

7.1 MOSFET výstupní charakteristika

Dlouhý a krátký kanál, Earlyho jev, modely, průřez

7.2 MOSFET typy tranzistorů

Indukovaný a zabudovaný kanál typu P a N, charakteristiky, značení

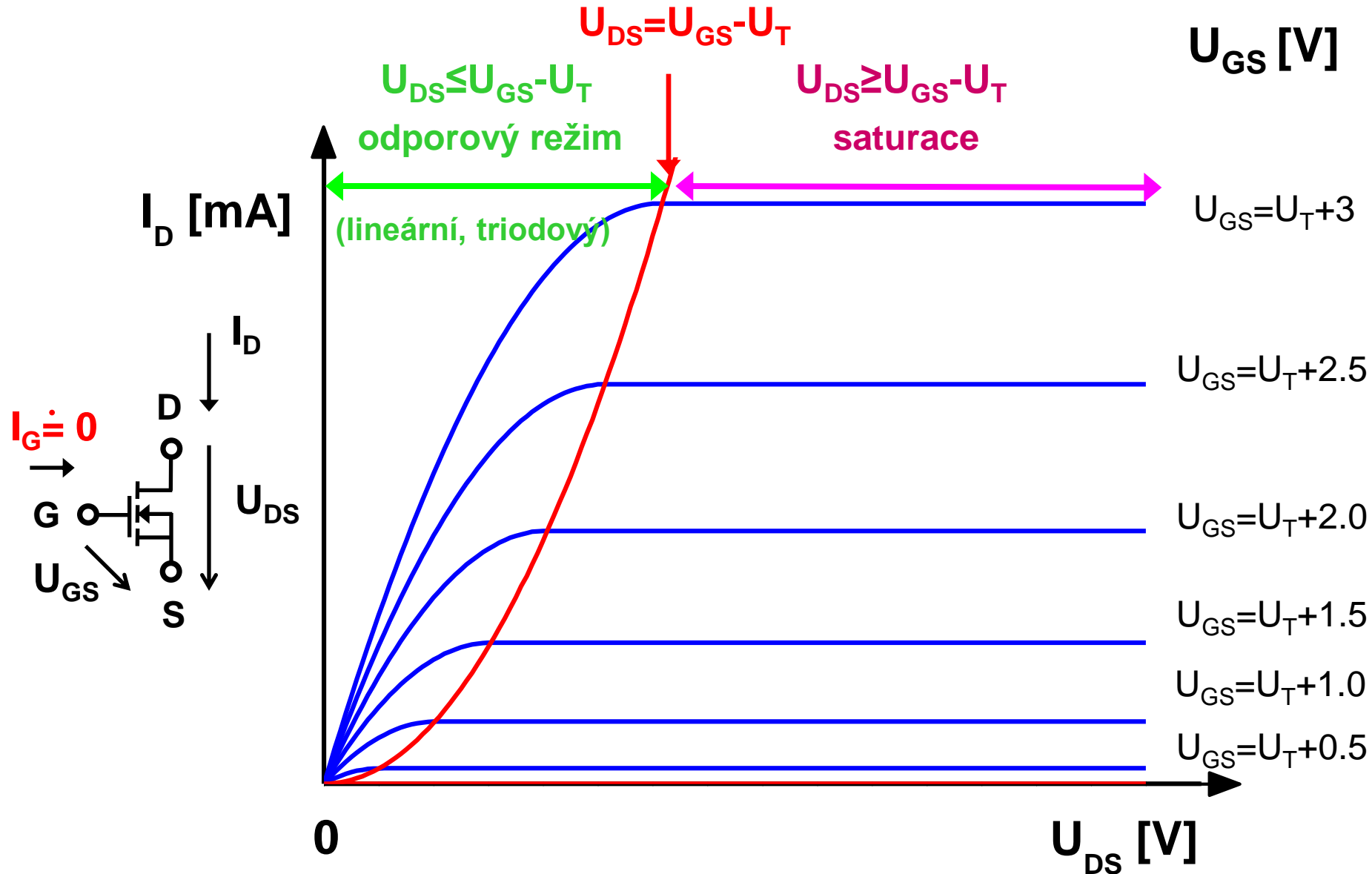
7.3 MOSFET v obvodu

Parametry, pracovní bod, jeho volba a nastavení

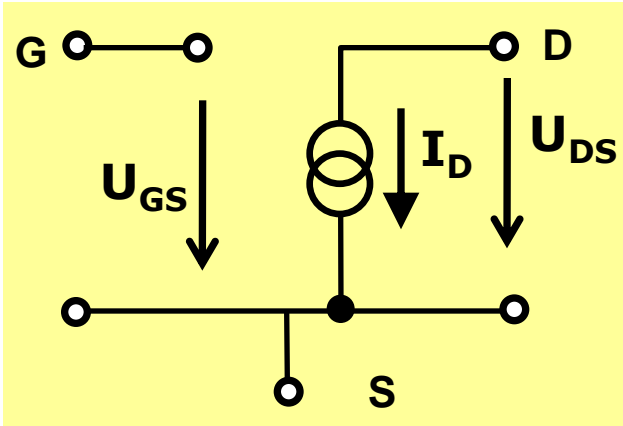
7.4 MOSFET jako zesilovač

Princip, náhradní lineární model, určení parametrů, vf model, PSpice model

7.1 MOSFET výstupní charakteristika dlouhý kanál



7.1 MOSFET statický model PSpice Level 1 (Schichman-Hodges)

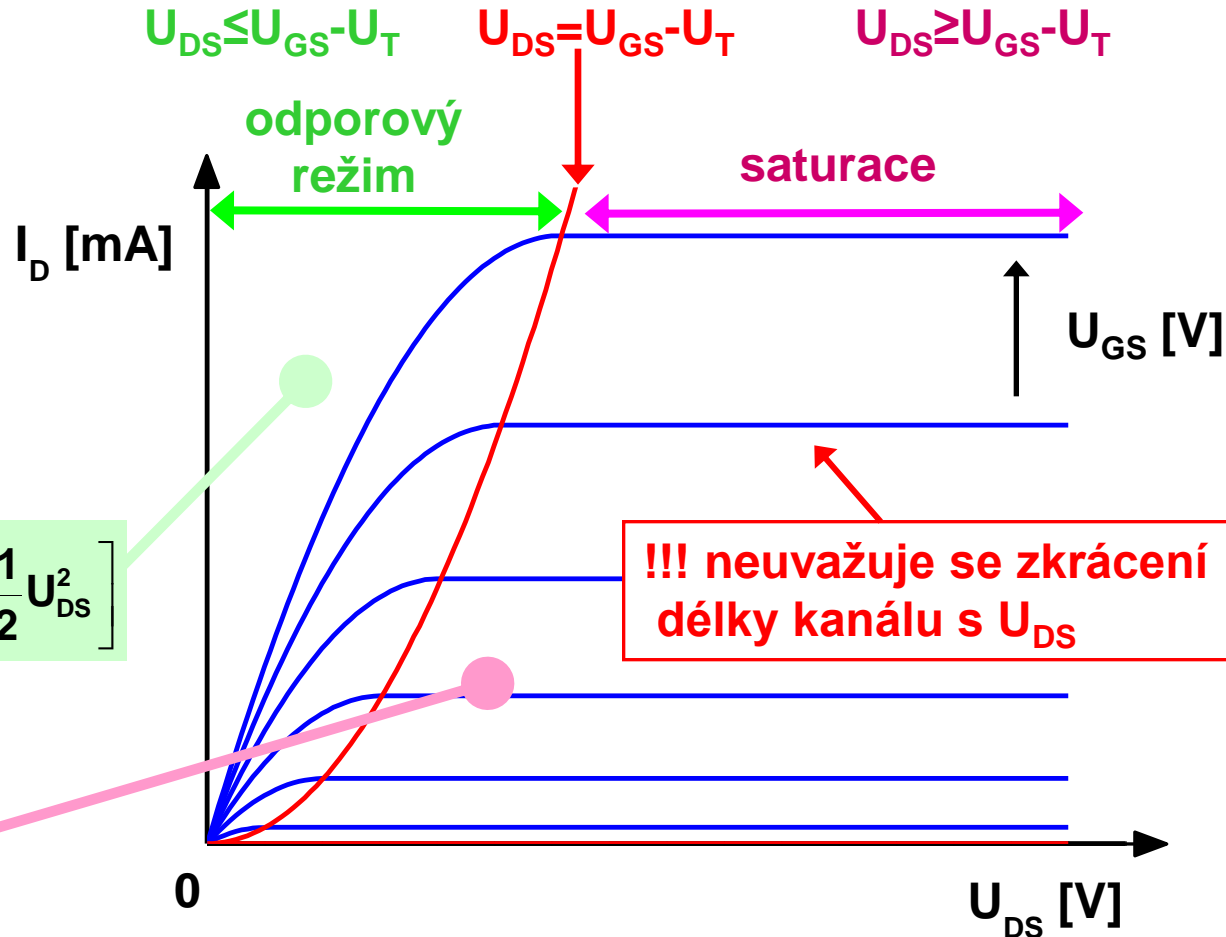


Odporový režim

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$$

Saturace

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$



PARAMETRY MODELU

μ_n – pohyblivost elektronů

L – délka kanálu

W – šířka kanálu

C_{ox} – kapacita oxidu na jednotku plochy

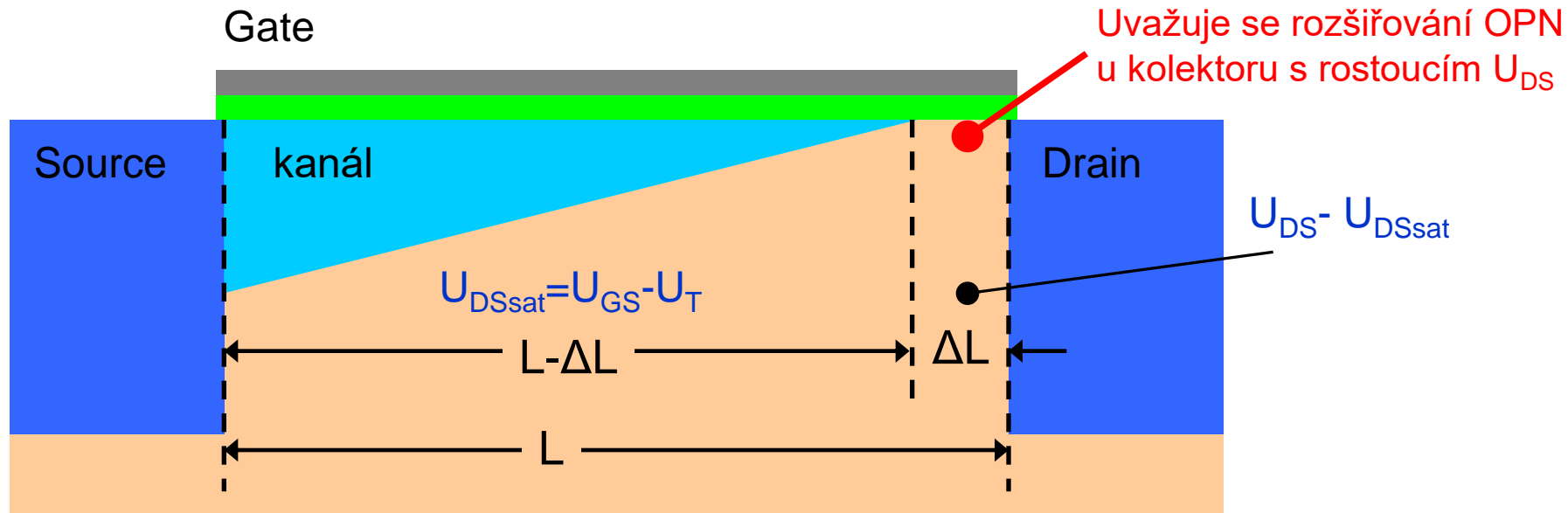
$$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_r / t_{ox}$$

ϵ_0 – permitivita vakua

ϵ_r – relativní permitivita oxidu

t_{ox} – tloušťka oxidu

7.1 MOSFET vliv modulace délky kanálu



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L - \Delta L} (U_{GS} - U_T)^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \frac{1}{1 - \Delta L / L} (U_{GS} - U_T)^2 \quad \text{pro } \frac{\Delta L}{L} \ll 1$$

$$= \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) (U_{GS} - U_T)^2 \quad \frac{\Delta L}{L} = \lambda U_{DS}$$

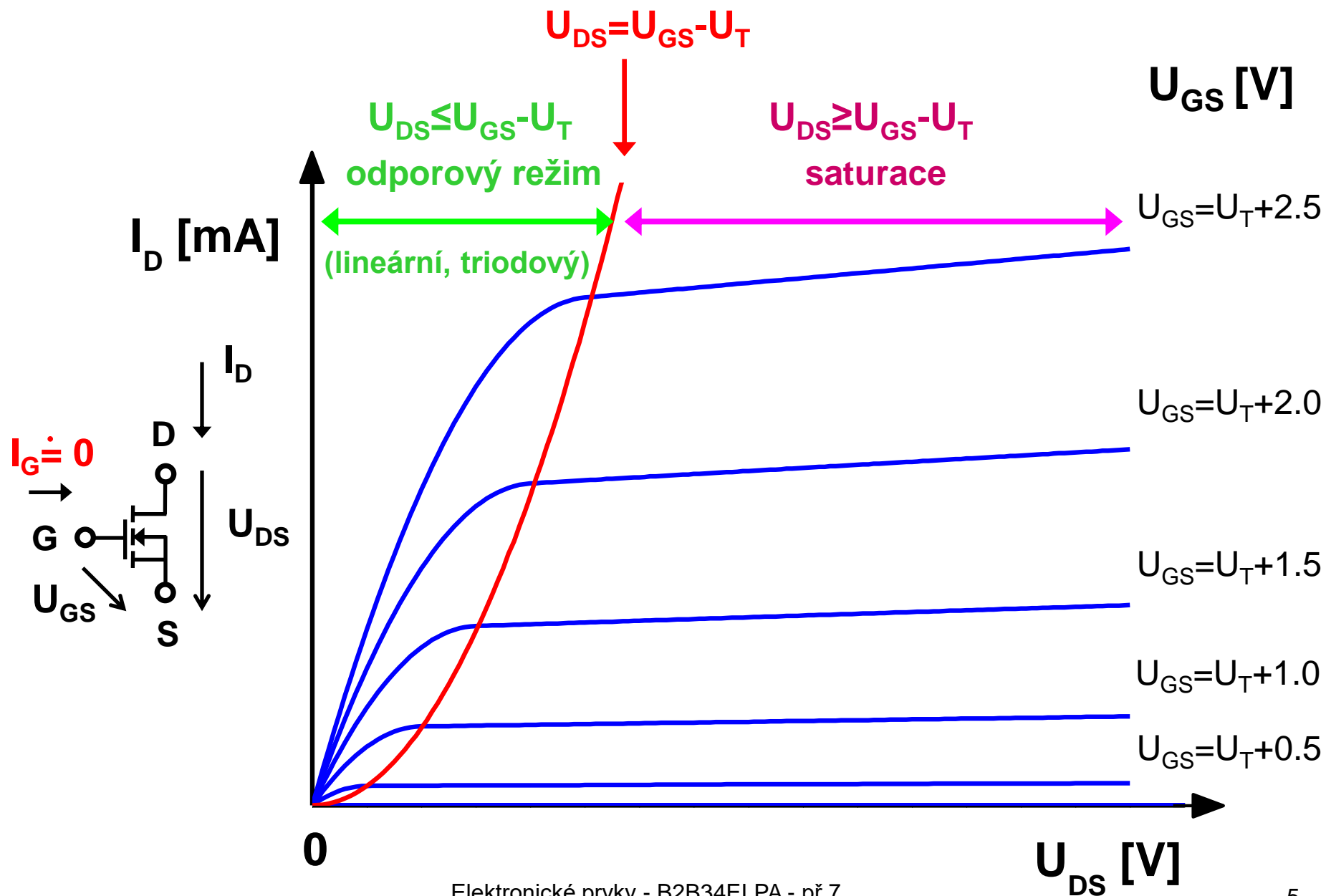
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 (1 + \lambda U_{DS}) \quad \lambda = \frac{1}{U_A}$$

U_A Earlyho napětí:
napětí, při kterém se kanál zkrátí na nulovou délku

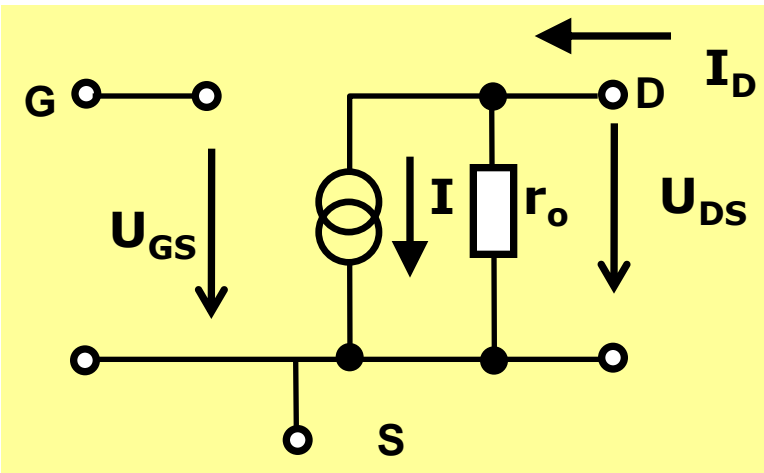
Diferenciální odpor r_o v saturační oblasti

$$r_o = \left[\frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right]_{U_{GS} = \text{konst.}}^{-1} \quad r_o = \left[\lambda \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 \right]^{-1} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{U_A}{I_D}$$

7.1 MOSFET výstupní charakteristika krátký kanál



7.1 MOSFET statický model PSpice Level 1 (uvážení zkrácení kanálu)



$$r_o = \left[\lambda \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 \right]^{-1} = \frac{U_A + U_{DSP_0}}{I_{DP_0}}$$

