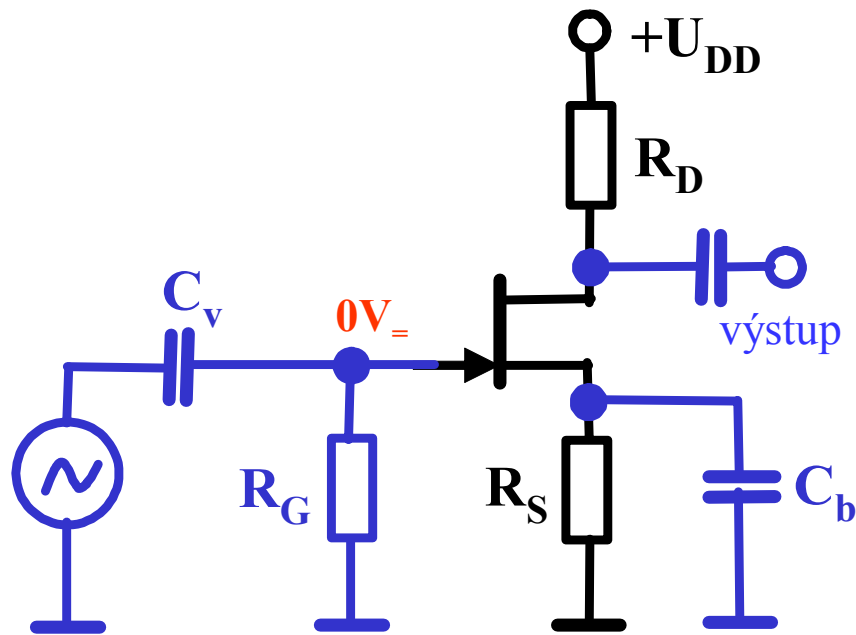
$$C_v \gg 1/(2\pi \cdot f \cdot R_G) = 1/(2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^6)$$
$$C_v \gg 0.16\text{ nF} \Rightarrow C_v \text{ volíme } 1\text{ nF}$$

$C_v$  vychází malé, protože  $R_G$  je veliké.



**mezní kmitočet  $\Leftrightarrow \omega CR = 1$**   
**pokles výstup. napětí o 3dB**

# JFET jako zesilovač malého signálu



Volba blokovacího kapacitoru

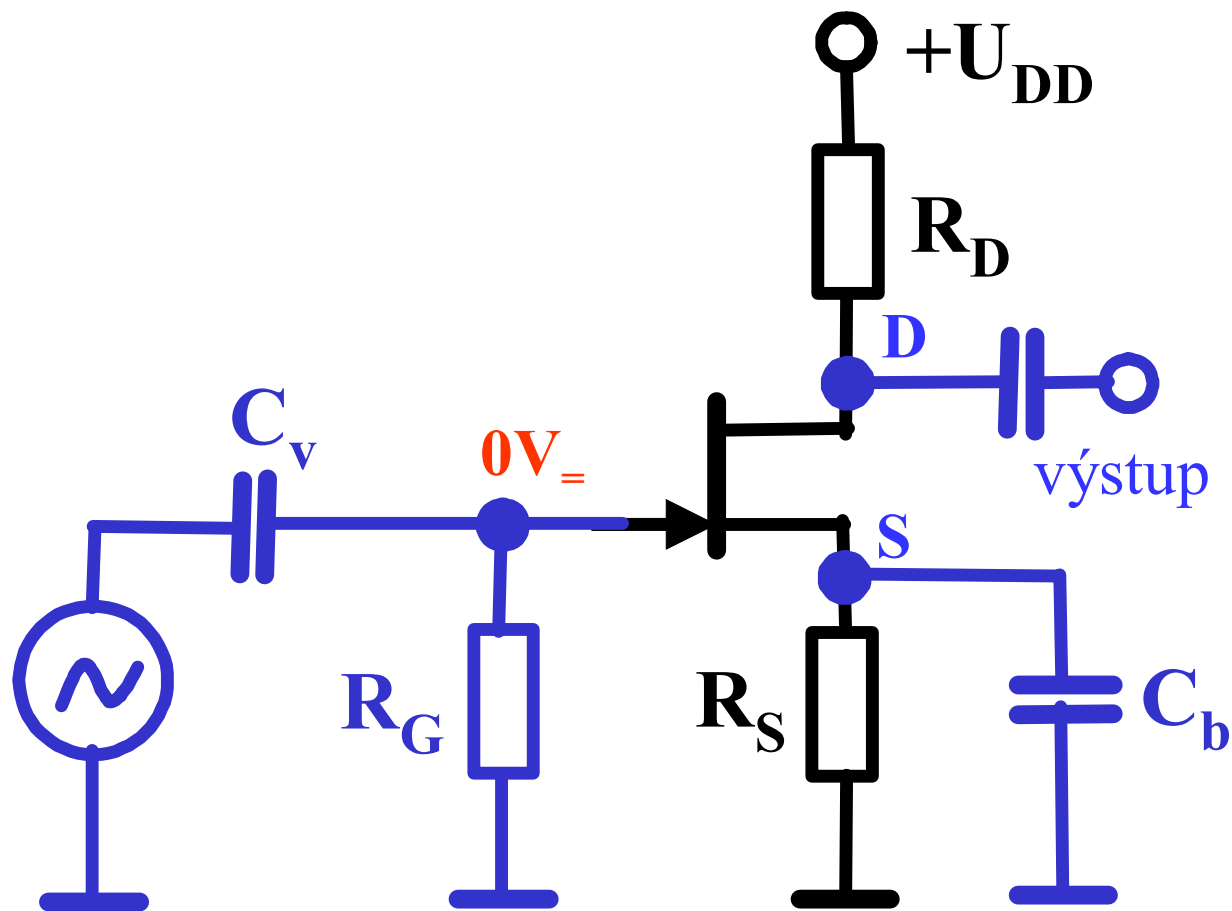
$$1/\omega C_b \ll R_S, f = 1\text{kHz}, R_S = 100\Omega$$

$$C_b \gg 1/(2\pi \cdot f \cdot R_S) = 1/(2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^2)$$
$$C_b \gg 1.6 \mu\text{F} \Rightarrow C_v \text{ volíme } 100 \mu\text{F}$$

$C_b$  vychází velké, protože  $R_S$  je malé.

