

Cvičení 9: MOSFET jako zesilovač

C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

Náhradní lineární obvod (NLO) tranzistoru MOSFET

Odečet parametrů NLO (Excel)

C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Analýza zapojení a význam jednotlivých obvodových prvků

Příklad CP9.1: Analýza zesilovače s tranzistorem MOSFET: DC analýza (stanovení polohy pracovního bodu tranzistoru graficko-početní metodou), odečet parametrů NLO, AC analýza (stanovení vazebních kapacit a zisku zesilovače)

M9.1 Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

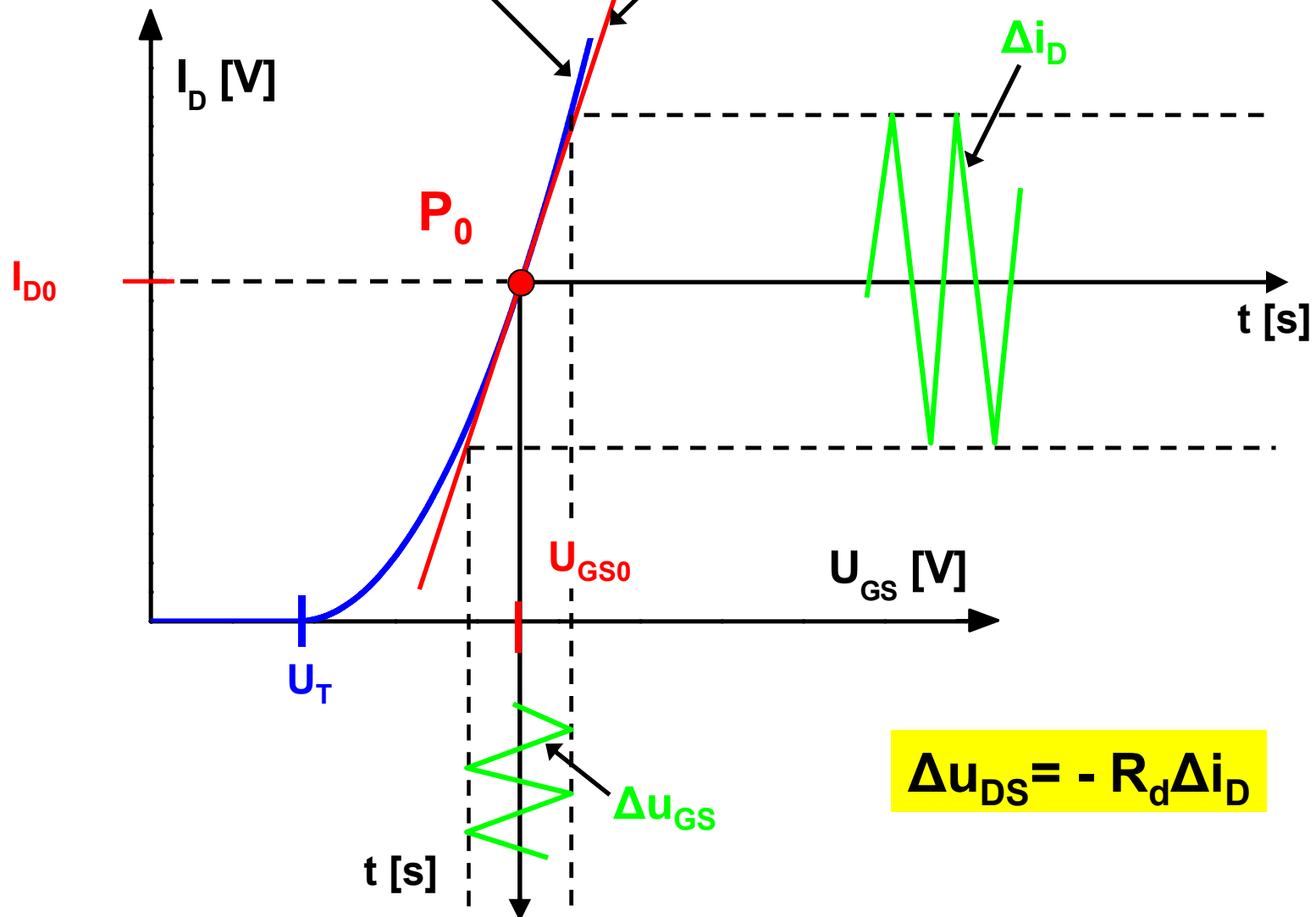
S9.1 Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