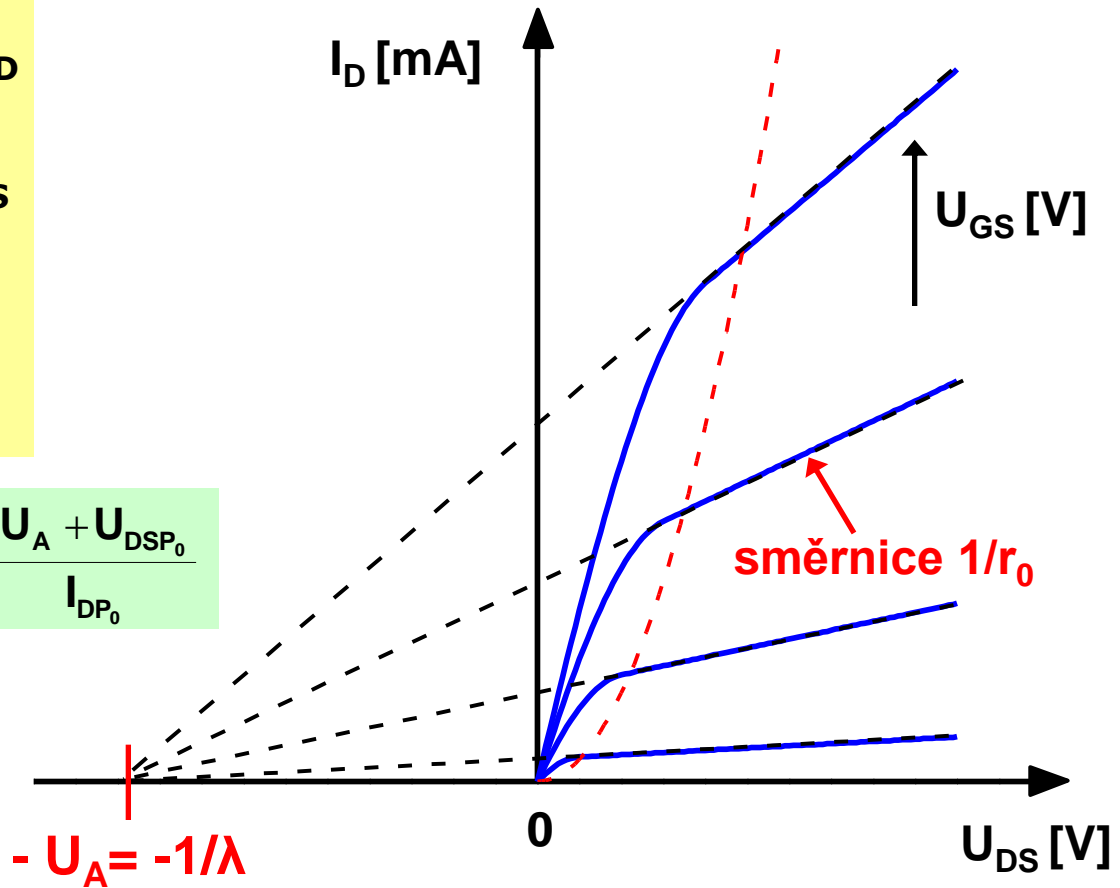
$$I = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

Pro oblast saturace platí

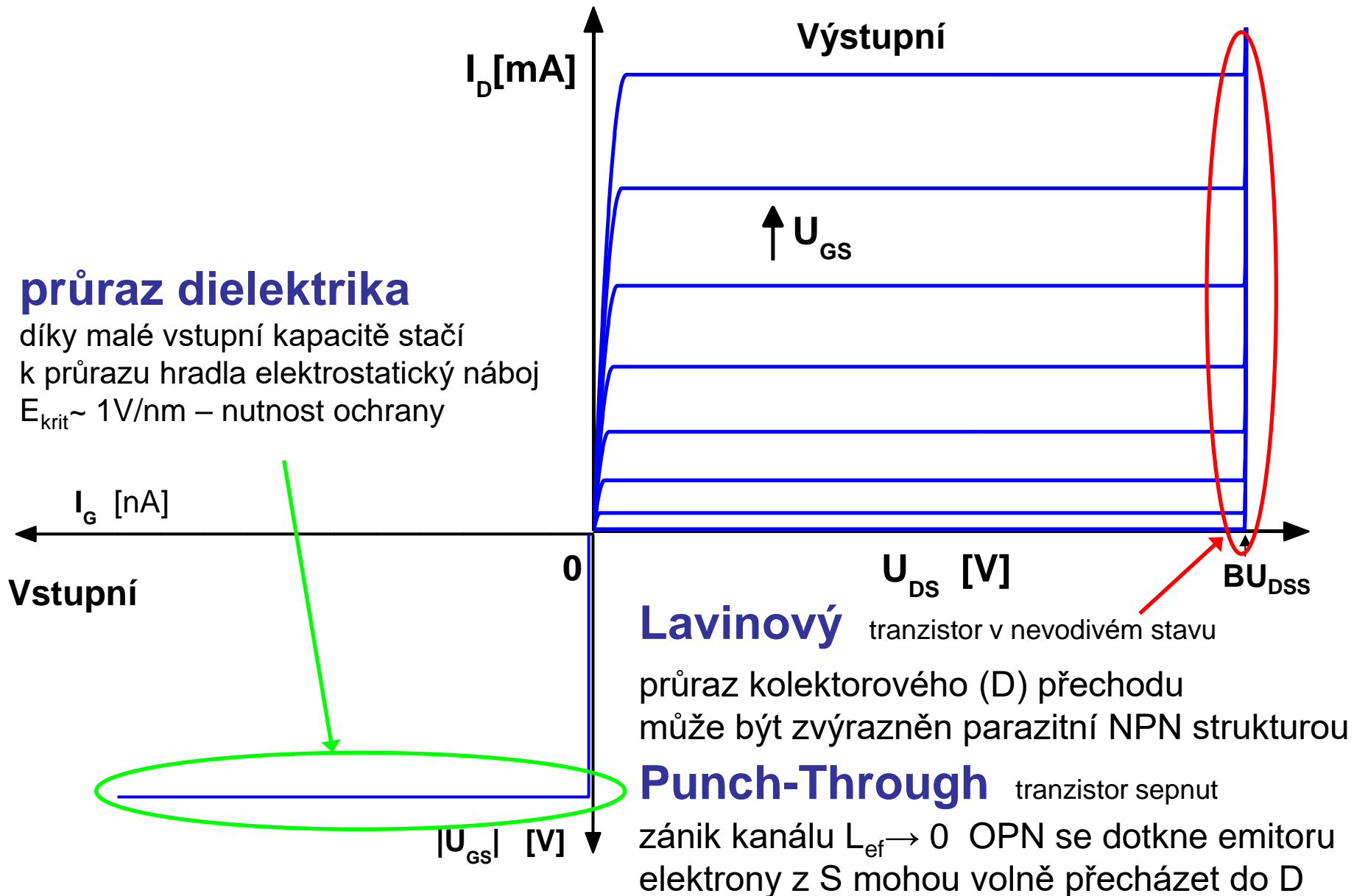
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 (1 + \lambda U_{DS}) = I + \frac{U_{DS}}{r_o}$$

U_A – Earlyho napětí

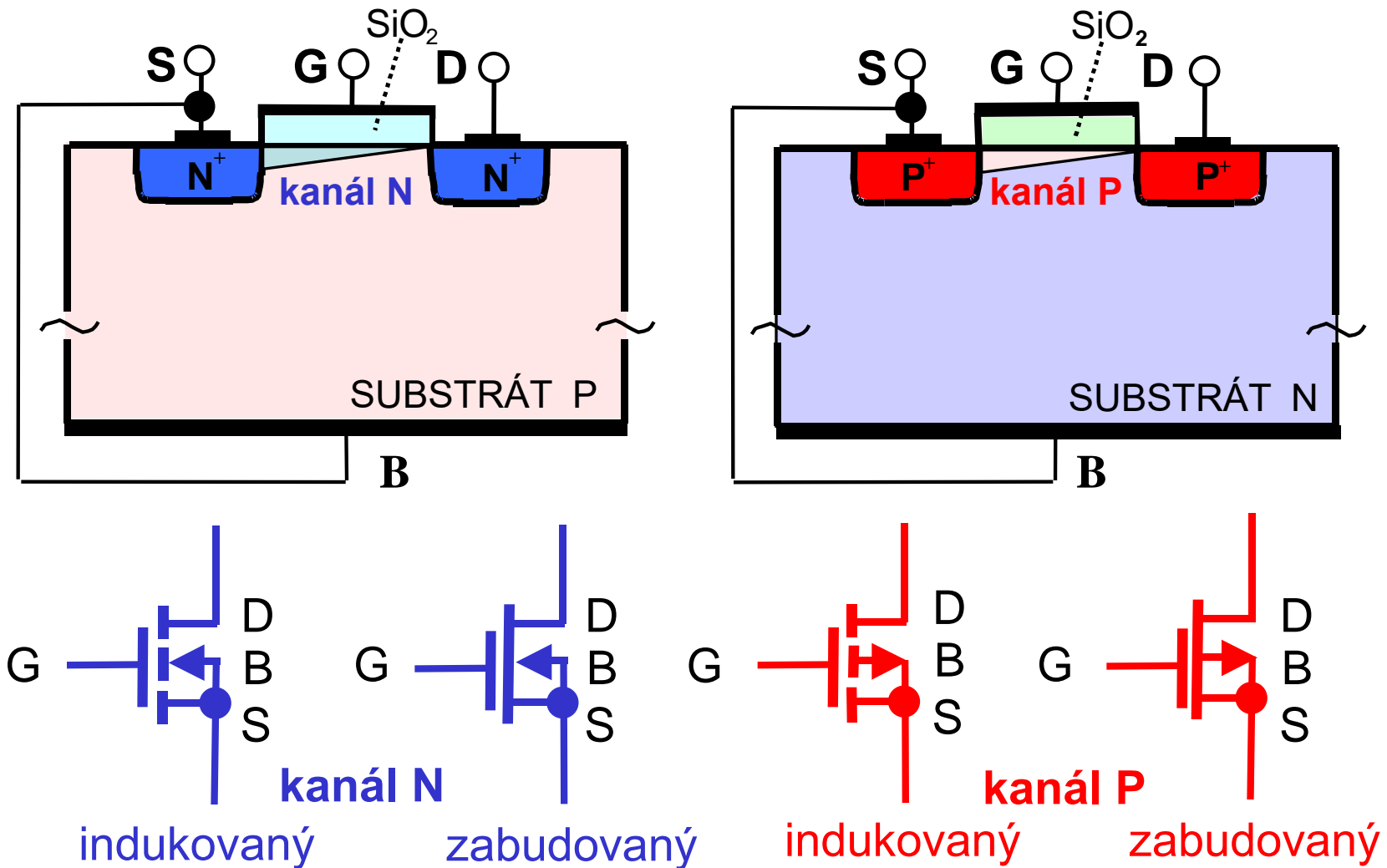
λ – koeficient modulace délky kanálu



7.1 MOSFET možnosti průrazu

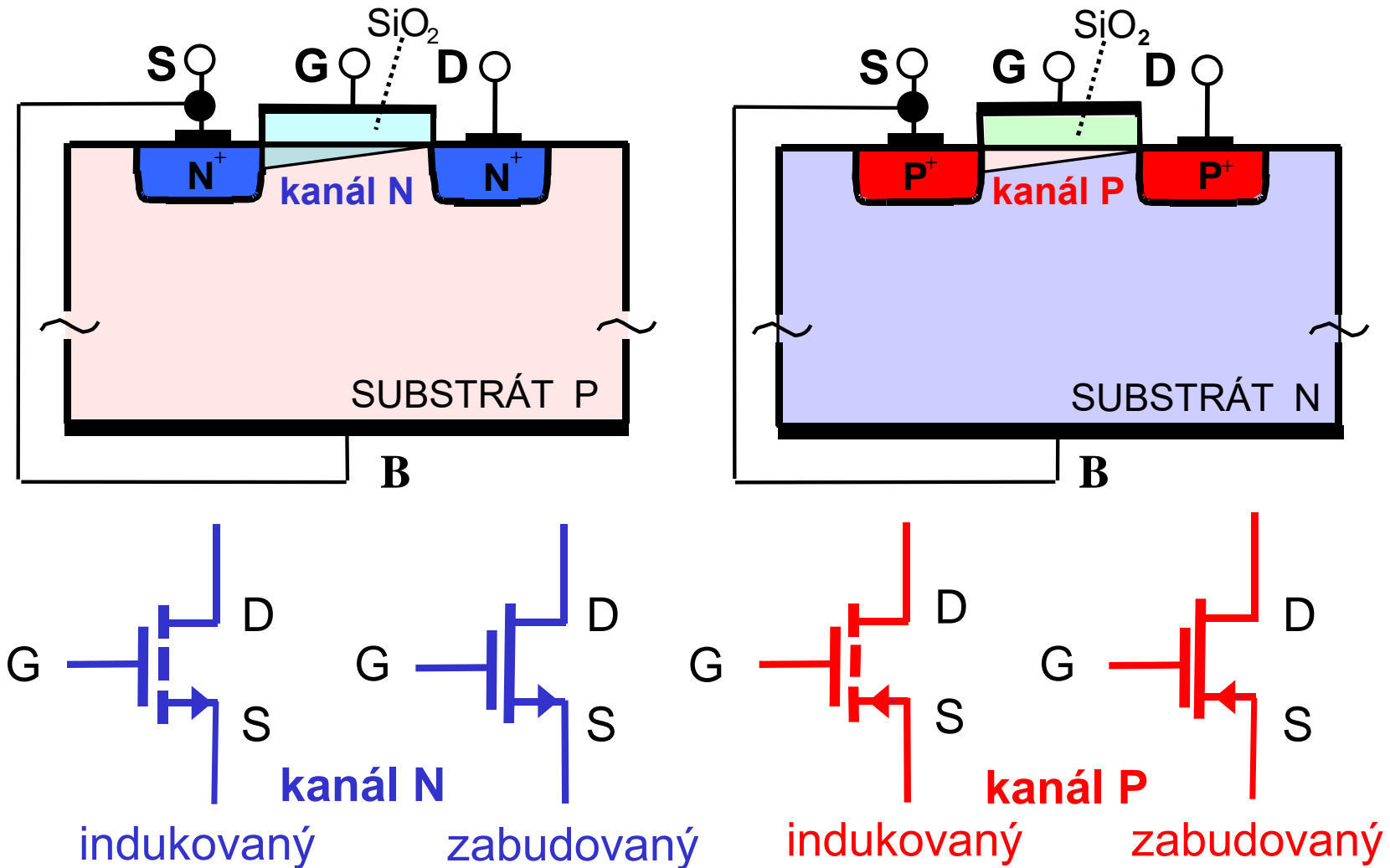


7.2 MOSFET typy a značení



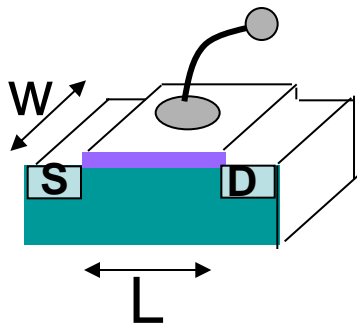
značení tranzistoru MOSFET vycházející z polarity substrátu a kanálu P→N

7.2 MOSFET typy a značení

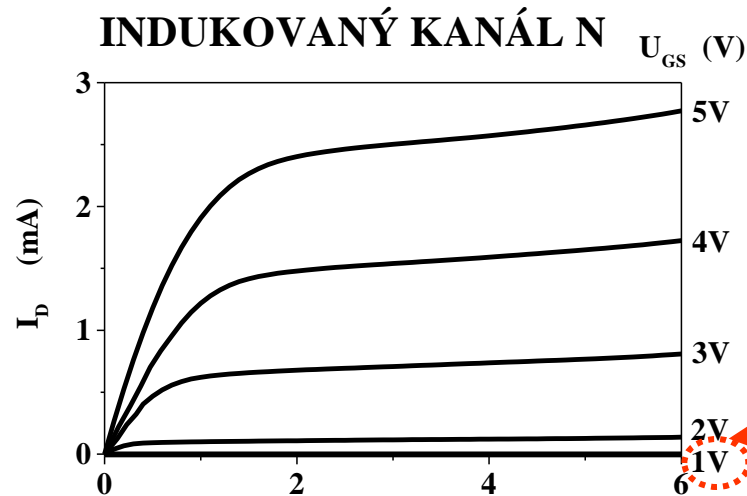


značení tranzistoru MOSFET vycházející ze směru toku proudu

7.2 MOSFET (N) – indukovaný kanál



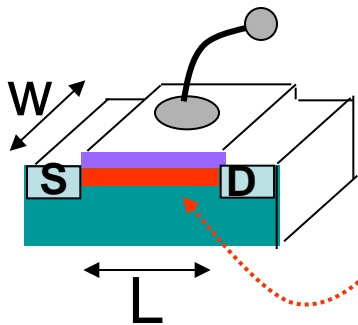
při nulovém napětí U_{GS} nevede
kanál je nutné indukovat kladným
 U_{GS}



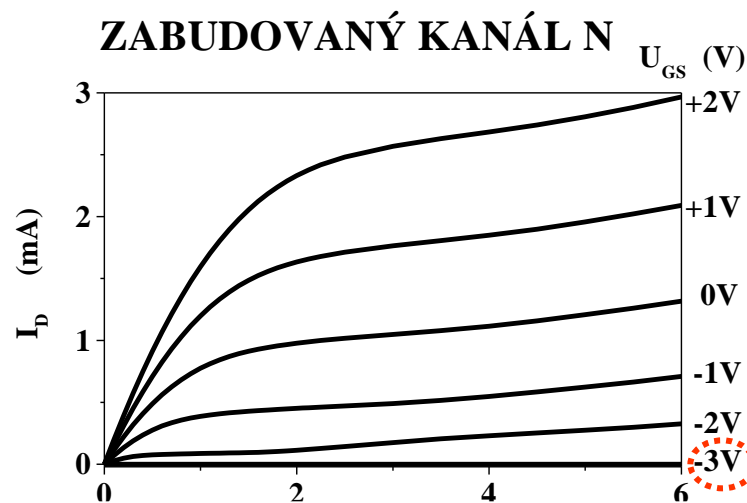
Normally OFF

$U_T > 0$

MOSFET – zabudovaný kanál (při výrobě)