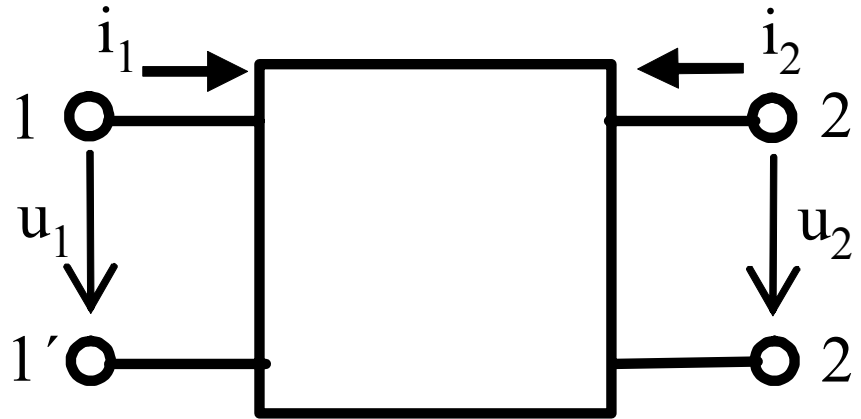
$C_b$  se musí chovat jako zkrat ( $1/\omega C_b \rightarrow 0$ )  
v celém frekvenčním pásmu.

## JFET jako zesilovač malého signálu



Zapojení SS (SE) – INVERTOR!!!

## JFET - NLO



Výhodné jsou y-parametry:

Do vstupu „neteče proud“.

$$i_1 = y_1(u_1, u_2) = 0$$

$$i_2 = y_2(u_1, u_2)$$

Pro změny obvodových veličin (střídavé napětí) zbyde jediná rovnice:

$$\Delta i_2 = y_{21} \Delta u_1 + y_{22} \Delta u_2$$



# JFET - NLO

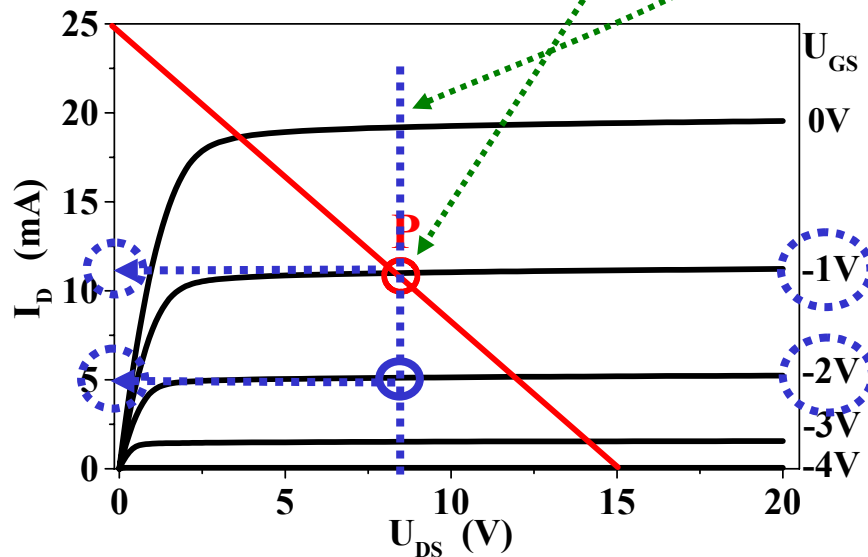
Pro změny obvodových veličin v zapojení SS:

$$\Delta i_D = y_{21s} \Delta u_{GS} + y_{22s} \Delta u_{DS}$$

$\Delta u_{DS} = 0$

$$y_{21s} = \left( \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right)_{\Delta u_{DS}=0, P_0}$$

**Diferenciální strmost**  
při výstupu nakrátko  
Rozměr mA/V (mS).  
Platí  $y_{21} = h_{21} / h_{11}$ .



$$y_{21s} = \left( \frac{(12 - 5) \cdot 10^{-3}}{-1 - (-2)} \right) = 7 \text{ mA/V}$$

# JFET - NLO

Pro změny obvodových veličin v zapojení SS:

$$\Delta i_D = y_{21s} \Delta u_{GS} + y_{22s} \Delta u_{DS}$$

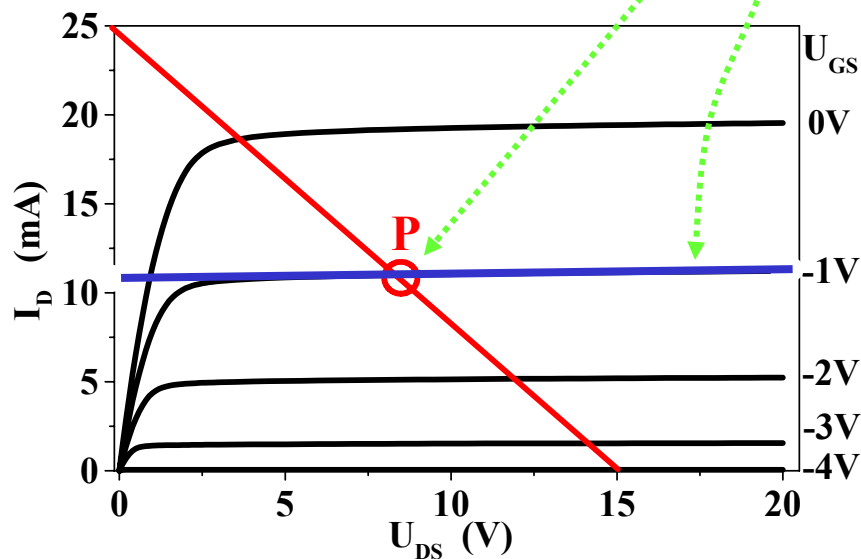
$= 0$

$$y_{22s} = \left( \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{DS}} \right)_{P_0}^{\Delta u_{GS}=0}$$

Výstupní diferenciální vodivost  
při vstupu nakrátko.