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

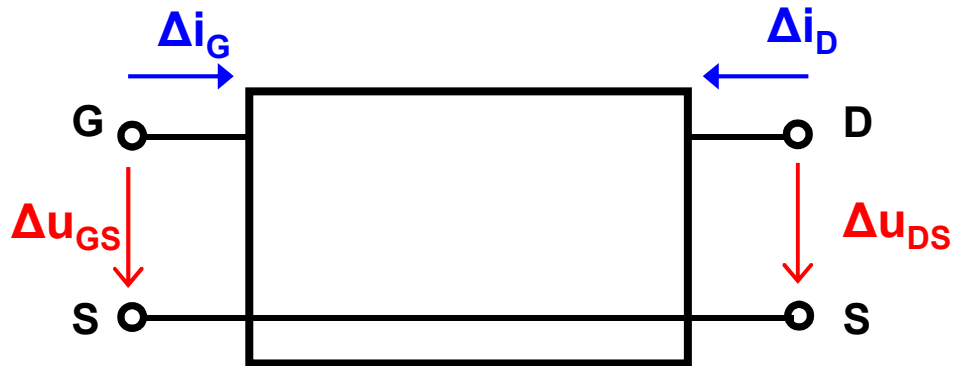
pro okolí P_0 lze linearizovat

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

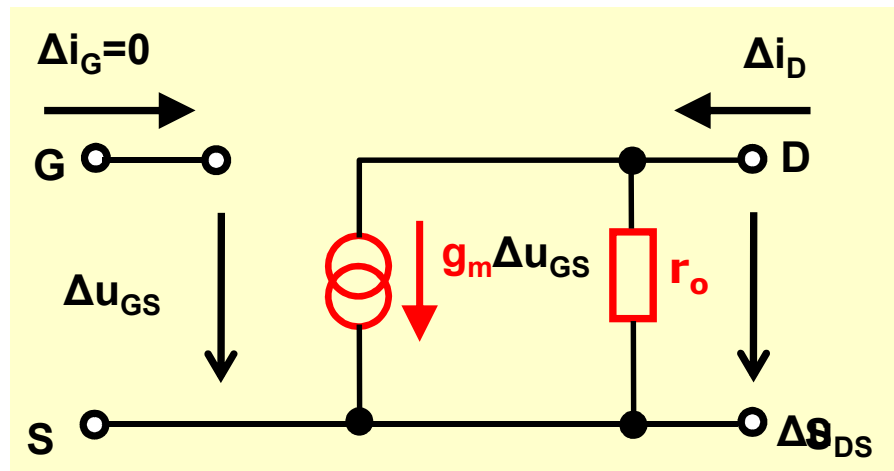


C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

Linearizace pro okolí P_0



náhrada lineárním dvojbranem

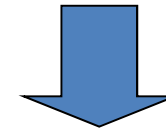


NLO pro změny veličin

MOSFET $I_G = 0$

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