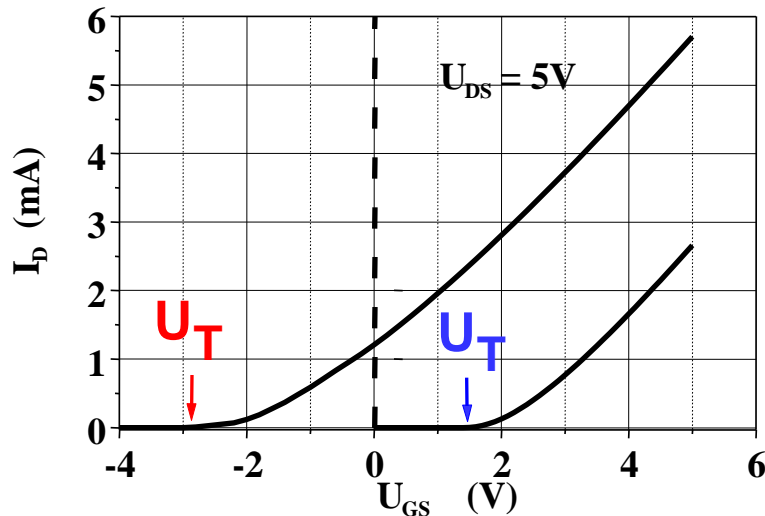
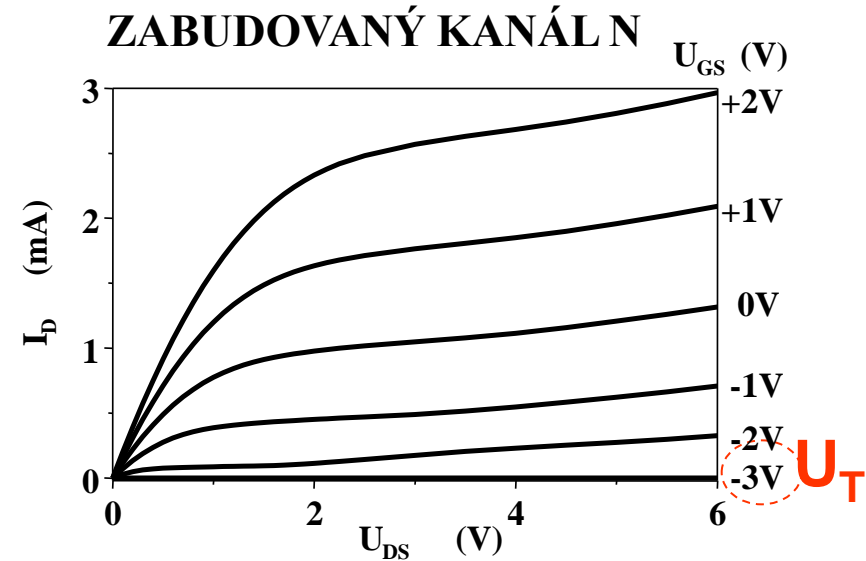
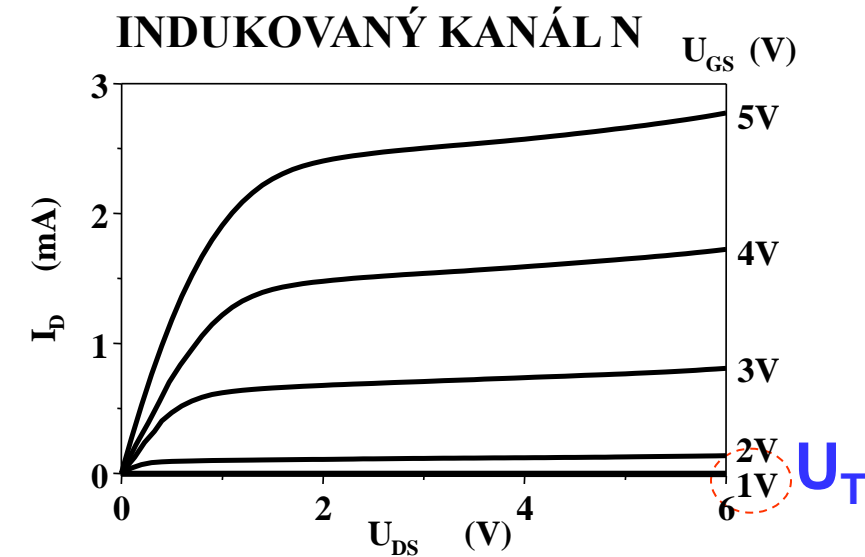
při nulovém napětí U_{GS} vede
kanál se uzavře záporným U_{GS}



Normally ON

$U_T < 0$

7.2 MOSFET (N) převodní charakteristika



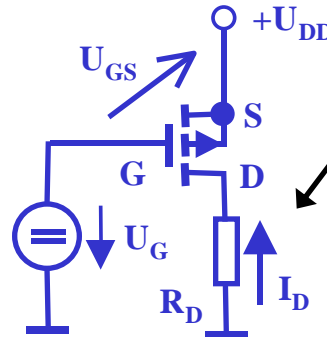
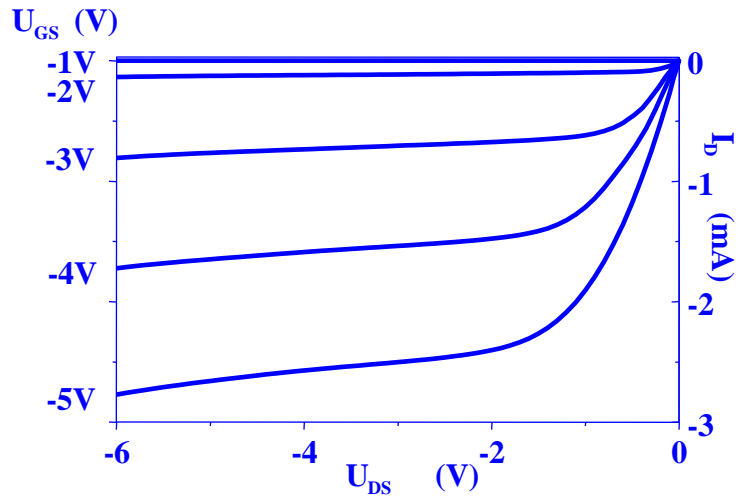
← Převodní charakteristika $I_D = f(U_{GS})$

- $U_{DS} = \text{konst.}$
- $U_{DS} = U_{GS} \Rightarrow I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$
- $U_{DS} = U_{DD} - R_D I_D$

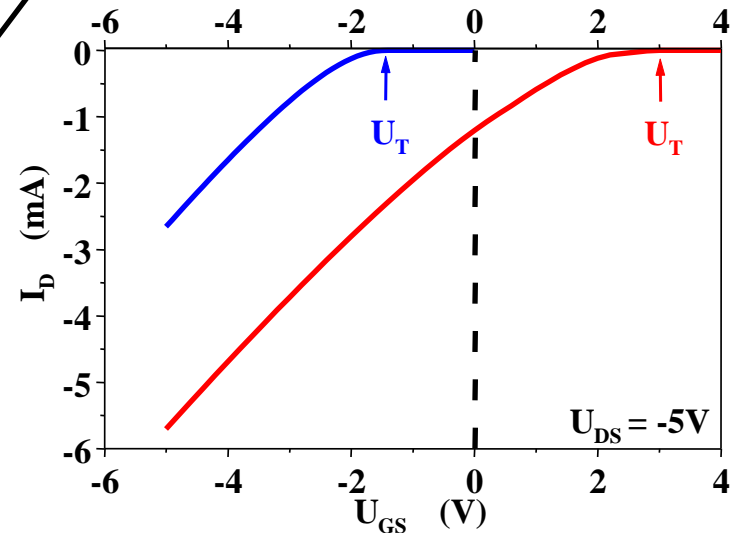
Tranzistor MOSFET lze použít jako diodu s nastavitelným prahovým napětím (kvadratická závislost I na U)

7.2 MOSFET (P) indukovaný a zabudovaný kanál

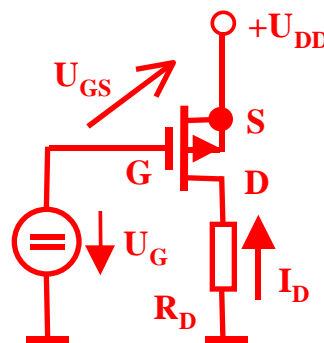
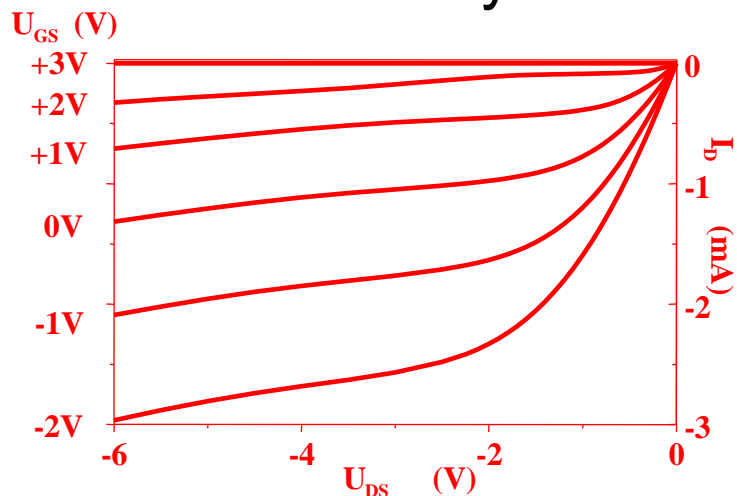
Indukovaný kanál



pozor na orientaci proudu !
proud I_D vtéká do kolektoru



Zabudovaný kanál



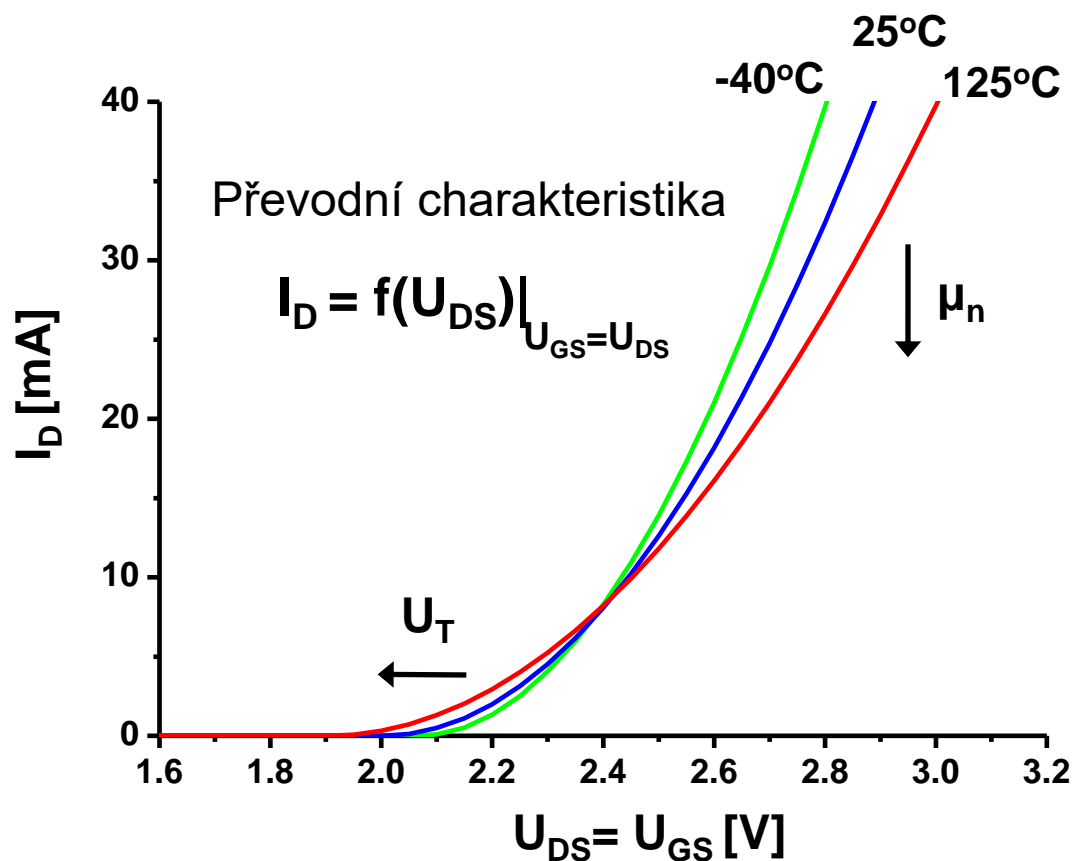
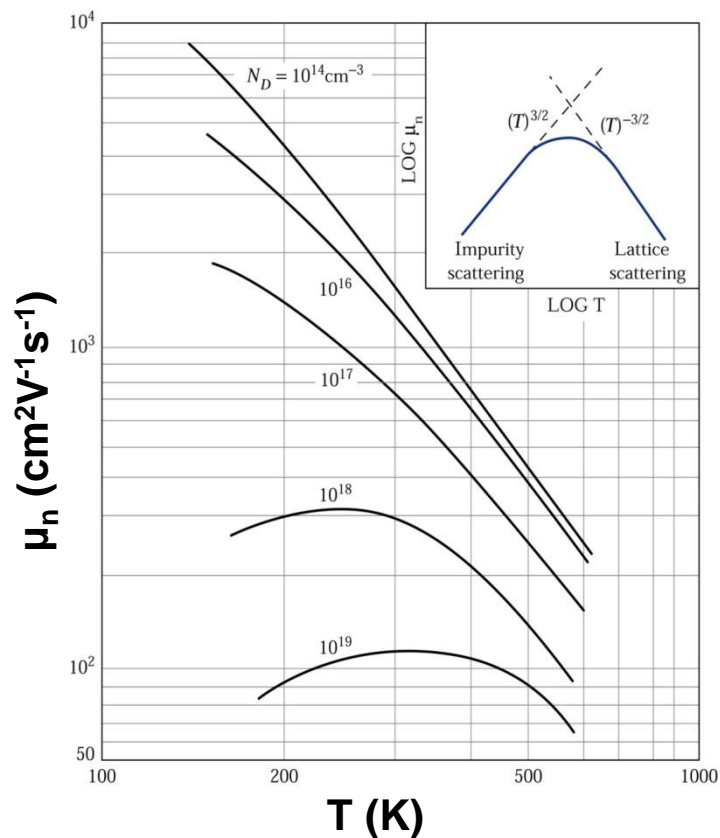
Převodní charakteristiky

7.2 MOSFET vliv teploty na V-A charakteristiku

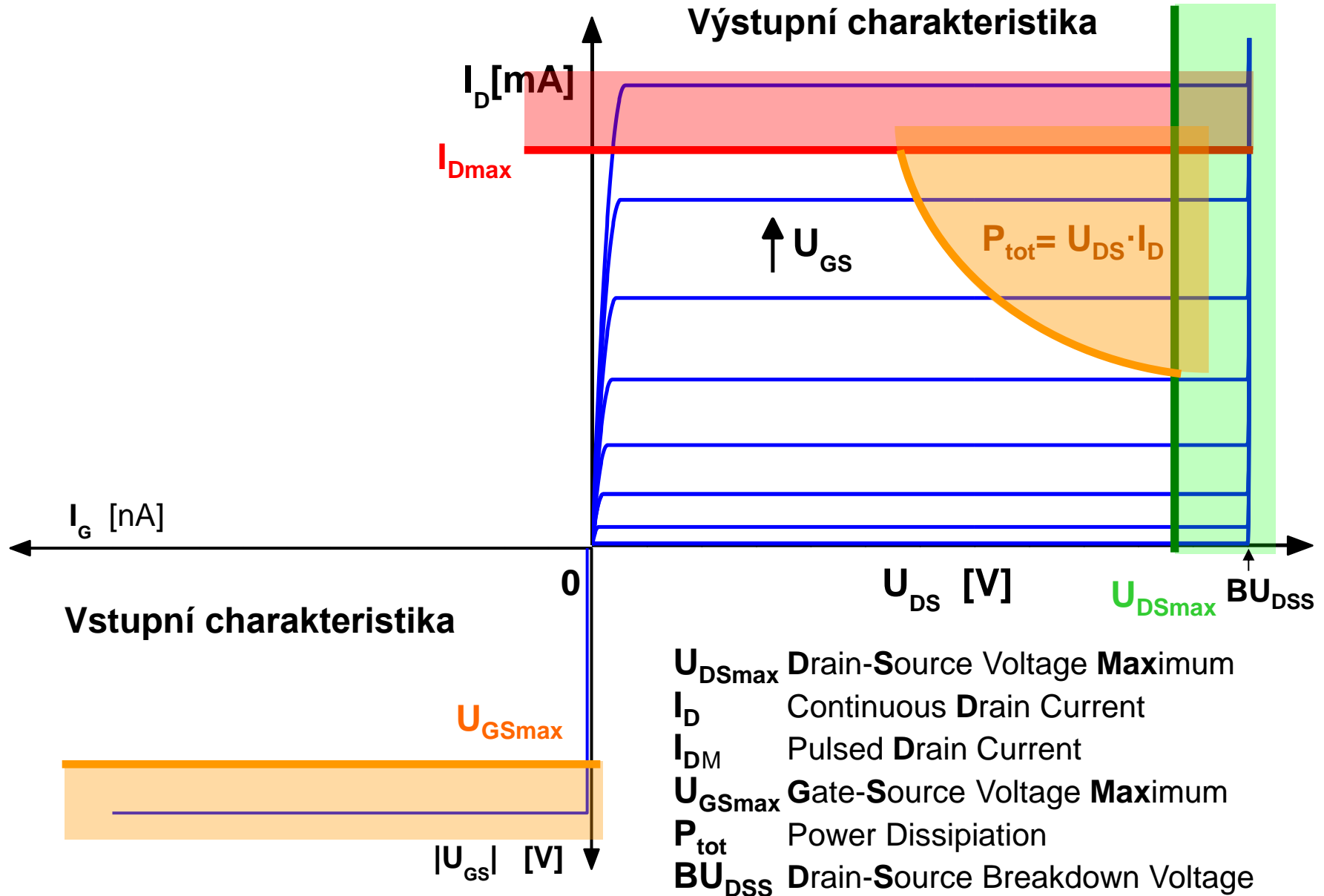
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 (1 + \lambda U_{DS})$$

pohyblivost klesá s teplotou - dominantní

prahové napětí vlivem poklesu ϕ_B se snižuje s teplotou



7.3 MOSFET – mezní parametry



7.3 MOSFET

katalogový list

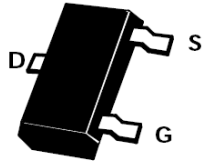
**SOT23 N-CHANNEL ENHANCEMENT
MODE VERTICAL DMOS FET**
ISSUE 3 - JANUARY 1996

BS170F

FEATURES

- * 60Volt V_{DS}
- * $R_{DS(ON)} = 5\Omega$

PARTMARKING DETAIL - MV



SOT23

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS.

PARAMETER	SYMBOL	VALUE	UNIT
Drain-Source Voltage	V_{DS}	60	V
Continuous Drain Current at $T_{amb}=25^{\circ}C$	I_D	0.15	mA
Pulsed Drain Current	I_{DM}	3	A
Gate Source Voltage	V_{GS}	± 20	V
Power Dissipation at $T_{amb}=25^{\circ}C$	P_{tot}	330	mW
Operating and Storage Temperature Range	$T_J:T_{stg}$	-55 to +150	$^{\circ}C$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (at $T_{amb} = 25^{\circ}C$ unless otherwise stated).