Má rozměr vodivosti (S).

Platí  $y_{22} = h_{22} - h_{21} \cdot h_{12} / h_{11}$ .



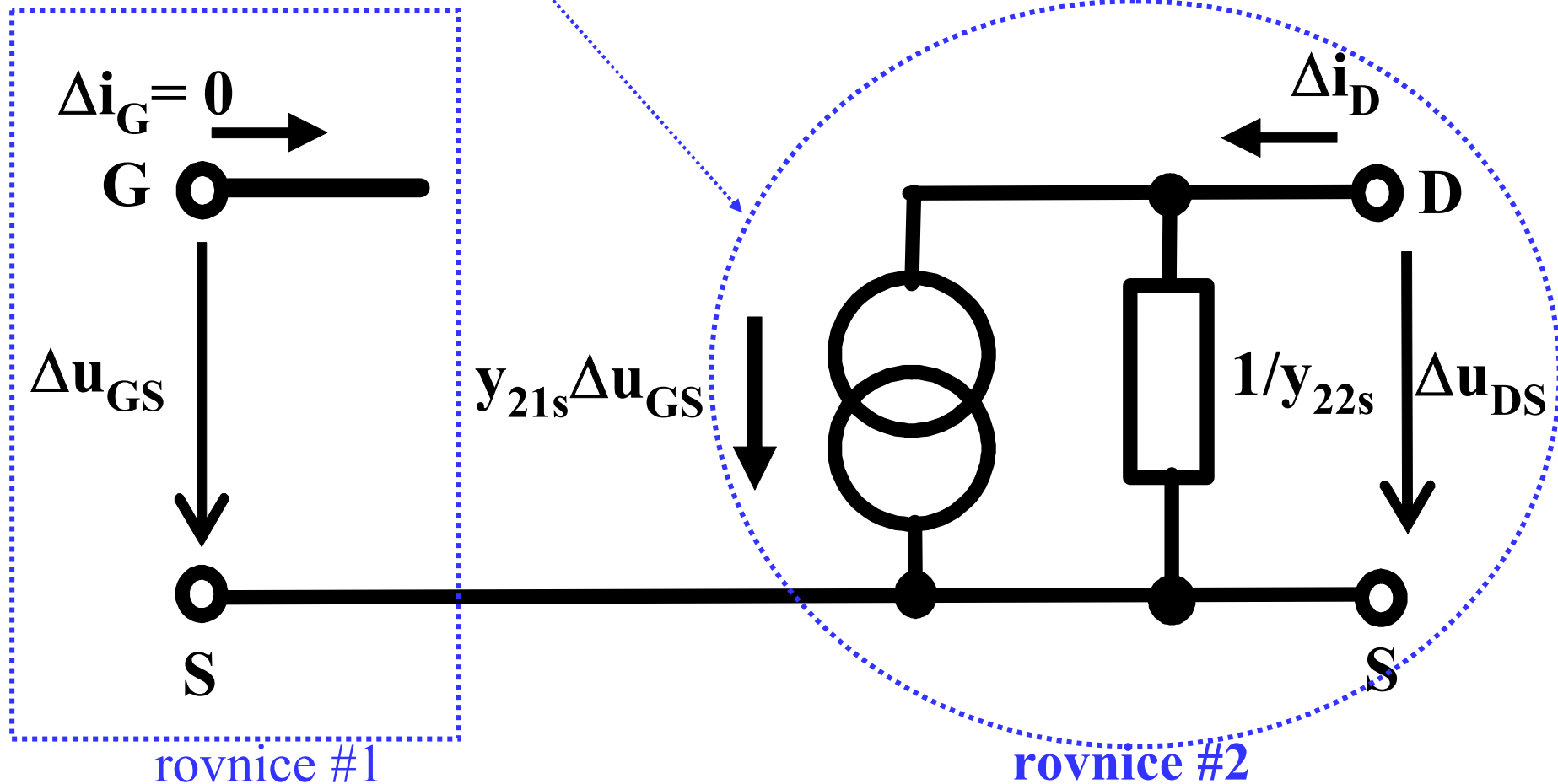
$$y_{22s} = \left( \frac{(12.5 - 12) \cdot 10^{-3}}{20 - 0} \right) = 25 \mu S$$