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



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

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

C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

Diferenciální strmost g_m

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

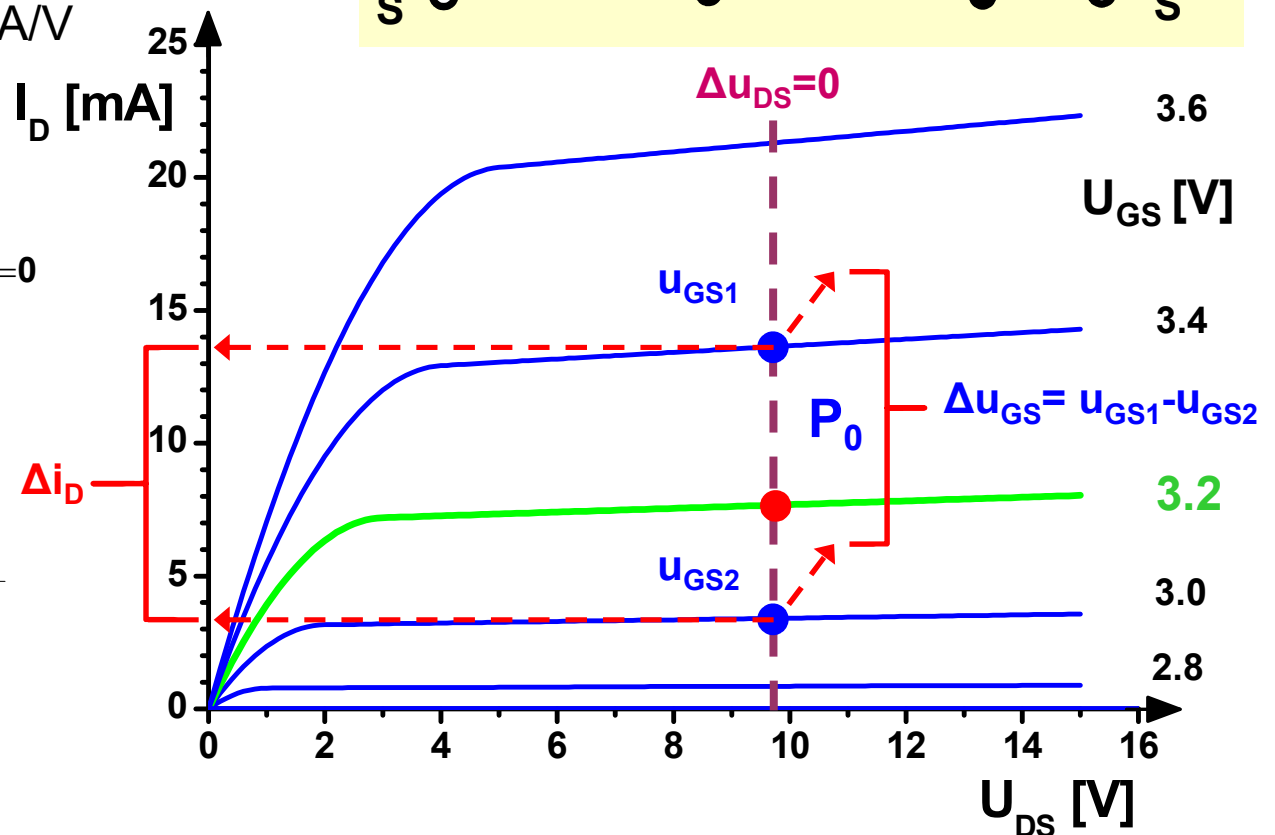
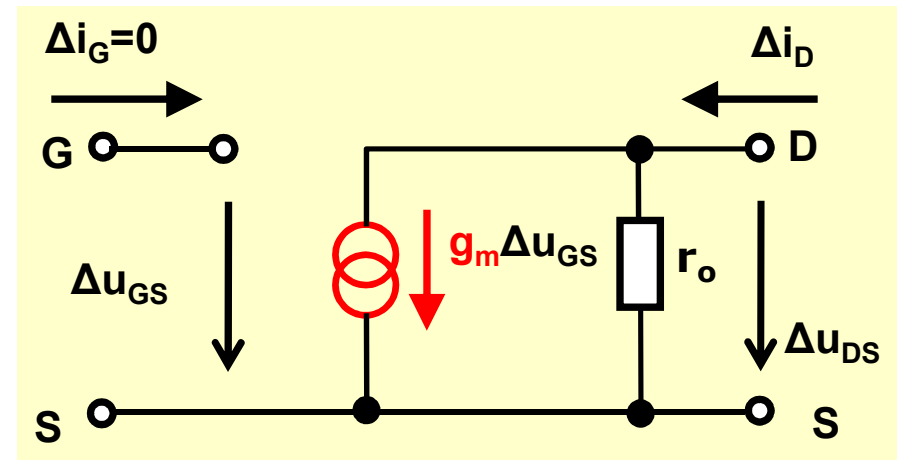
rozměr [A/V] resp. [S]
typické hodnoty 1mA/V – 1A/V