PARAMETER	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	CONDITIONS.
Drain-Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	60	90		V	$I_D=100\mu A$, $V_{GS}=0V$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	0.8		3	V	$I_D=1mA$, $V_{DS}=V_{GS}$
Gate-Body Leakage	I_{GSS}			10	nA	$V_{GS}=15V$, $V_{DS}=0V$
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}			0.5	μA	$V_{DS}=25V$, $V_{GS}=0V$
Static Drain-Source On-State Resistance (1)	$R_{DS(on)}$			5	Ω	$V_{GS}=10V$, $I_D=200mA$
Forward Transconductance (1)(2)	g_{fs}		200		mS	$V_{DS}=10V$, $I_D=200mA$
Input Capacitance (2)	C_{iss}		60		pF	$V_{DS}=10V$, $V_{GS}=0V$, $f=1MHz$
Turn-On Delay Time (2)(3)	$t_{d(on)}$			10	ns	$V_{DD} \approx -15V$, $I_D=600mA$
Turn-Off Delay Time (2)(3)	$t_{d(off)}$			10	ns	

Maximální napětí Drain-Source

Maximální hodnota I_D – trvale

Maximální hodnota I_D – pulzně

Maximální napětí Gate-Source

Maximální ztrátový výkon

Průrazné napětí Drain-Source

Prahové napětí

Statický odpor D-S v sepnutém stavu

Strmost

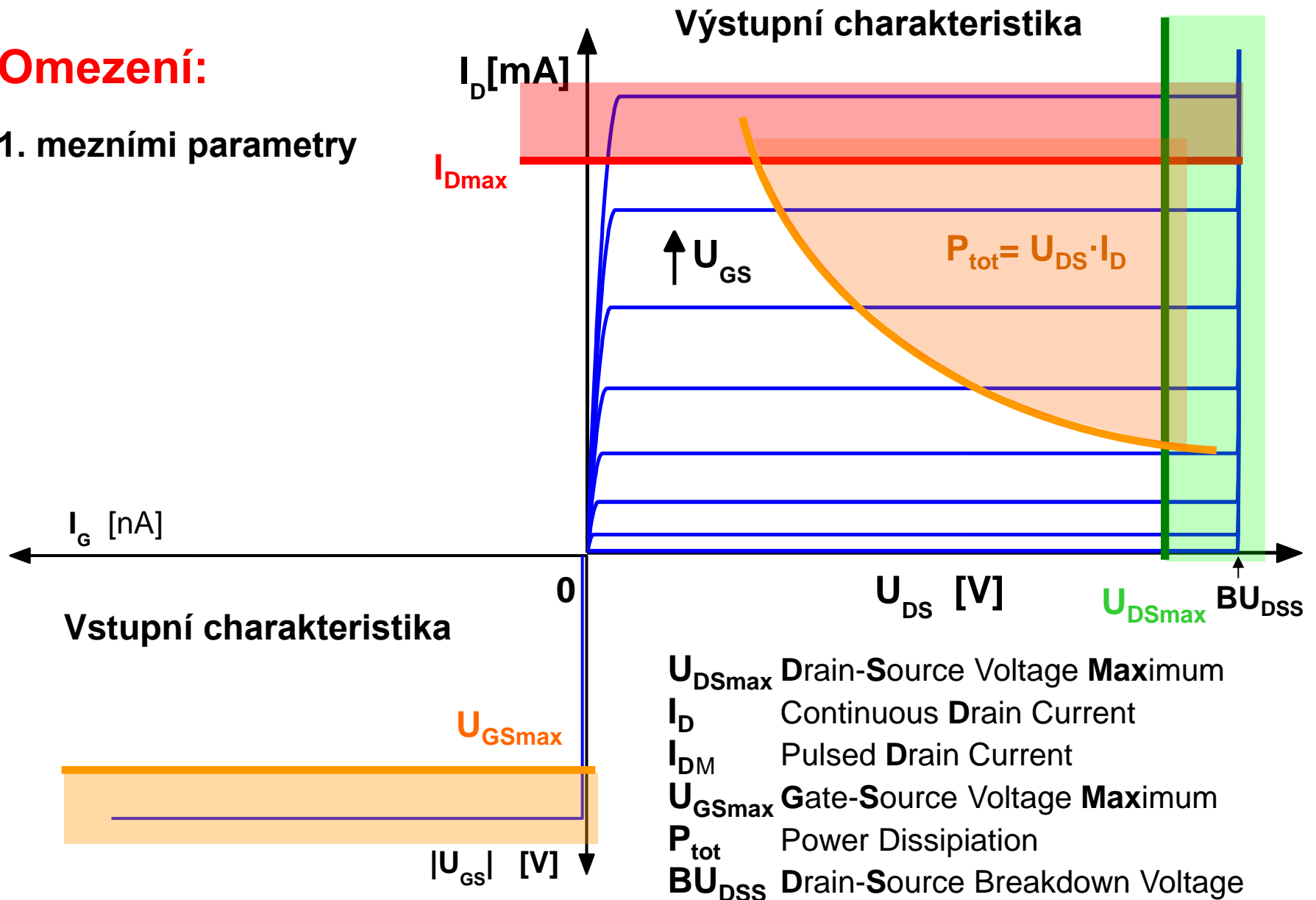
Vstupní kapacita

Spínací/vypínací zpoždění

7.3 MOSFET Volba polohy klidového pracovního bodu P_0

Omezení:

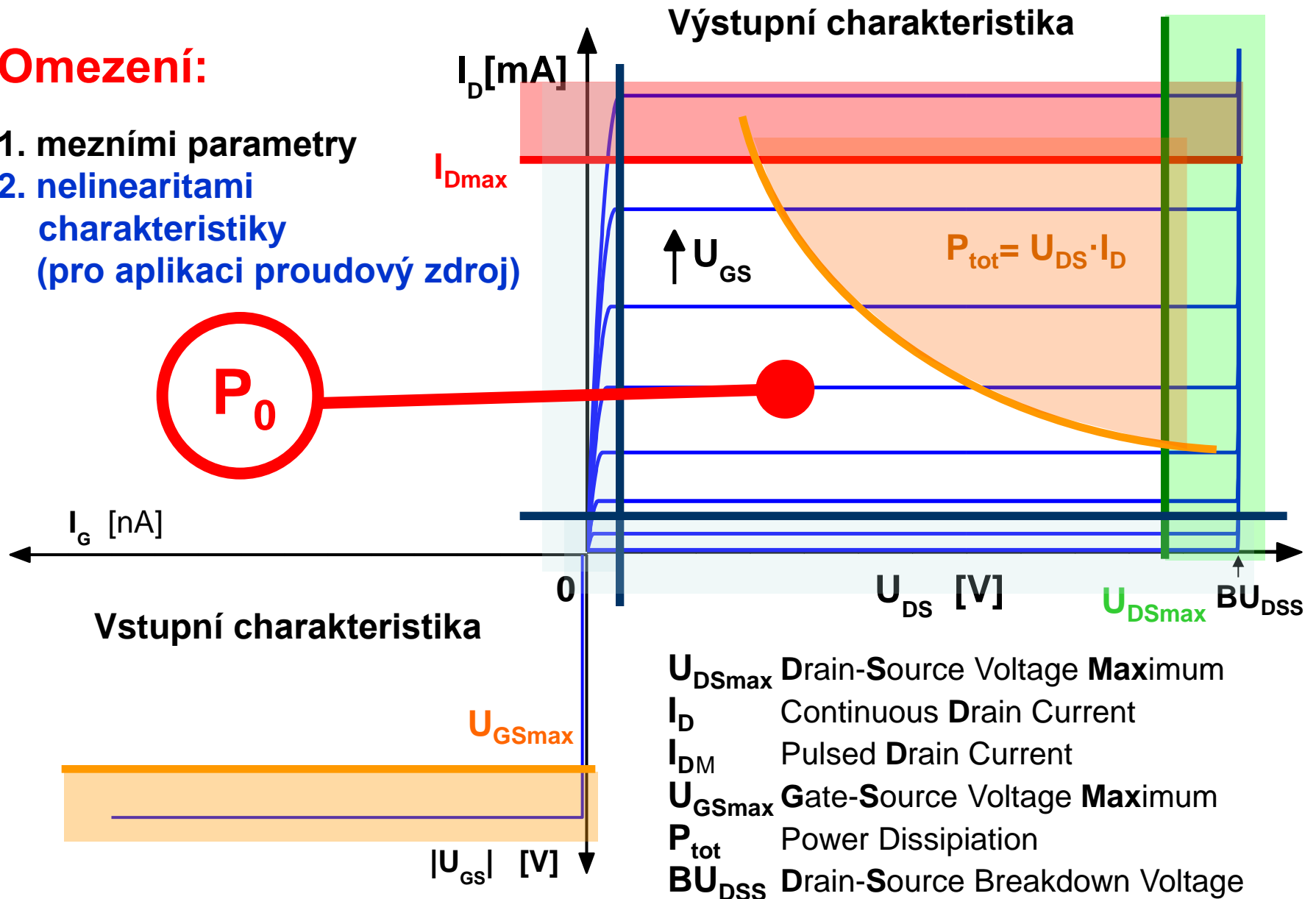
1. mezními parametry



7.3 MOSFET Volba polohy klidového pracovního bodu P_0

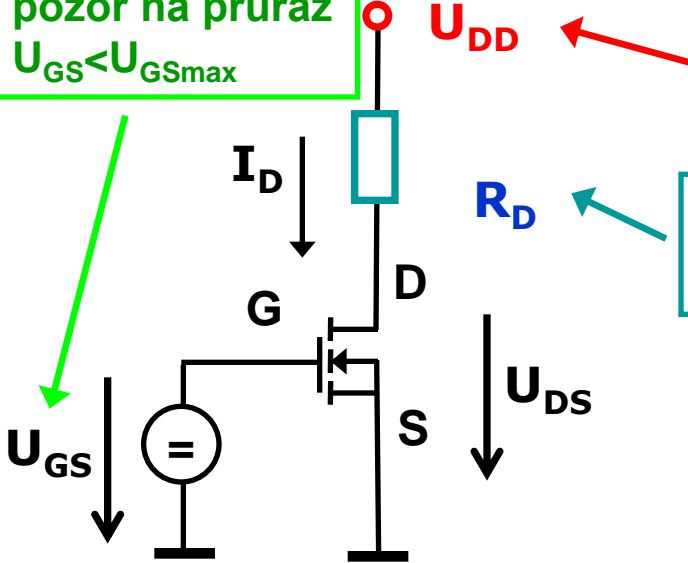
Omezení:

1. mezními parametry
2. nelinearitami charakteristiky (pro aplikaci proudový zdroj)



7.3 Klidový pracovní bod P_0 MOSFET jako zdroj proudu

pozor na průraz
 $U_{GS} < U_{GSmax}$



Většinou dáno použitým zdrojem $\Rightarrow U_{DD}$ fixní,
dle U_{DD} volí tranzistor s odpovídajícím U_{DSmax}

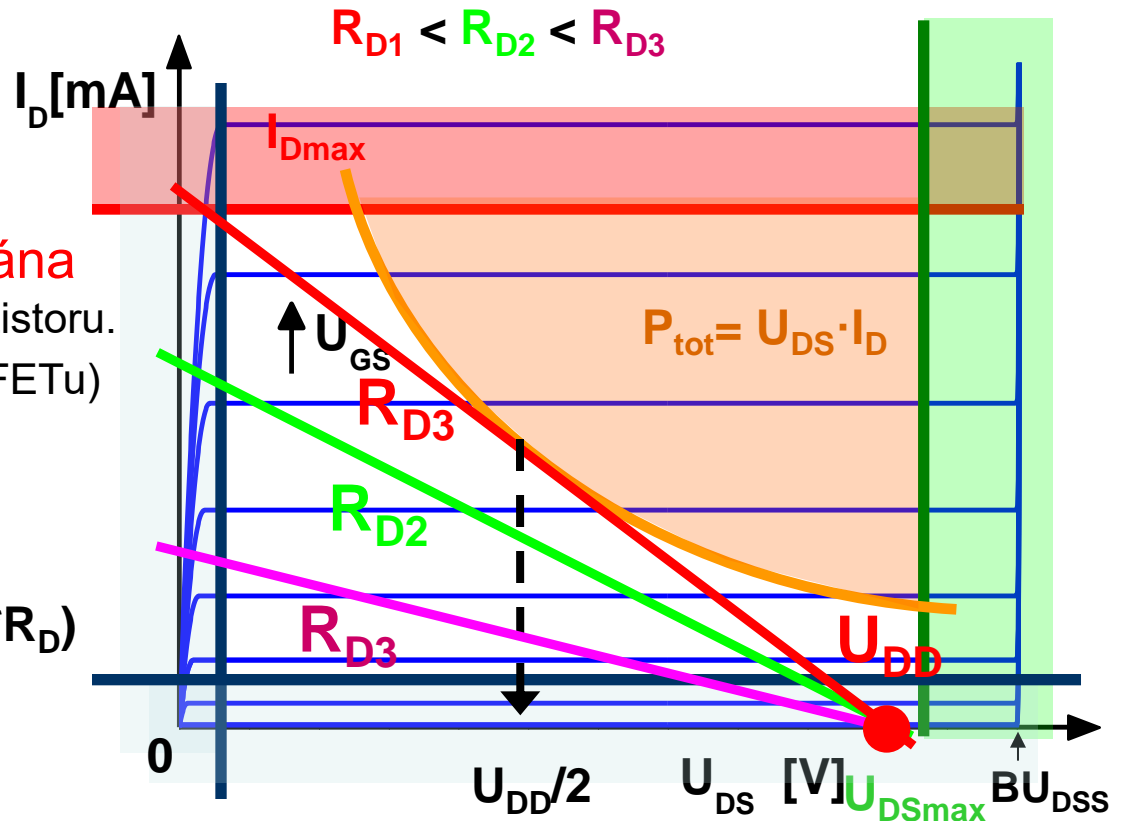
R_D omezuje polohu P_0 ve výstupní charakteristice,
ovlivňuje zisk a omezuje P_{max}

Minimální hodnota R_D je dána
maximálním ztrátovým výkonem tranzistoru.
Zdroj dodává max. výkon do zátěže (FETu)

je-li $U_{DS} = U_{DD}/2$

$$P_{max} > U_{P0} \cdot I_{P0} = U_{DD}/2 \cdot U_{DD}/(2 \cdot R_D)$$

$$R_{Dmin} > \frac{U_{DD}^2}{4P_{max}}$$



7.3 Převodní charakteristika invertoru MOSFET

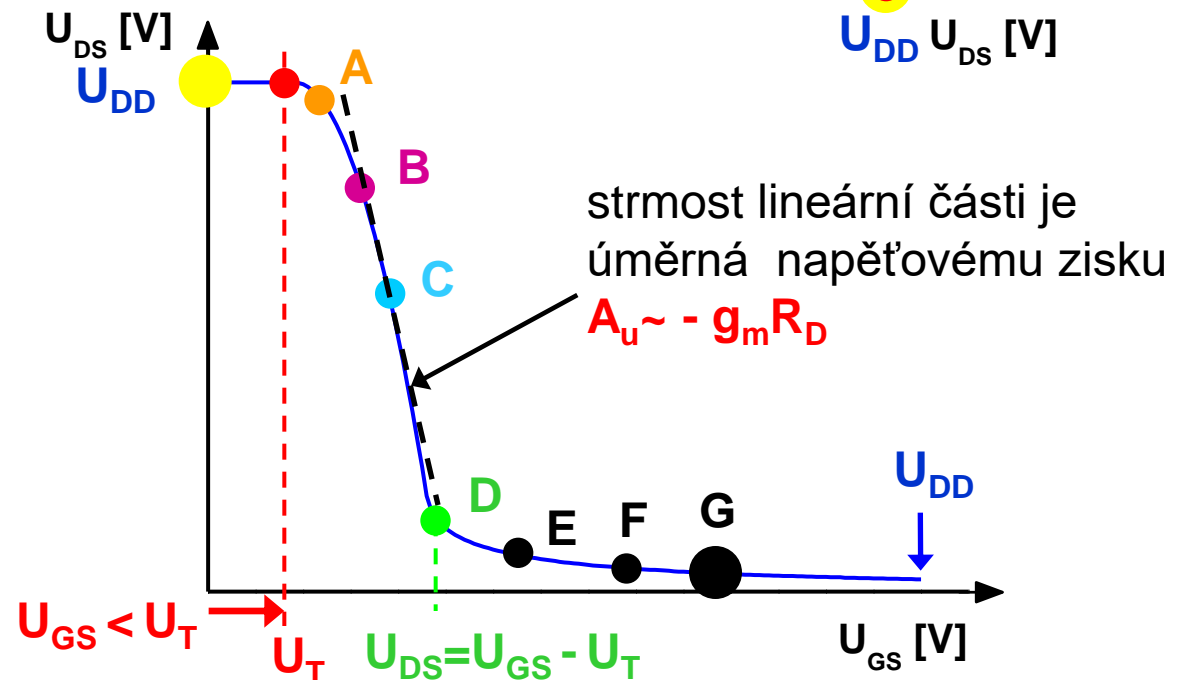
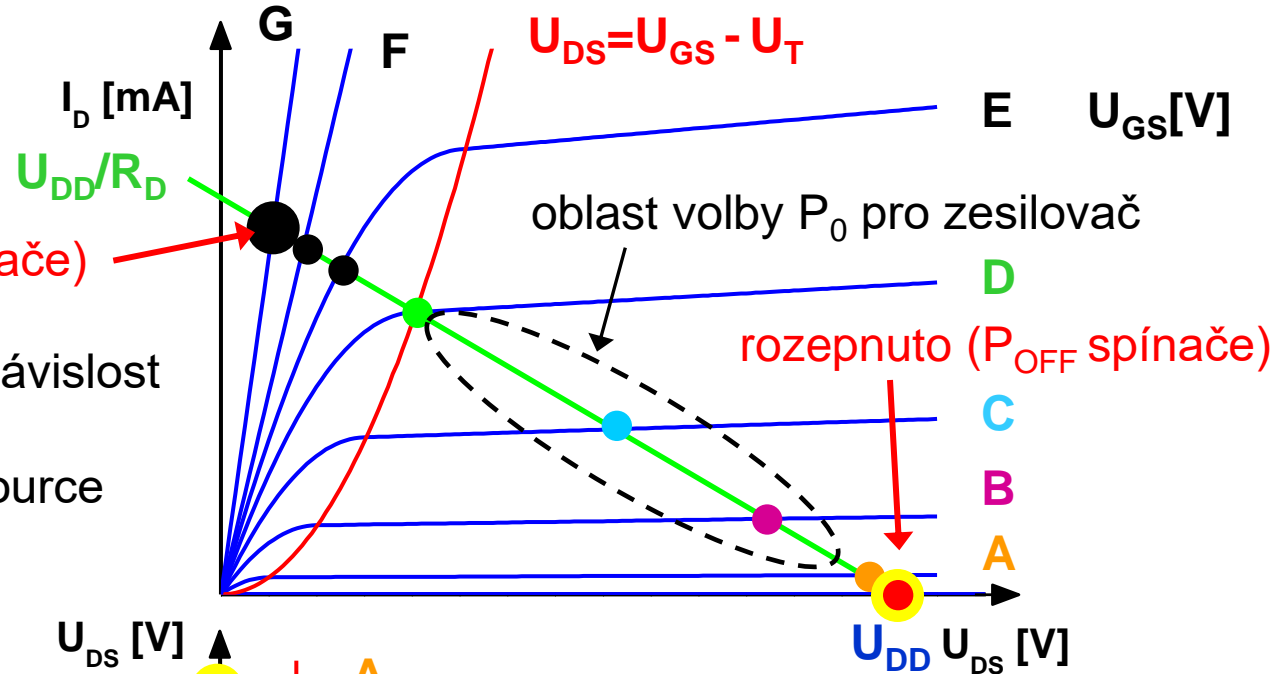
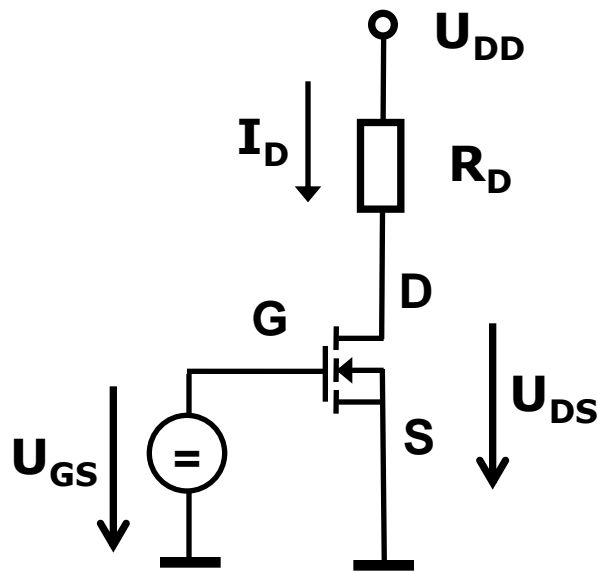
MOSFET zapojen v sérii se zátěží (odporem R_D). Odpor R_D převádí kolektorový proud I_D na napětí. Výstupní napětí je $U_{DD} - R_D I_D$.