$1/y_{22s} \sim \text{typicky } 10 - 30 \text{ k}\Omega$

# JFET - NLO

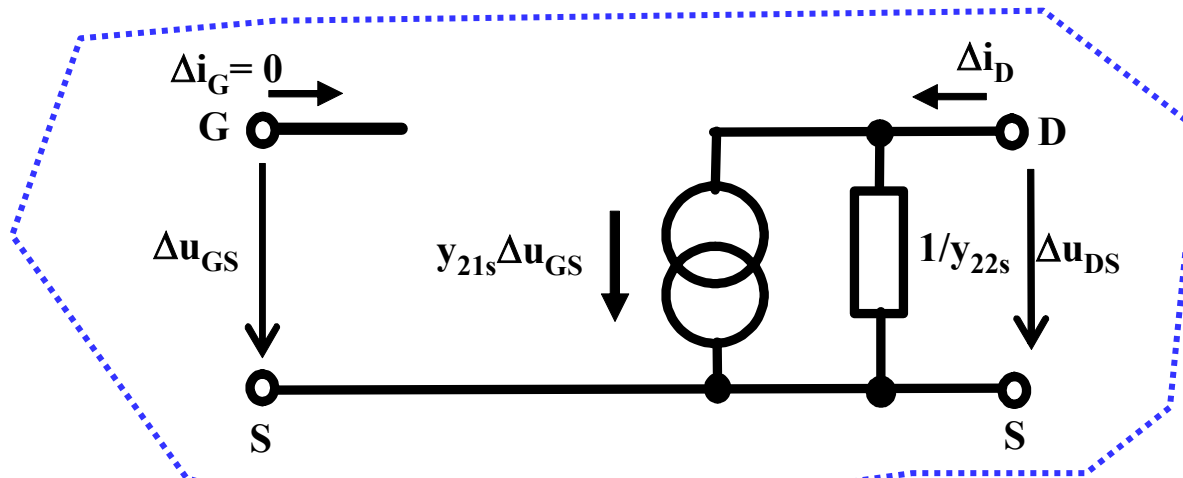
Pro změny obvodových veličin v zapojení SS:

$$\Delta i_D = y_{21s} \Delta u_{GS} + y_{22s} \Delta u_{DS}$$

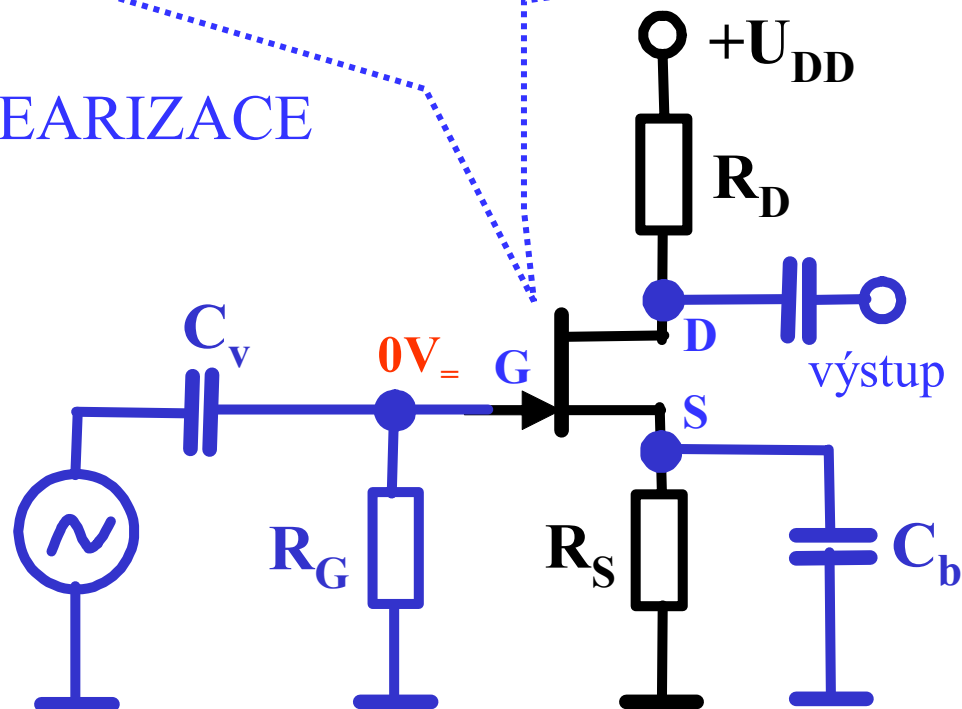


# JFET jako zesilovač

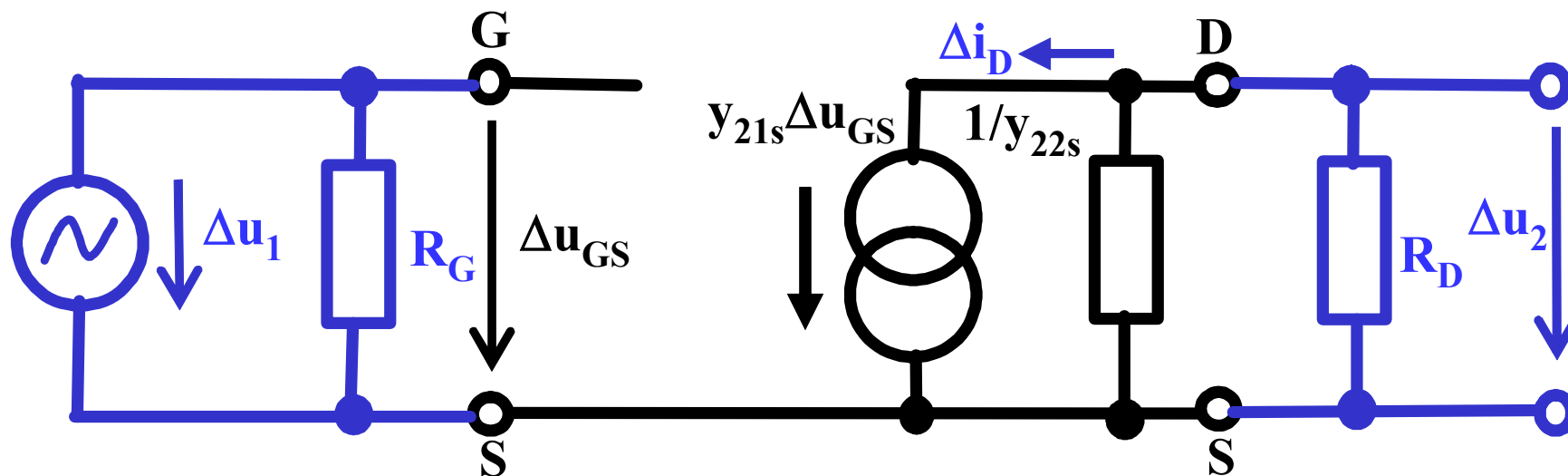
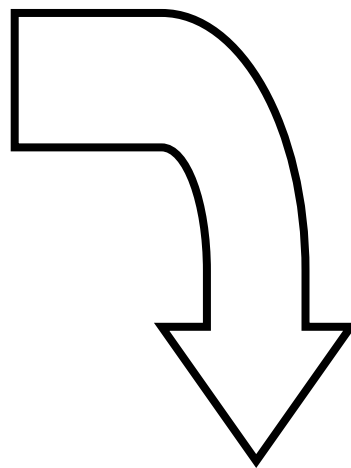
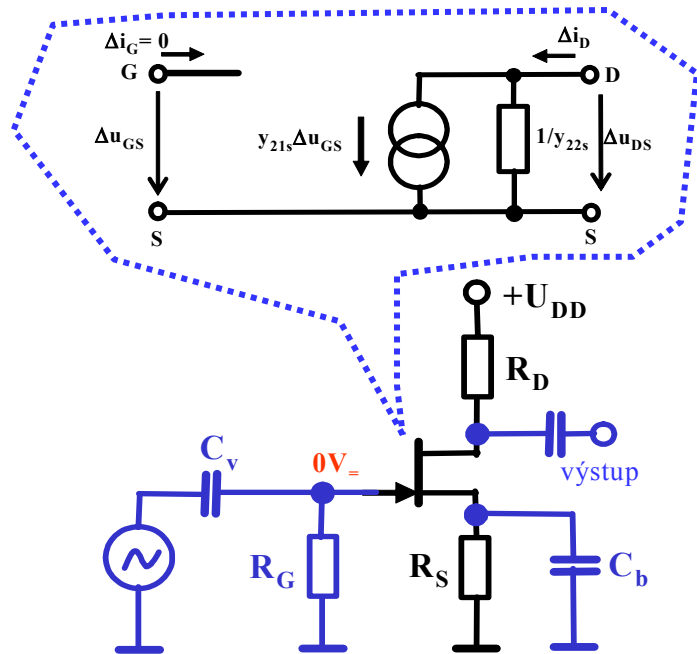
NLO



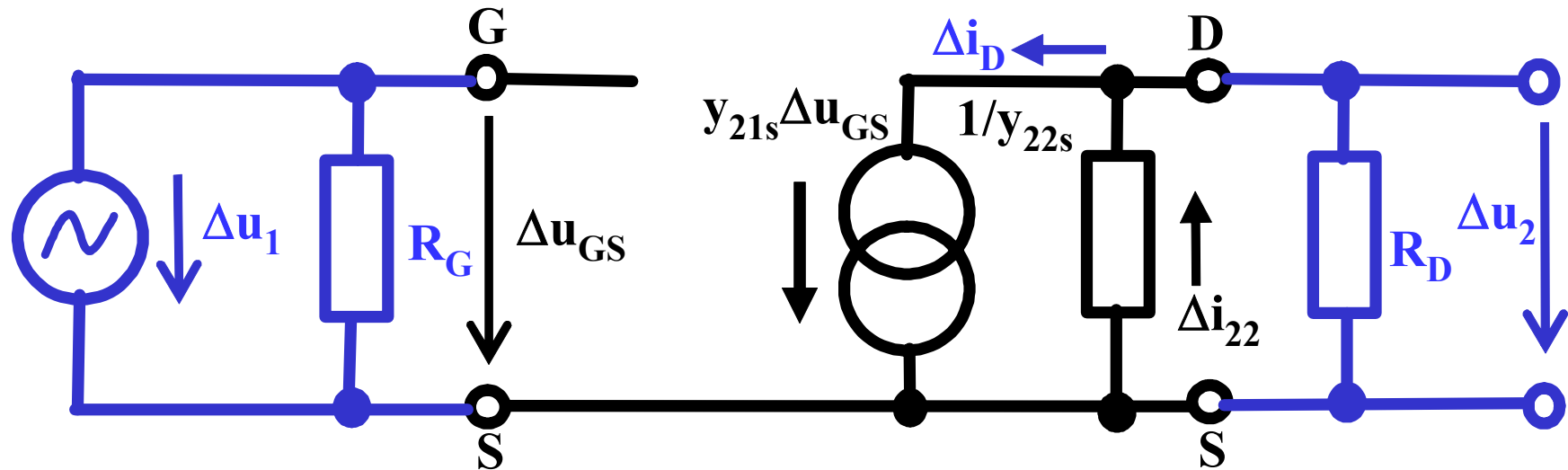
LINEARIZACE



# JFET jako zesilovač



# JFET jako zesilovač



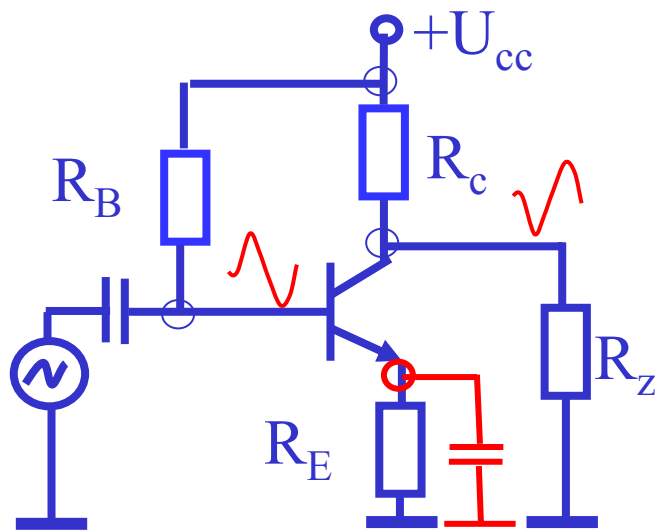
$$\Delta u_1 = \Delta u_{GS}$$

$$\Delta u_2 = - \left( R_D // \frac{1}{y_{22s}} \right) \cdot y_{21s} \cdot \Delta u_{GS}$$

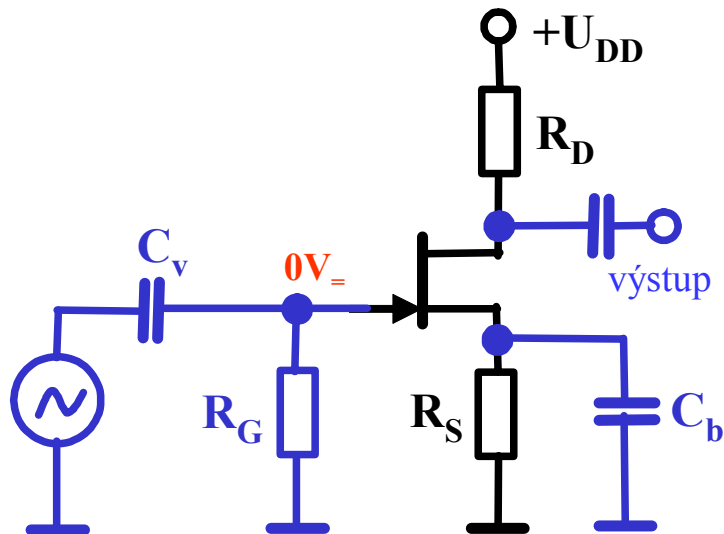
$$A_u = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = - y_{21s} \cdot \left( R_D // \frac{1}{y_{22s}} \right), \quad A_u = - y_{21s} \cdot R_D \quad \text{pro } R_D \ll \frac{1}{y_{22s}}$$

**INVERTOR (SS=SE)**

## Zesilovače



$$A_u = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{h_{11e}} = -y_{21e} \cdot \left( R_C // \frac{1}{h_{22e}} \right)$$

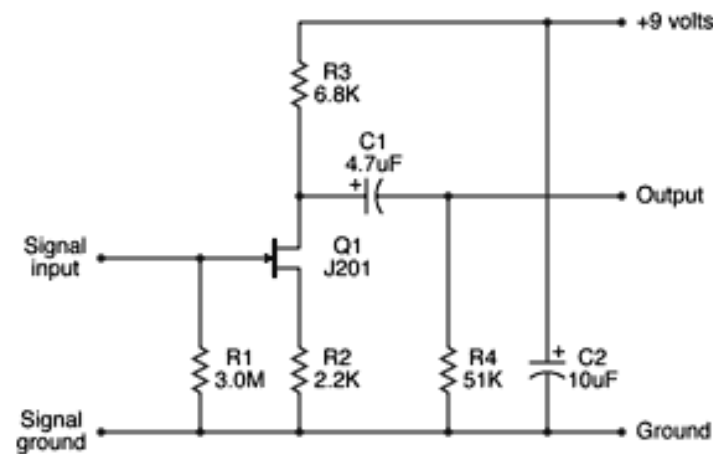


$$A_u = -y_{21s} \cdot \left( R_D // \frac{1}{y_{22s}} \right)$$

**Vzorec vyplývá z konfigurace obvodu, nikoliv typu tranzistoru!**

# JFET & MESFET - aplikace

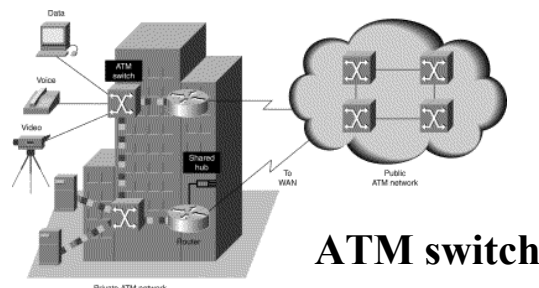
- **Zesilovač malého signálu**  
(malý šum, zejména na nf)



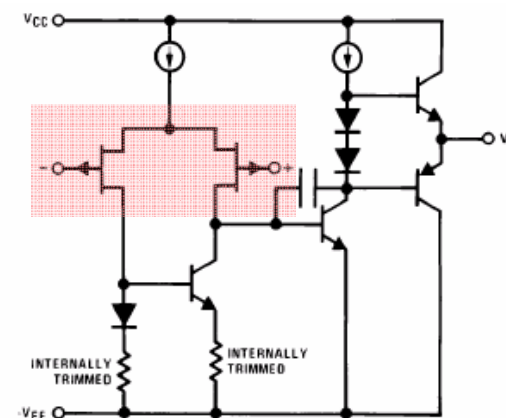
JFET Guitar Preamplifier

- **vf zesilovač malého signálu**  
(velký mezní kmitočet)

- **vf spínač**  
(velký mezní kmitočet)