sepnuto (P_{ON} spínače)

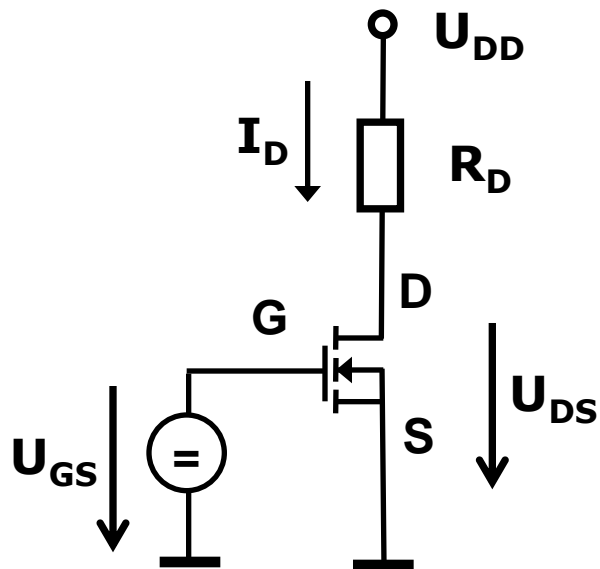
Převodní charakteristika je závislost

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

Zapojení společný Emitter/Source



7.3 Volba polohy P_0

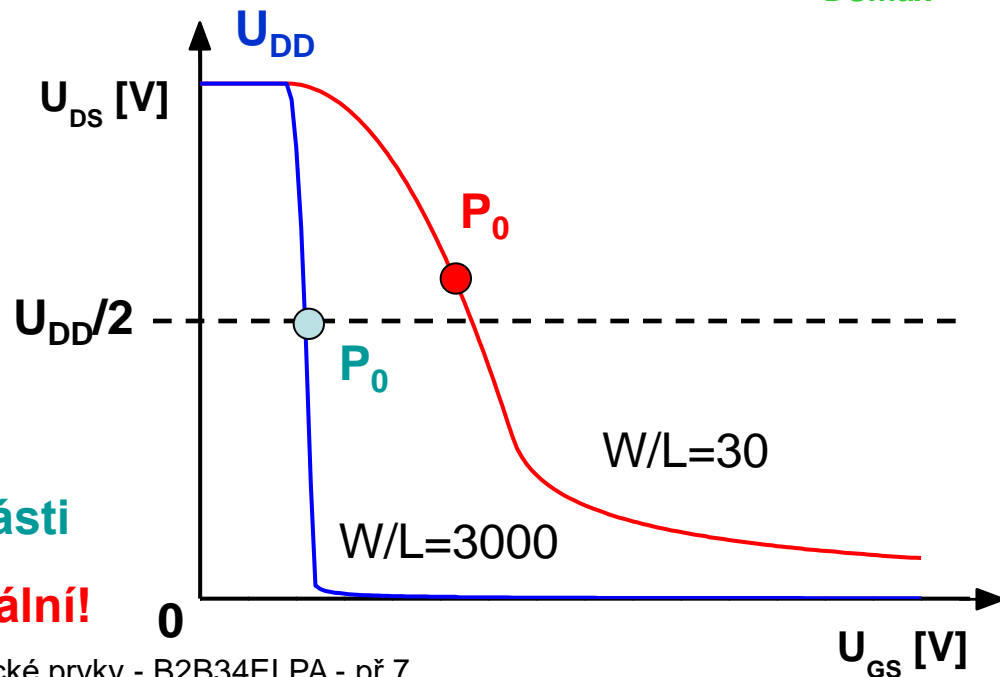
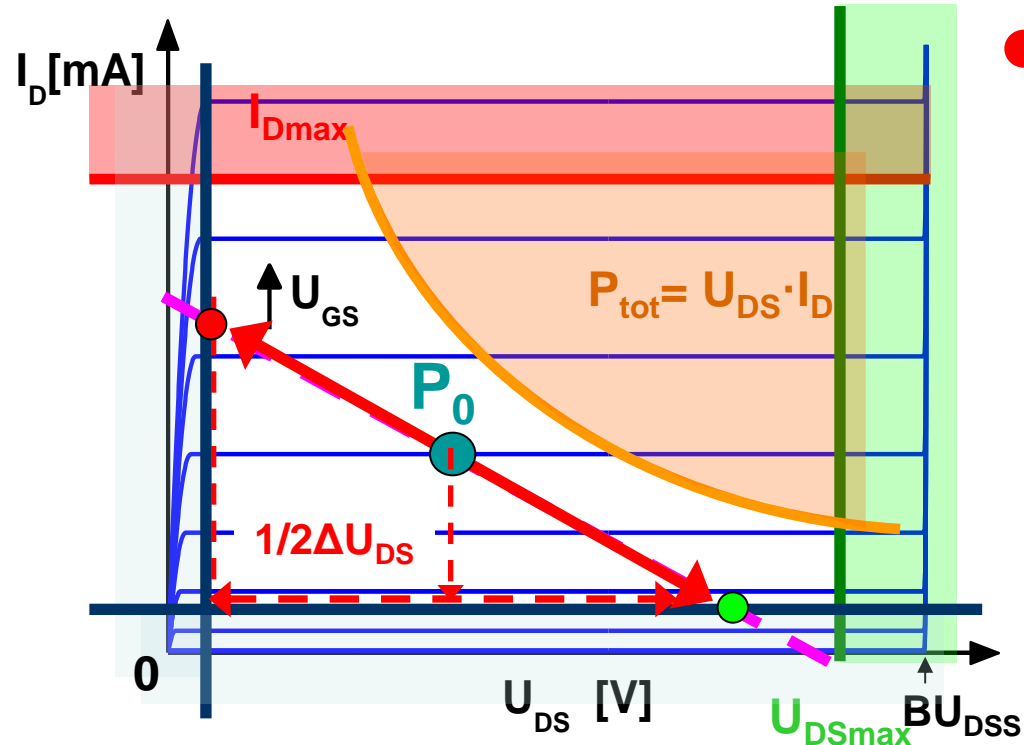


Optimální poloha P_0 pro třídu A by měla garantovat maximální rozkmit pracovního bodu v lineární části převodní charakteristiky

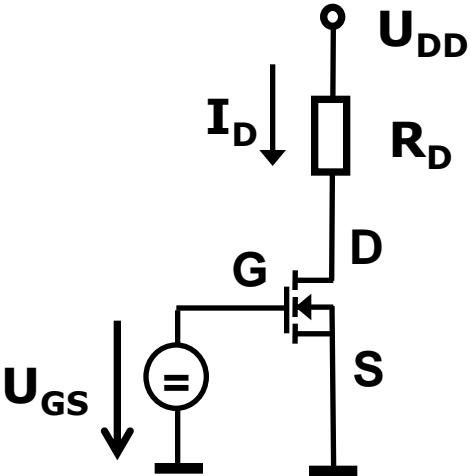


P_0 volit uprostřed její „lineární“ části

volba $U_{DS0} \approx U_{DD}/2$ nemusí být ideální!

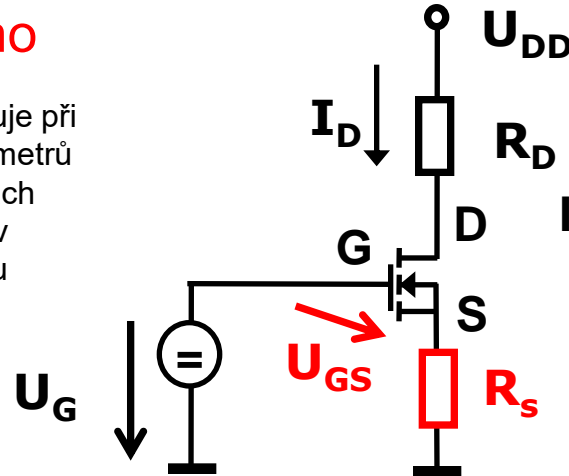


7.3 Způsoby nastavení polohy P_0



nestabilizováno

Fixní zdroj U_{GS} způsobuje při značném rozptylu parametrů tranzistorů resp. změnách teploty významný posuv polohy pracovního bodu (proudu I_D)

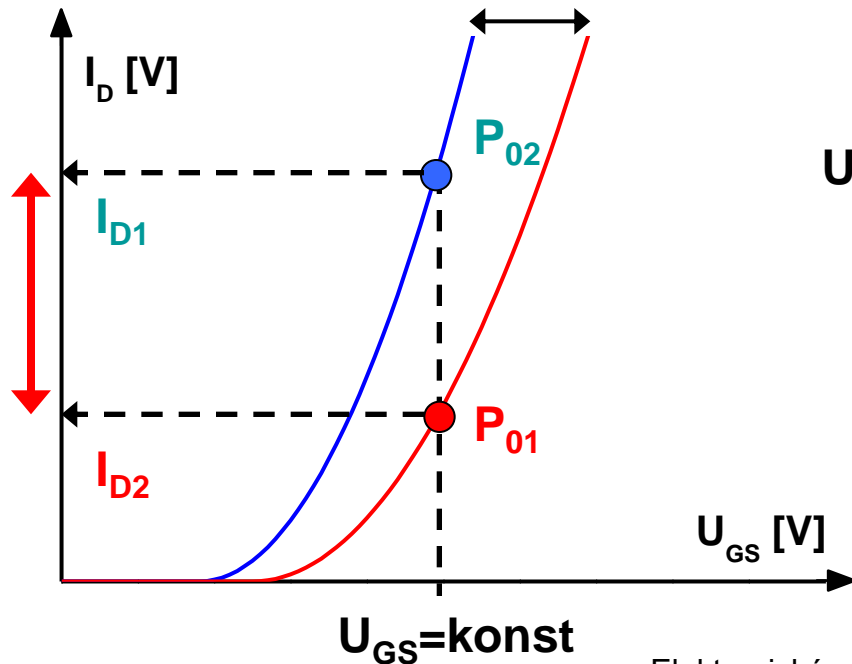


stabilizováno

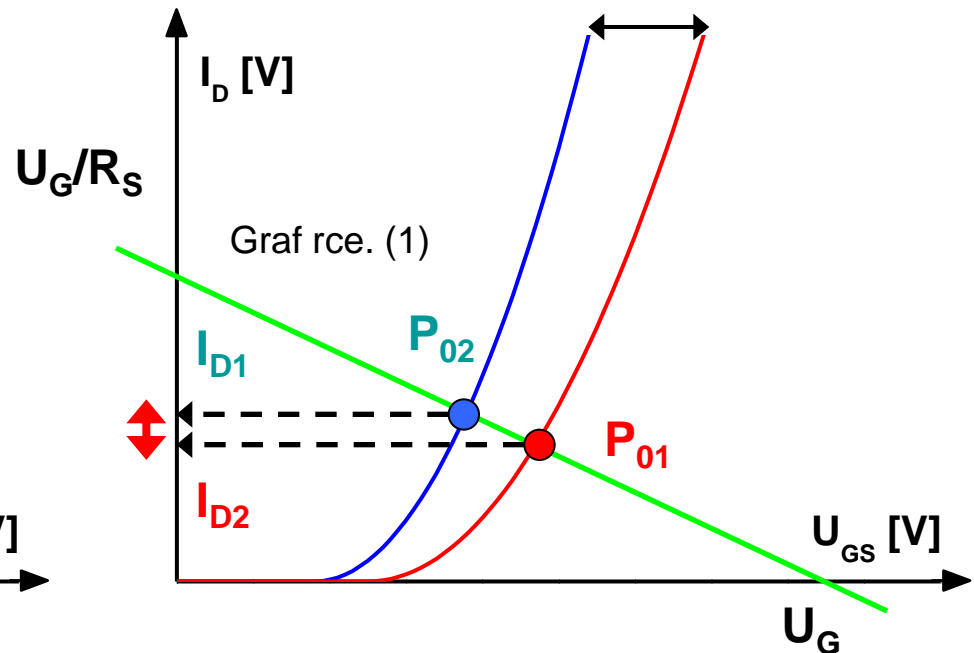
$$I_D = (U_G - U_{GS}) / R_S \quad (1)$$

Obvodové nastavení (sériová zpětná vazba) minimalizuje změnu polohy pracovního bodu.

rozptyl parametrů

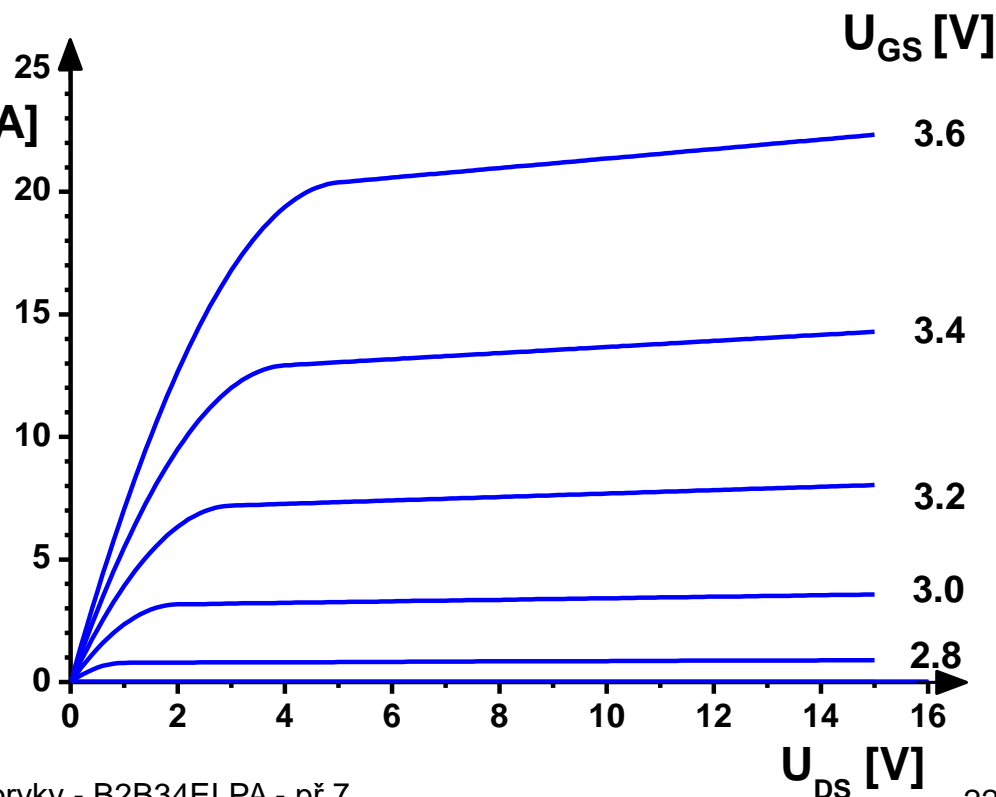
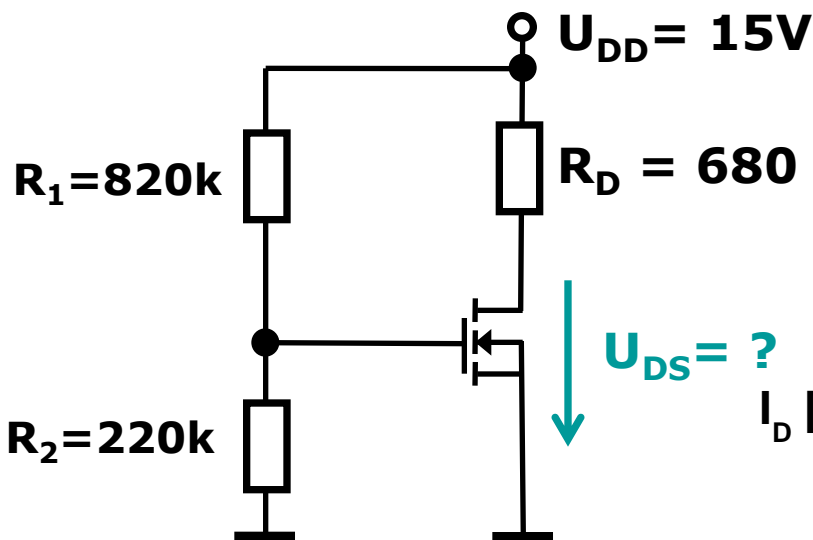


rozptyl parametrů



7.3 Postup určení polohy pracovního bodu

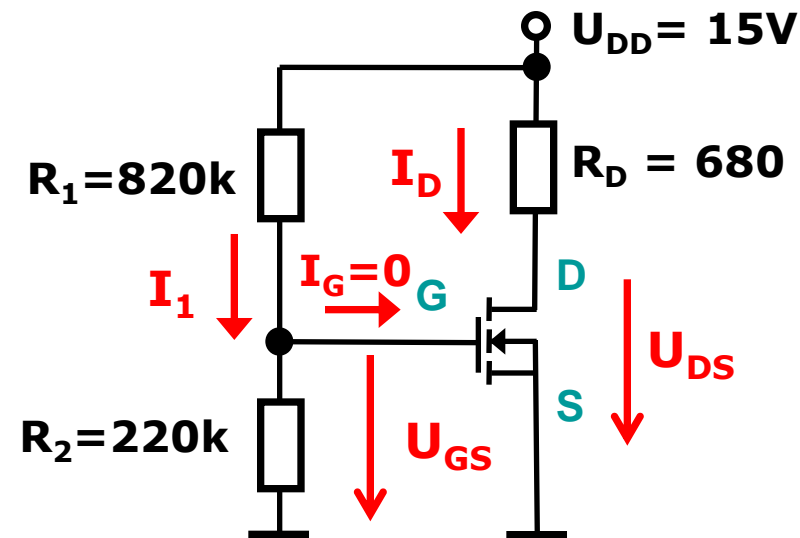
Nalezněte hodnotu napětí U_{DS} tranzistoru NMOS, jehož parametry jsou definovány přiloženou výstupní VA charakteristikou.