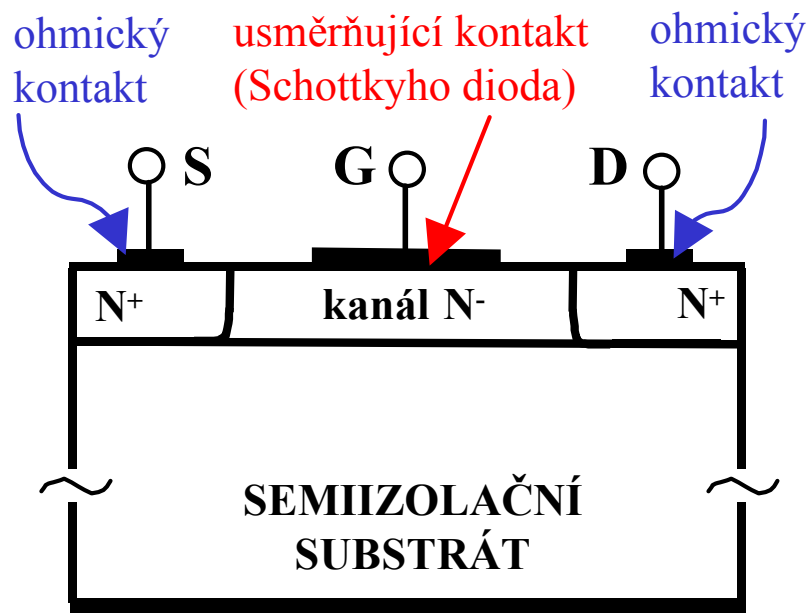
ATM switch



- **Operační zesilovače (zejména vstupní tranzistory)**  
(velký vstupní odpor)



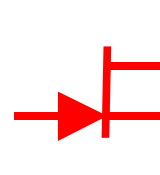
# MESFET (Metal Semiconductor FET)



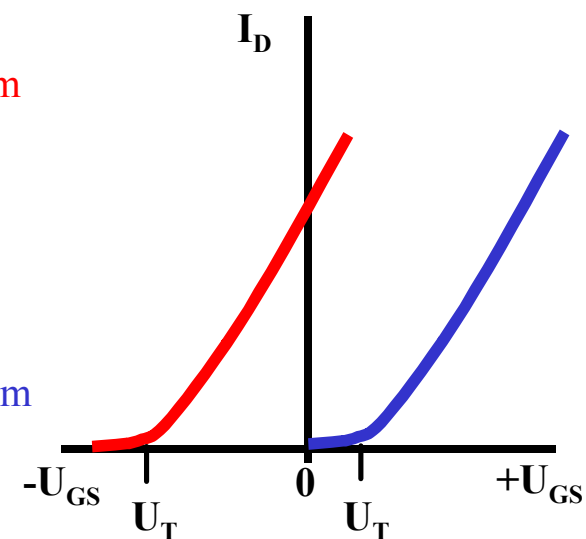
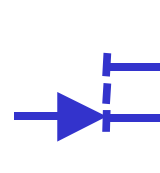
**hloubka kanálu  $> W_{OPN}@0V$**   
Normally ON

**hloubka kanálu  $< W_{OPN}@0.5V$**   
Normally OFF

Kanál N  
Ochuzovací režim

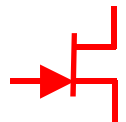


Kanál N  
Obhacovací režim

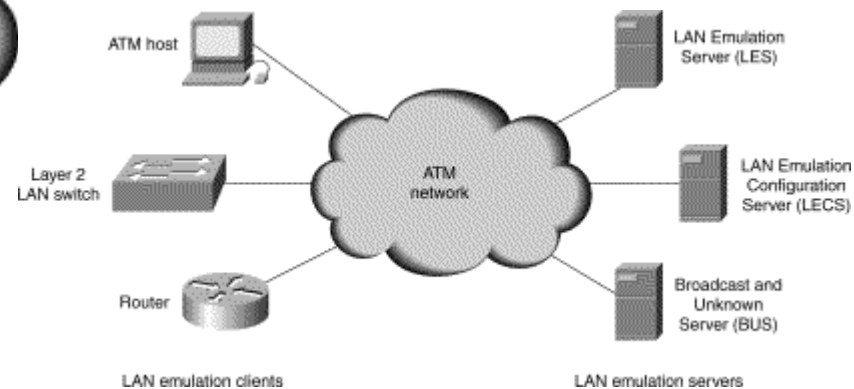
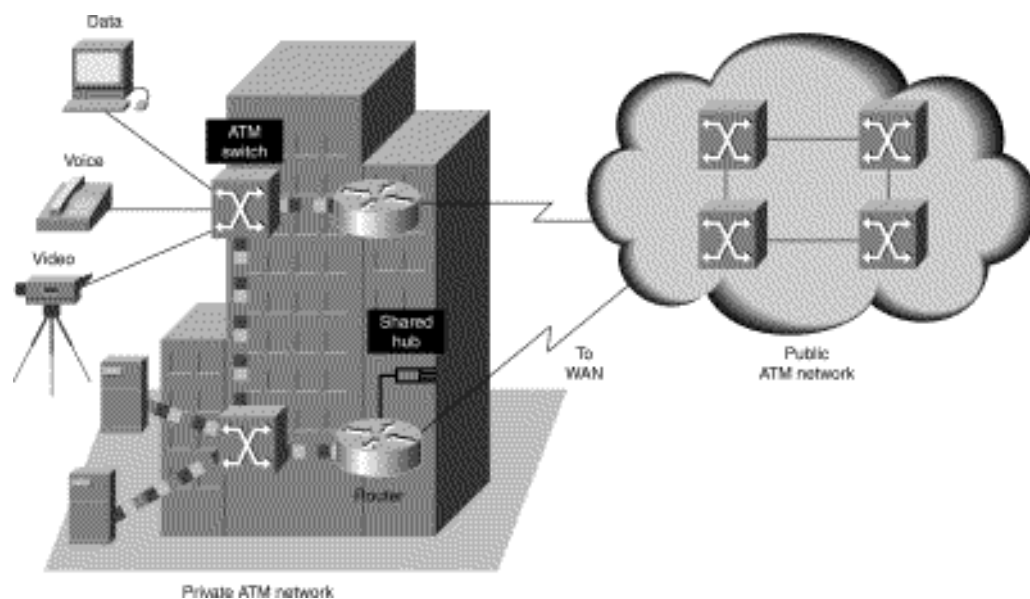
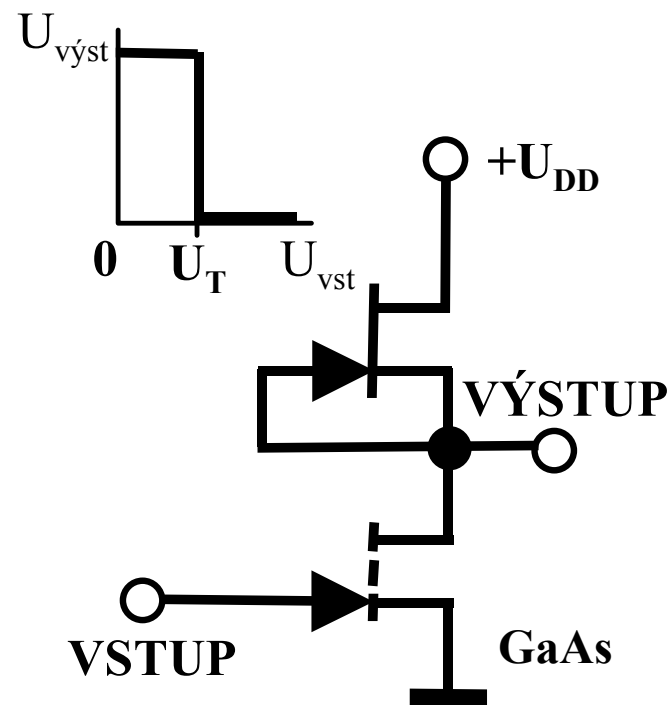
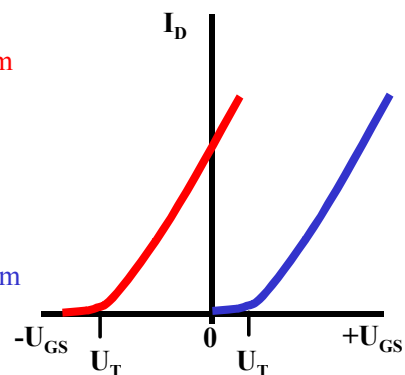
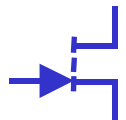


# MESFET - aplikace

Kanál N  
Ochuzovací režim



Kanál N  
Obohacovací režim



# JFET - mezní parametry

N-channel silicon field-effect transistors

BF245A; BF245B; BF245C

## LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{DS}$	drain-source voltage		–	$\pm 30$	V
$V_{GDO}$	gate-drain voltage	open source	–	–30	V
$V_{GSO}$	gate-source voltage	open drain	–	–30	V
$I_D$	drain current		–	25	mA
$I_G$	gate current		–	10	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	up to $T_{amb} = 75\text{ °C}$ ;	–	300	mW
		up to $T_{amb} = 90\text{ °C}$ ; note 1	–	300	mW
$T_{stg}$	storage temperature		–65	+150	°C
$T_j$	operating junction temperature		–	150	°C

# JFET - charakteristické parametry

## STATIC CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)GSS}$	gate-source breakdown voltage	$I_G = -1\text{ }\mu\text{A}$ ; $V_{DS} = 0$	-30	–	V
$V_{GSoff}$	gate-source cut-off voltage	$I_D = 10\text{ nA}$ ; $V_{DS} = 15\text{ V}$	-0.25	-8.0	V
$V_{GS}$	gate-source voltage	$I_D = 200\text{ }\mu\text{A}$ ; $V_{DS} = 15\text{ V}$			
	BF245A		-0.4	-2.2	V
	BF245B		-1.6	-3.8	V
	BF245C		-3.2	-7.5	V
$I_{DSS}$	drain current	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; note 1			
	BF245A		2	6.5	mA
	BF245B		6	15	mA
	BF245C		12	25	mA
$I_{GSS}$	gate cut-off current	$V_{GS} = -20\text{ V}$ ; $V_{DS} = 0$	–	-5	nA
		$V_{GS} = -20\text{ V}$ ; $V_{DS} = 0$ ; $T_j = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	–	-0.5	$\mu\text{A}$

velký rozptyl parametrů – typ. vlastnost JFETů

# JFET - dynamické parametry

## DYNAMIC CHARACTERISTICS

Common source;  $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$C_{is}$	input capacitance	$V_{DS} = 20\text{ V}$ ; $V_{GS} = -1\text{ V}$ ; $f = 1\text{ MHz}$	–	4	–	pF
$C_{rs}$	reverse transfer capacitance	$V_{DS} = 20\text{ V}$ ; $V_{GS} = -1\text{ V}$ ; $f = 1\text{ MHz}$	–	1.1	–	pF
$C_{os}$	output capacitance	$V_{DS} = 20\text{ V}$ ; $V_{GS} = -1\text{ V}$ ; $f = 1\text{ MHz}$	–	1.6	–	pF
$g_{is}$	input conductance	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 200\text{ MHz}$	–	250	–	$\mu\text{S}$
$g_{os}$	output conductance	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 200\text{ MHz}$	–	40	–	$\mu\text{S}$
$ y_{fs} $	forward transfer admittance	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 1\text{ kHz}$	3	–	6.5	mS
		$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 200\text{ MHz}$	–	6	–	mS
$ y_{rs} $	reverse transfer admittance	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 200\text{ MHz}$	–	1.4	–	mS
$ y_{os} $	output admittance	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 1\text{ kHz}$	–	25	–	$\mu\text{S}$
$f_{gfs}$	cut-off frequency	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $g_{fs} = 0.7$ of its value at 1 kHz	–	700	–	MHz
F	noise figure	$V_{DS} = 15\text{ V}$ ; $V_{GS} = 0$ ; $f = 100\text{ MHz}$ ; $R_G = 1\text{ k}\Omega$ (common source); input tuned to minimum noise	–	1.5	–	dB