Pozn. Charakteristika tranzistoru také může být dána funkčním předpisem (PSpice Level 1). Parametry modelu (U_T , k , r_o) lze určit z katalogových hodnot (viz seminář).

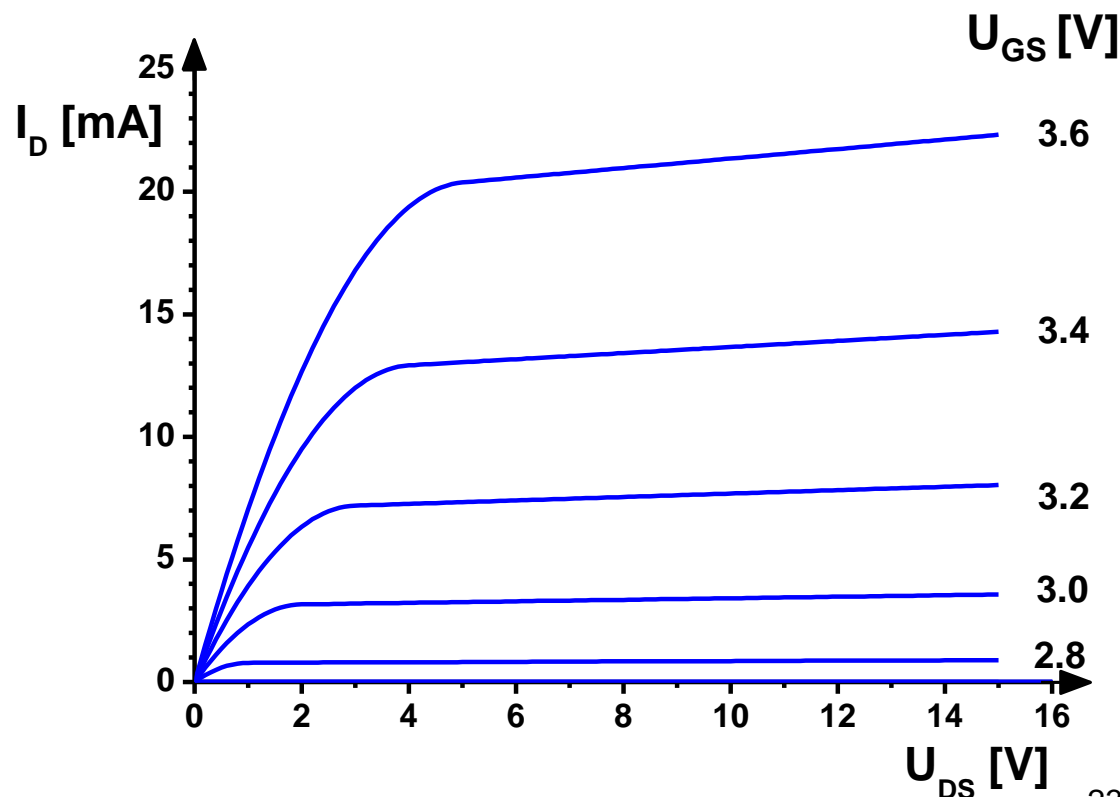
7.3 Postup určení polohy pracovního bodu - Řešení

1. Popsat obvod ve shodě s charakteristikou



Předpokládáme, že proud tekoucí do hradla lze zanedbat ($I_{GSS} \sim nA$)

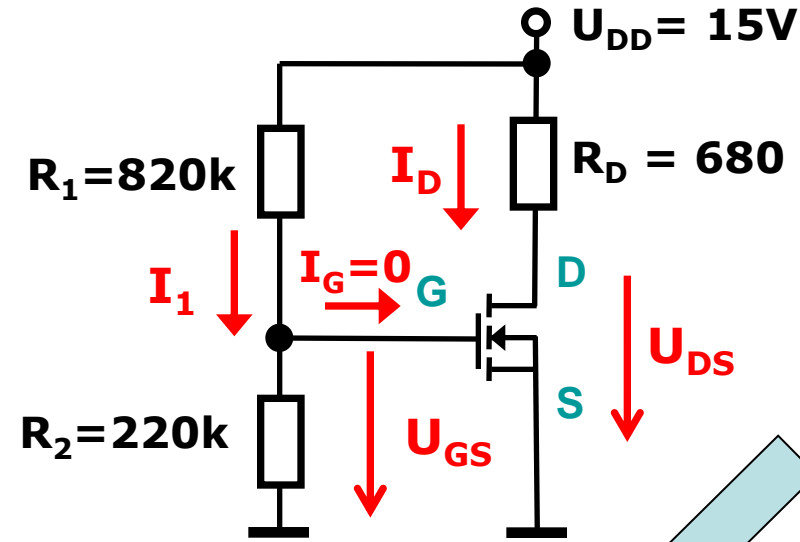
$$I_G = 0$$



7.3 Postup určení polohy pracovního bodu - Řešení



1. Popsat obvod ve shodě s charakteristikou
2. Sestavit obvodové rovnice



Úpravou

I_D [mA]

$$I_D = (U_{DD} - U_{DS}) / R_D \quad (1)$$

zatěžovací charakteristika zdroje U_{DD} R_D

$$U_{GS} = U_{DD} (R_2 / (R_1 + R_2)) \quad (2) + (3)$$

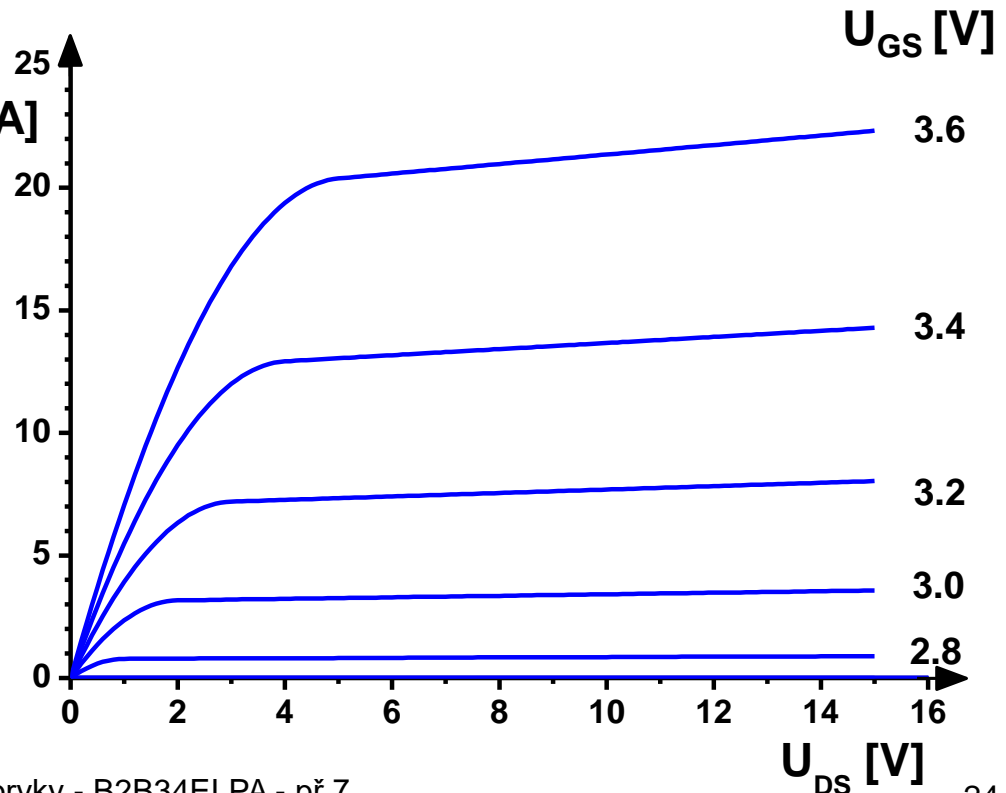
nezatížený napěťový dělič R_1 R_2

$$U_{GS0} = 15V (220 / (220 + 820)) = 3.17V$$

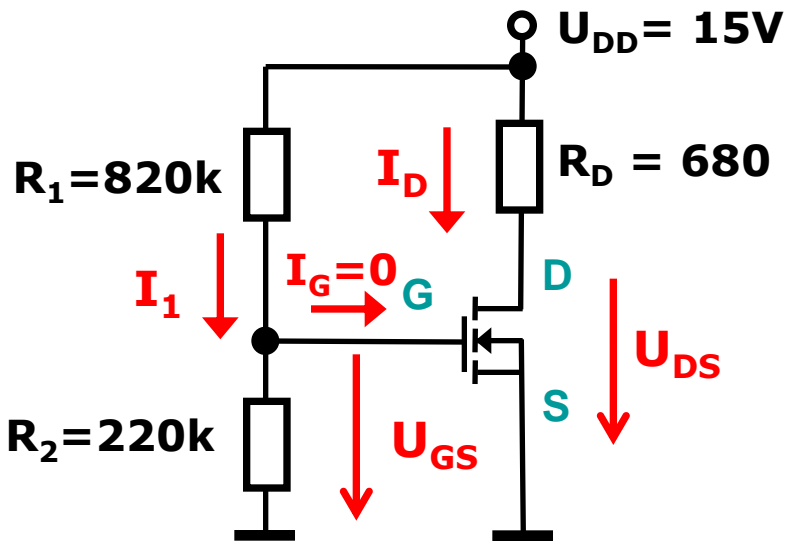
$$U_{DD} = R_D I_D + U_{DS} \quad (1)$$

$$U_{DD} = R_1 I_1 + R_2 I_1 \quad (2)$$

$$U_{GS} = R_2 I_1 \quad (3)$$



7.3 Postup určení polohy pracovního bodu - Řešení



1. Popsat obvod ve shodě s charakteristikou
2. Sestavit obvodové rovnice

3. Grafické řešení

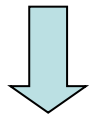
$$U_{GS0} = 3.17V \rightarrow$$

vybrat nejbližší vrstevnici charakteristiky pro U_{GS0}

$$I_D = (U_{DD} - U_{DS}) / R_D \quad (1) \rightarrow$$

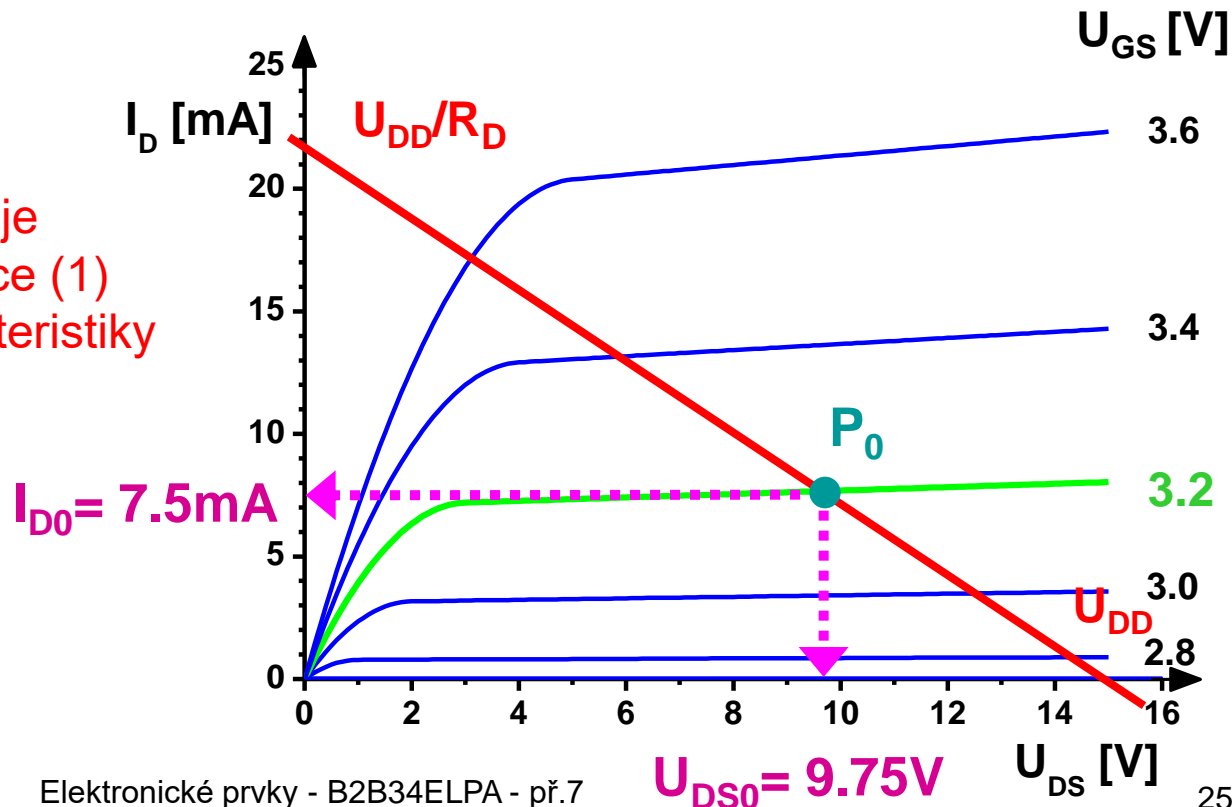
vynést graf (1) v charakteristice

Pracovní bod tranzistoru P_0 je dán průsečíkem grafu rovnice (1) s vrstevnicí výstupní charakteristiky pro $U_{GS0} = 3.2V$.



$$P_0 = [U_{GS0}, U_{DS0}, I_{D0}]$$

$$P_0 = [3.2V, 9.75V, 7.5mA]$$



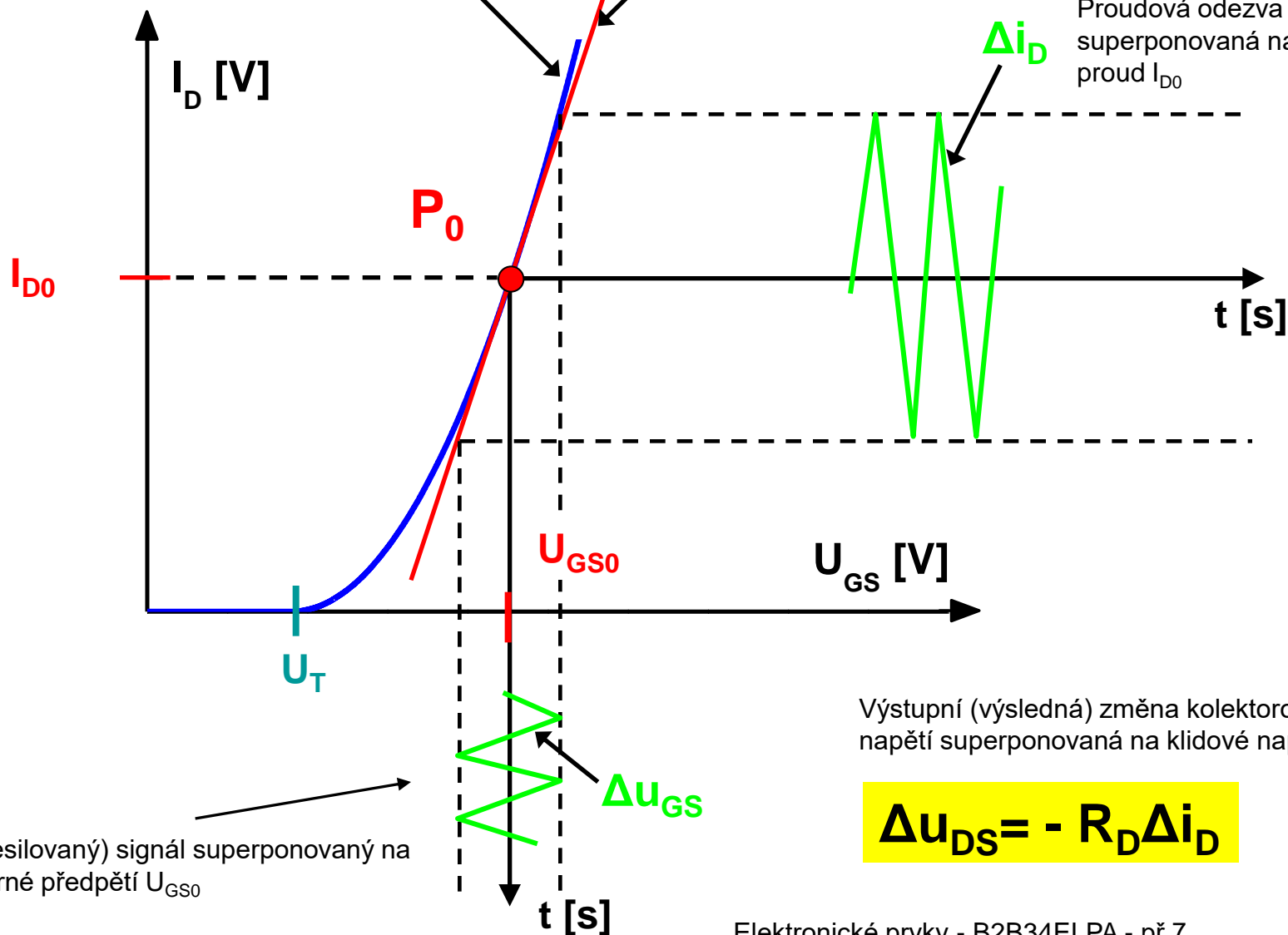
7.4 MOSFET jako zesilovač malého signálu

převodní charakteristika $I_D = f(U_{GS})$

pro okolí P_0 lze považovat za lineární

u MOSFETu platí pokud $\Delta u_{GS} \ll 2(U_{GS} - U_T)$

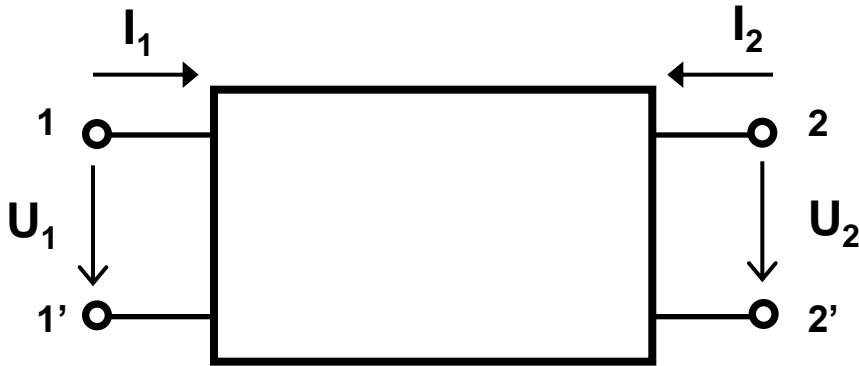
Proudová odezva
superponovaná na klidový
proud I_{D0}



$$\Delta u_{DS} = -R_D \Delta i_D$$

7.4 MOSFET jako odporový dvojbran

dvojbran abstraktní blok s dvojicí vstupních a výstupních svorek, který je charakterizovaný vztahy mezi obvodovými veličinami U_1, I_1, U_2, I_2

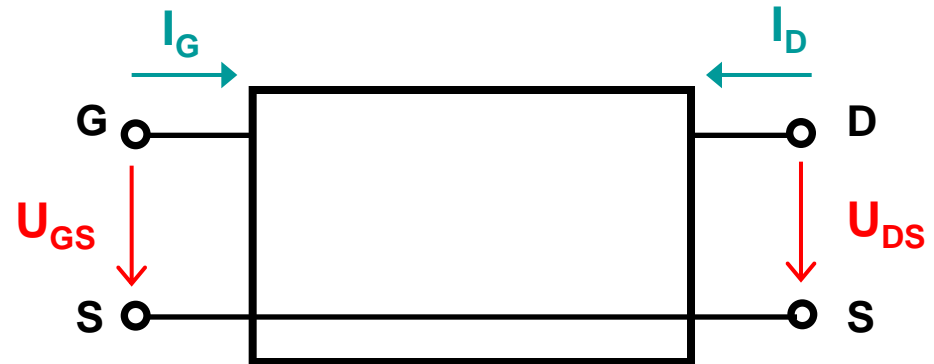
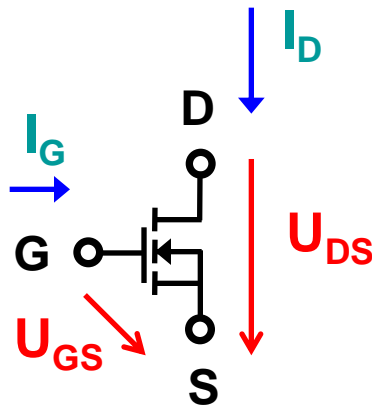


Obecný dvojbran bývá popsán dvojicí nelineárních časově neproměnných rovnic

$$U_1 = h_1(I_1, U_2)$$

$$I_2 = h_2(I_1, U_2)$$

V případě MOSFETu

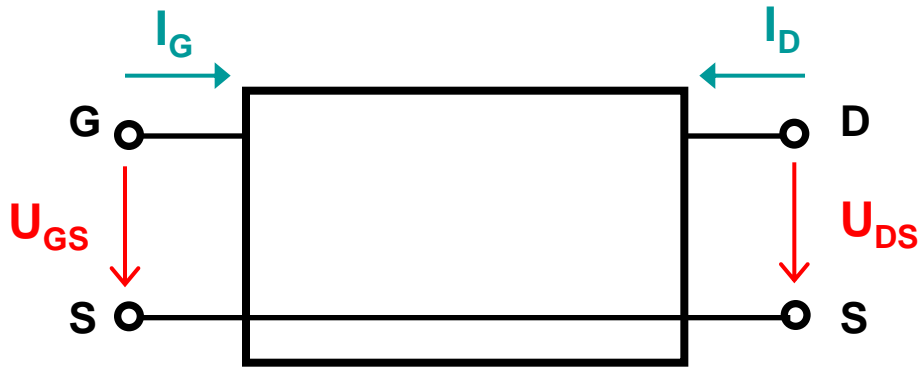


$$I_G = y_1(U_{GS}, U_{DS})$$

$$I_D = y_2(U_{GS}, U_{DS})$$

U tranzistorů řízených polem (FET) jsou řídicí veličiny jsou napětí. Je-li substrát spojen s emitorem je bývá uváděn elektroda společná pro vstup i výstup.

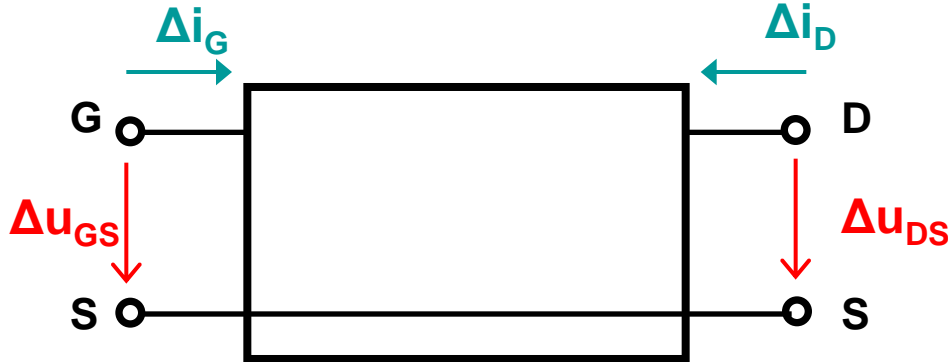
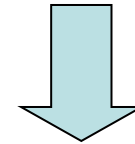
7.4 Linearizace charakteristik pro okolí P_0



$$I_G = y_1(U_{GS}, U_{DS})$$

$$I_D = y_2(U_{GS}, U_{DS})$$

Nahrazení nelineárních funkcí funkcemi lineárními, pro změny veličin je dvojbran popsán 4 parametry, které představují parciální derivace výstupních veličin dle v stupních v pracovním bodě P_0 .



$$\Delta i_G = y_{11} \Delta u_{GS} + y_{12} \Delta u_{DS}$$

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

$$y_{11} = \left. \frac{\partial I_G}{\partial U_{GS}} \right|_{P_0}$$

vstupní vodivost

$$y_{12} = \left. \frac{\partial I_G}{\partial U_{DS}} \right|_{P_0}$$

zpětná transkonduktance

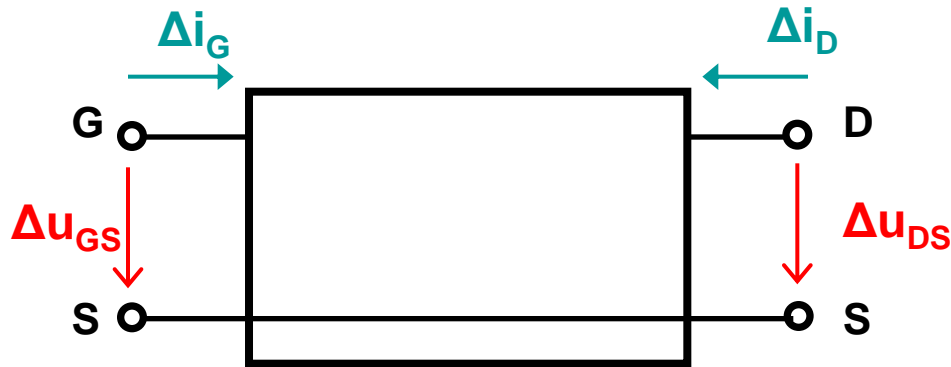
$$y_{21} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{P_0}$$

transkonduktance

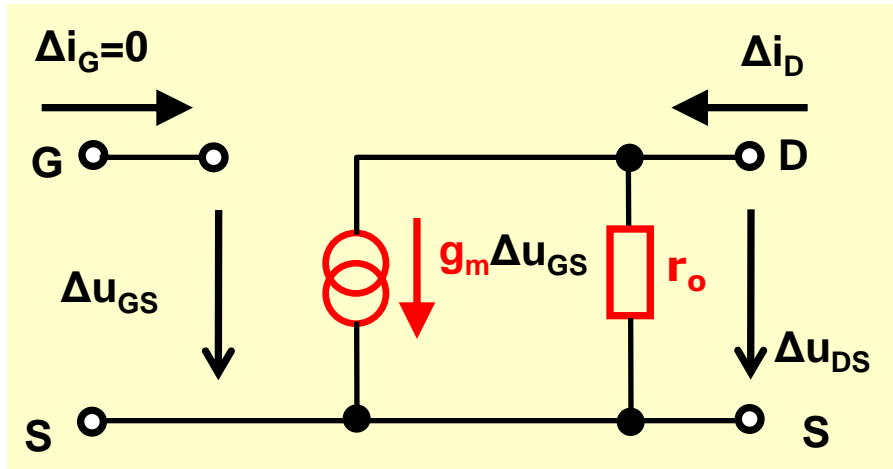
$$y_{22} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{P_0}$$

výstupní vodivost

7.4 Linearizace charakteristik pro okolí P_0



Náhradní Lineární Obvod (NLO)
pro změny veličin

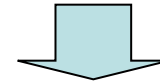


MOSFET $I_G = 0$

U MOSFETu nulový vstupní proud implikuje nulovou vstupní vodivost a zpětnou transkonduktanci.

$$\Delta i_G = 0 \Rightarrow y_{11}, y_{12} = 0$$

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



U MOSFETu je NLO popsán dvěma parametry: transkonduktancí (y_{21}) a výstupní vodivostí (y_{22}).

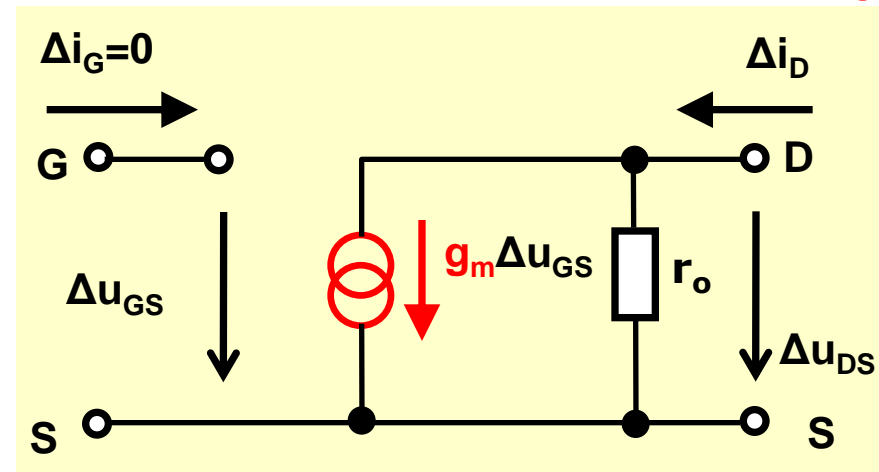
$$y_{21} = \left(\frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right)_{P_0}^{\Delta u_{DS}=0} = g_m$$

$$y_{22} = \left(\frac{\Delta i_D}{\Delta u_{DS}} \right)_{P_0}^{\Delta u_{GS}=0} = 1/r_o$$

7.4 Diferenciální strmost g_m

$$g_m = y_{21} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{P_0}$$

rozměr [A/V] resp. [S]
typické hodnoty 1mA/V – 1A/V

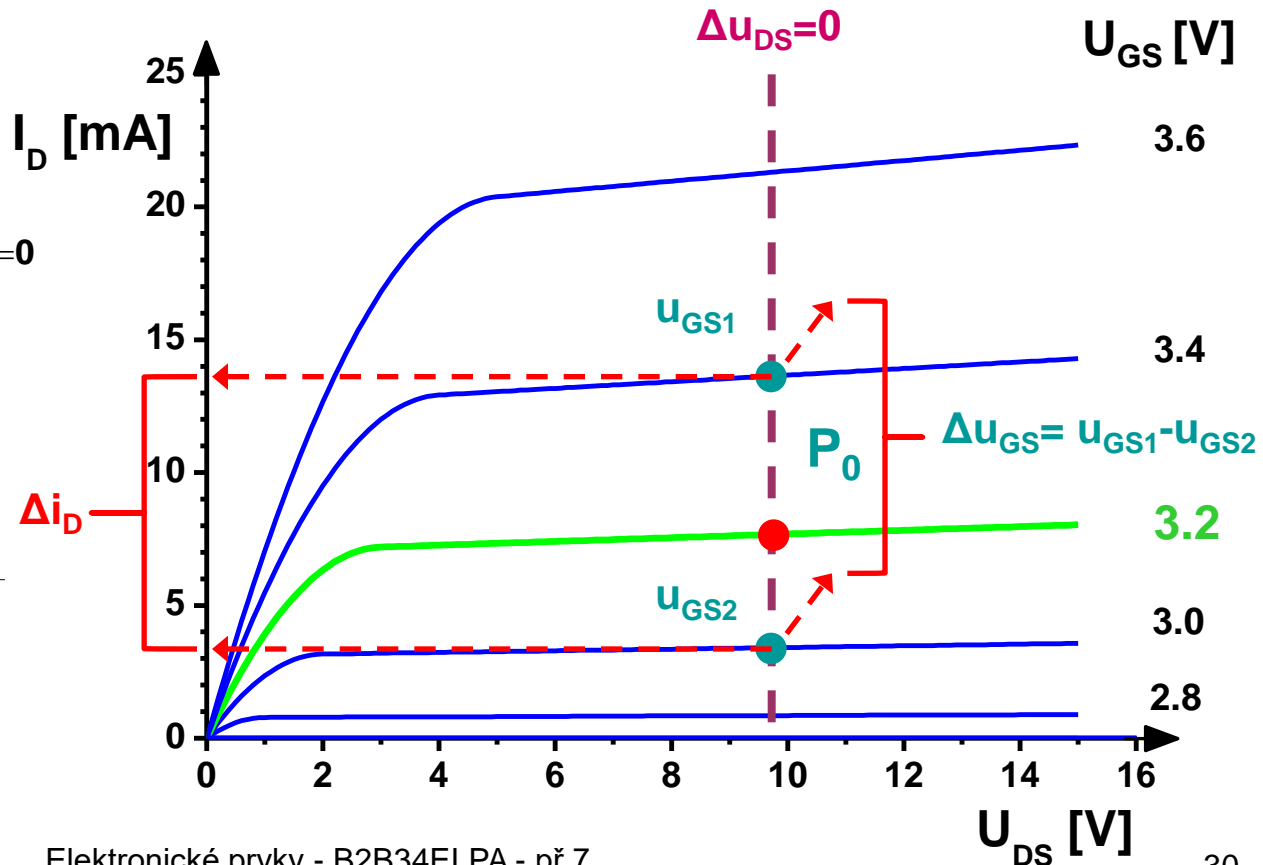


Stanovit lze z poměru
diferencí Δi_D ku Δu_{GS}

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

$$g_m = \frac{13.7\text{mA} - 3.5\text{mA}}{3.4\text{V} - 3.0\text{V}}$$

$$g_m = 25.5 \text{ mS}$$



7.4 Diferenciální strmost g_m (transkonduktance)

$$g_m = y_{21} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{P_0}$$

vztahy platí pro oblast saturace !!!

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)$$

vyšší hodnoty $U_{GS} - U_T$ omezují rozkmit výstupního signálu (rozšíření odporové oblasti)

možnost ovládání g_m při návrhu tranzistoru

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox}} \sqrt{\frac{W}{L}} \sqrt{I_D}$$

pro daný MOSFET strmost roste s odmocninou kolektorového proudu

pro daný proud je strmost úměrná $\sqrt{W/L}$

$$g_m = \frac{2I_D}{U_{GS} - U_T}$$

7.4 Diferenciální výstupní odpor r_o

$$r_o = 1/y_{22} = \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \right|_{P_0}$$

rozměr $[\Omega]$

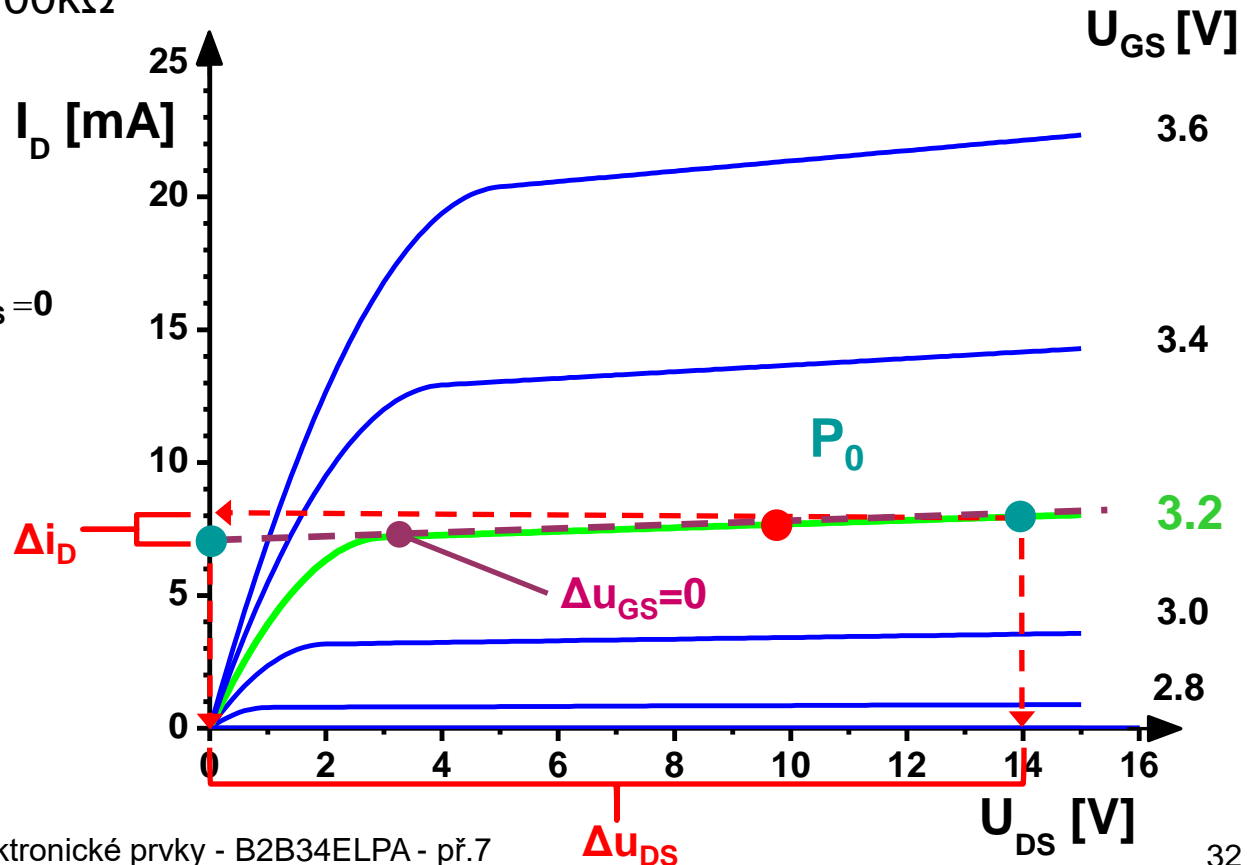
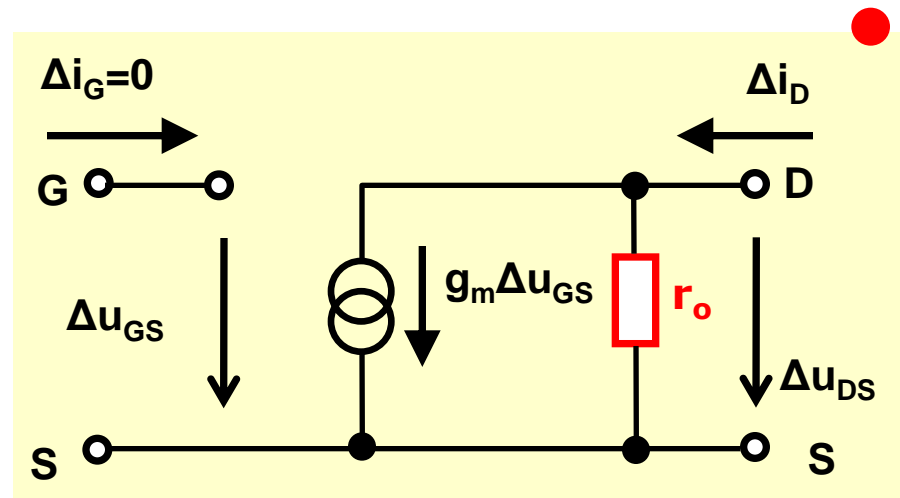
typické hodnoty $10\text{k}\Omega - 100\text{k}\Omega$

Stanovit lze z poměru
diferencí Δu_{DS} ku Δi_D

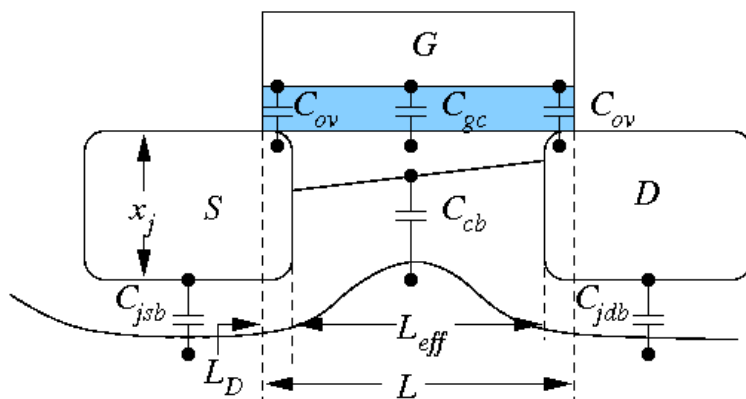
$$r_o = 1/y_{22} = \left(\frac{\Delta u_{DS}}{\Delta i_D} \right)_{P_0}^{\Delta u_{GS}=0}$$

$$r_o = \frac{14\text{V} - 0\text{V}}{8\text{mA} - 7\text{mA}}$$

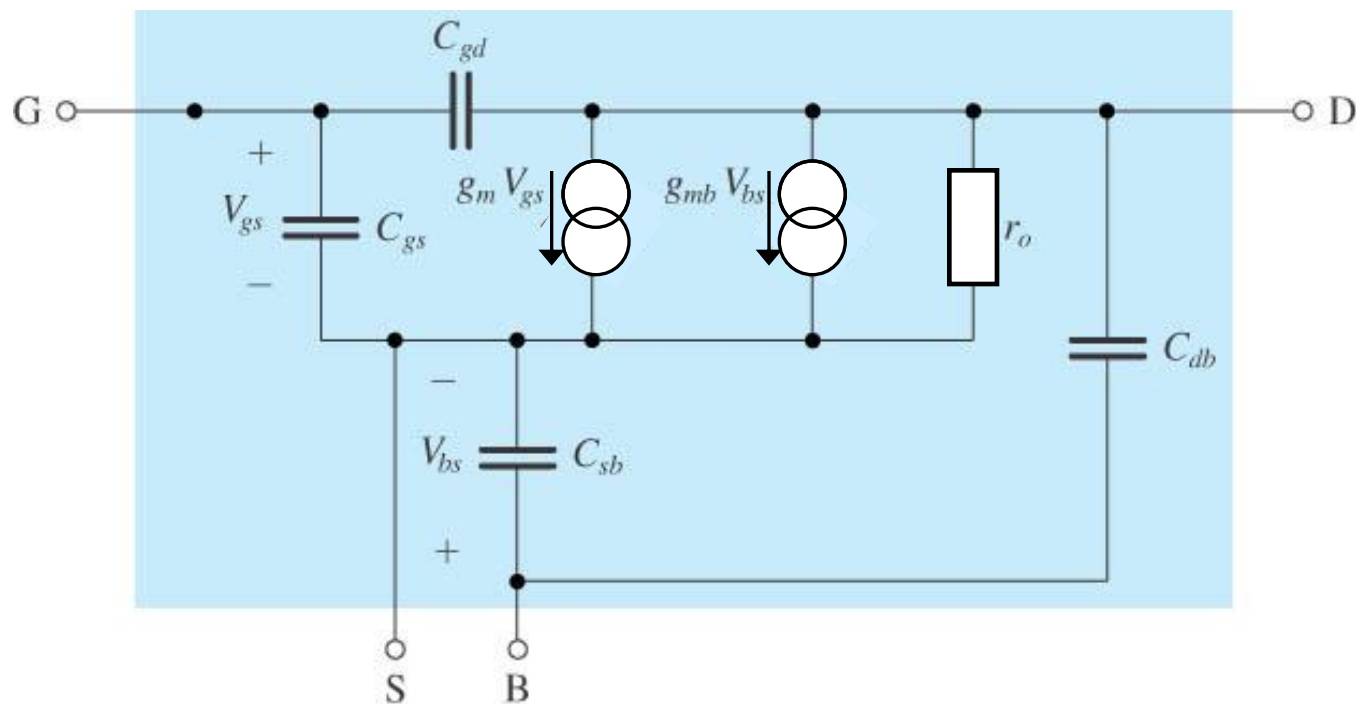
$$r_o = 14\text{ k}\Omega$$



7.4 MOSFET úplný vysokofrekvenční model



uvažuje řadu parazitních kapacit
a vliv modulace kanálu zpětným
hradlem (Body Effect, backgating)

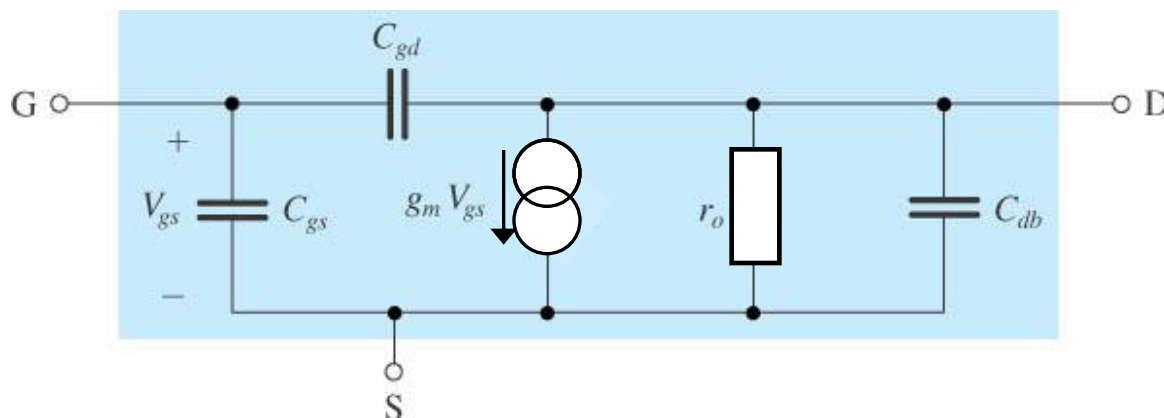


7.4 MOSFET kapacity tranzistoru

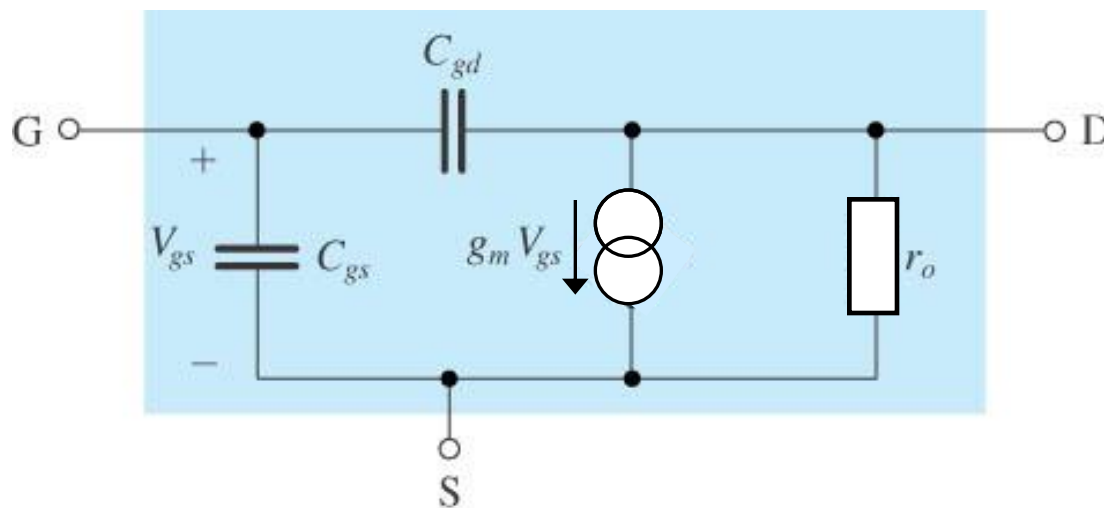
- odporová (triódová) oblast $C_{gs} = C_{gd} = \frac{1}{2}WLC_{ox}$
- saturace $\begin{cases} C_{gs} = \frac{2}{3}WLC_{ox} \\ C_{gd} = 0 \end{cases}$
- nevodivý stav $\begin{cases} C_{gs} = C_{gd} = 0 \\ C_{gb} = WLC_{ox} \end{cases}$
- dále je nutné uvážit parazitní kapacity způsobené přesahem oblastí emitoru a kolektoru pod hradlo
- typicky $C_{ov} = WL_{ov}C_{ox} \quad L_{ov} = 0.05 - 0.1L$
- takto vypočtené hodnoty je třeba přičíst k C_{gs} and C_{gd}

7.4 MOSFET zjednodušený vf model

pro substrát (B) spojený
s emitorem (S)



pro substrát (B) spojený
s emitorem (S) +
zanedbaná kapacita C_{db}



7.4 MOSFET mezní kmitočet

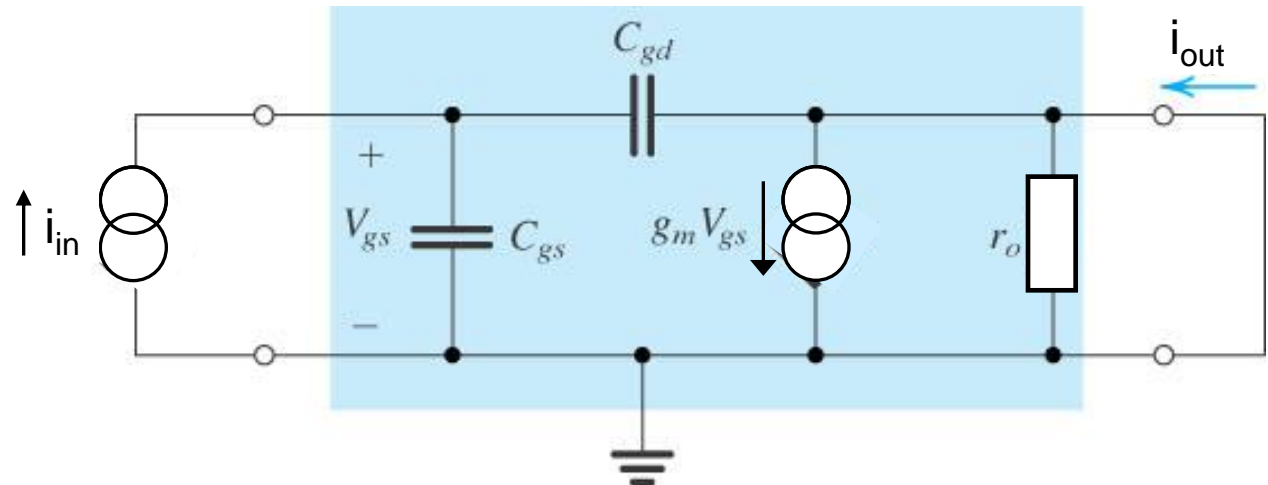
Mezní kmitočet f_T je definován jako frekvence při níž je proudový zisk i_{out}/i_{in} roven jedné.

$$\left. \begin{aligned} i_{in} &= j\omega C_{gs} u_{gs} \\ i_{out} &= g_m u_{gs} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &C_{gs} \approx C_{ox} WL \\ &\text{zanedbán vliv } C_{gd} \end{aligned}$$

Při $f=f_T$ tak platí $\frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{g_m u_{gs}}{2\pi f_T C_{gs} u_{gs}} = 1$

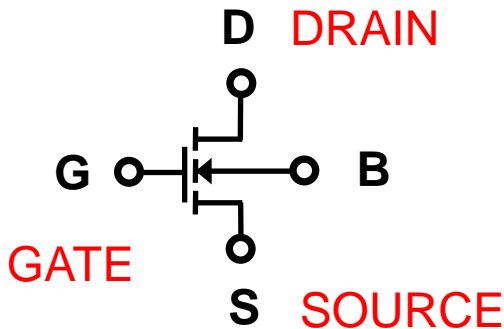
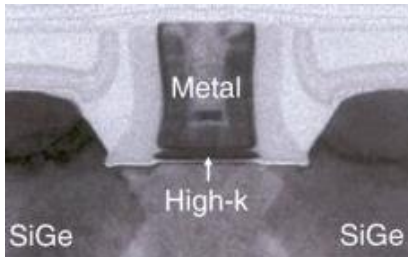
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{gs}}$$

$$f_T = \frac{\mu(U_{GS} - U_T)}{2\pi L^2}$$



7.4 MOSFET simulační model pro SPICE

MOSFET je reprezentován textem, který mimo přiřazení vývodů^A obsahuje odkaz na použitý obvodový model^B a jeho parametry^C.



prahové napětí
délka kanálu
šířka kanálu
pohyblivost
koeficient modulace
*pohyblivost*kapacita*

A

```
M1 DRAIN GATE SOURCE NMOS0P5/ELP
* NMOS in model 0.5um CMOS Technology
.model NMOS0P5/ELP NMOS (Level=1
+ VTO=2
+ L=2E-06
+ W=9.2E-03
+ UO=460
+ LAMBDA=0.001
+ KP=2.0E-03
)
```

B

C

Odporový režim

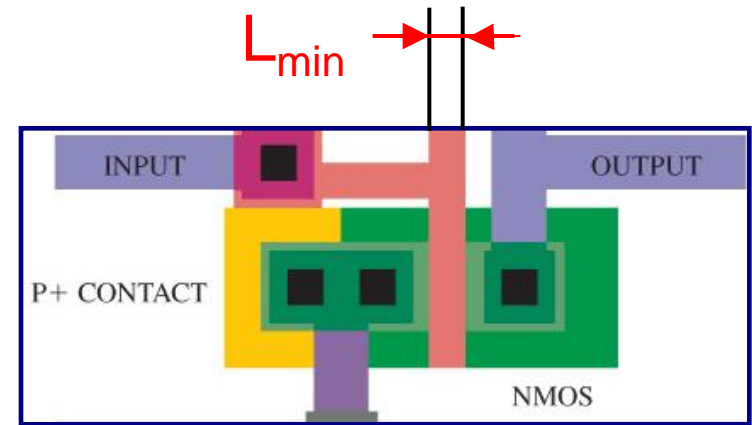
$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$$

Saturace

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

7.4 MOSFET parametry modelu pro SPICE pro různé technologie

Technology	L_{\min}	W_{\min}	$(V_{DD} + V_{SS})_{\max}$
5- μm CMOS	5 μm	12.5 μm	10 V
0.5- μm CMOS	0.5 μm	1.25 μm	3.3 V
0.18- μm CMOS	0.18 μm	0.22 μm	1.8 V



	5- μm CMOS Process		0.5- μm CMOS Process		0.18- μm CMOS Process	
	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS
LEVEL	1	1	1	1	1	1
TOX	8.50e-08	8.50e-08	9.50e-09	9.50e-09	4.08e-09	4.08e-09
UO	750	250	460	115	291	102
LAMBDA	0.01	0.03	0.1	0.2	0.08	0.11
GAMMA	1.4	0.65	0.5	0.45	0.3	0.3
VTO	1	-1	0.7	-0.8	0.5	-0.45