Určí se z poměru
diferencí Δi_D a Δu_{GS}

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

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

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



C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

Diferenciální výstupní odpor r_o

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

rozměr $[\Omega]$

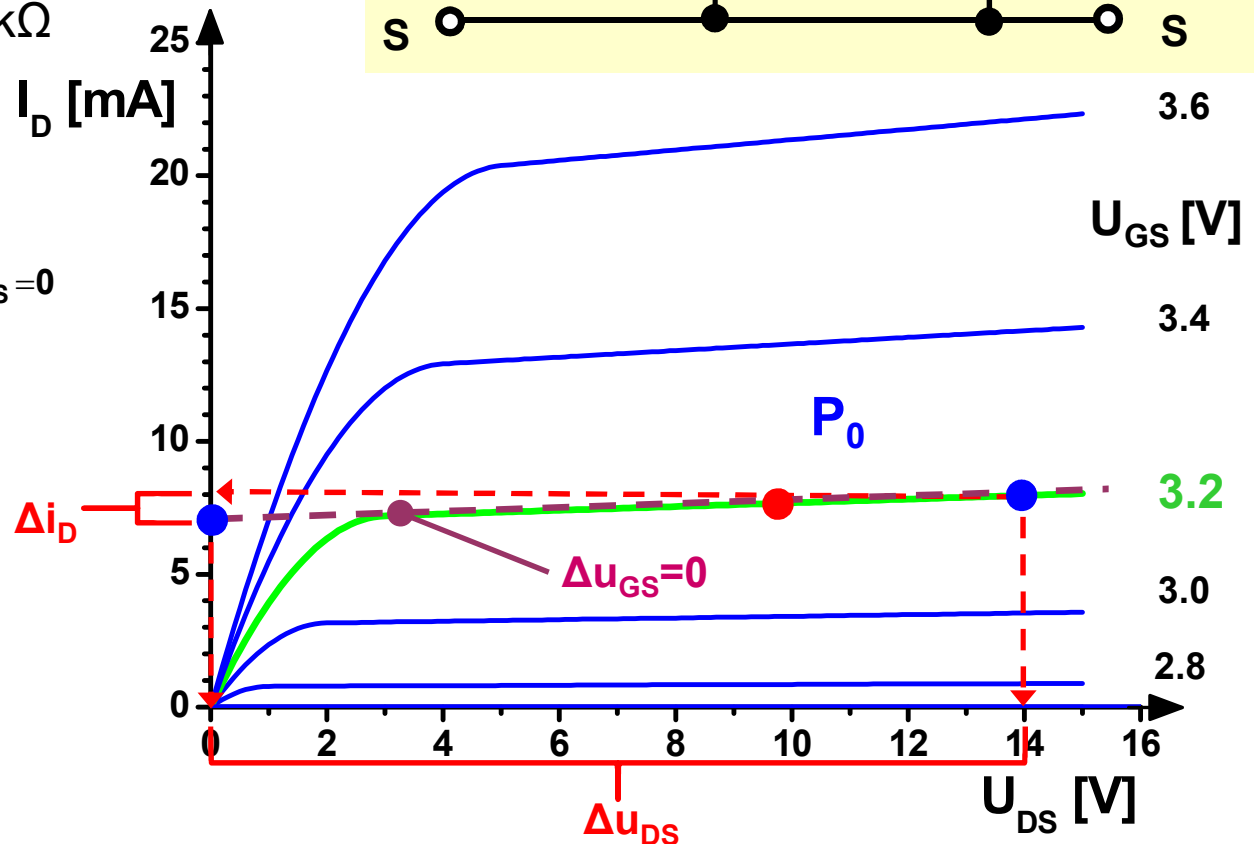
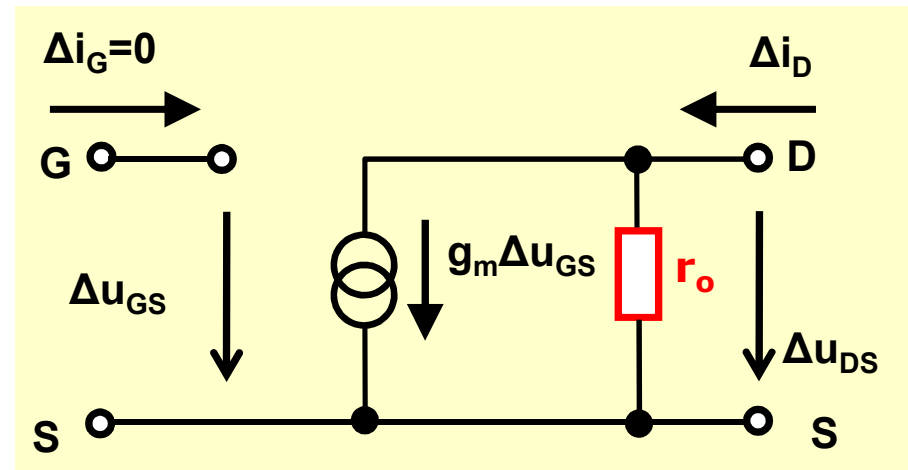
typické hodnoty $10\text{k}\Omega - 100\text{k}\Omega$

Lze stanovit z poměru
diferencí Δu_{DS} a Δi_D

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

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

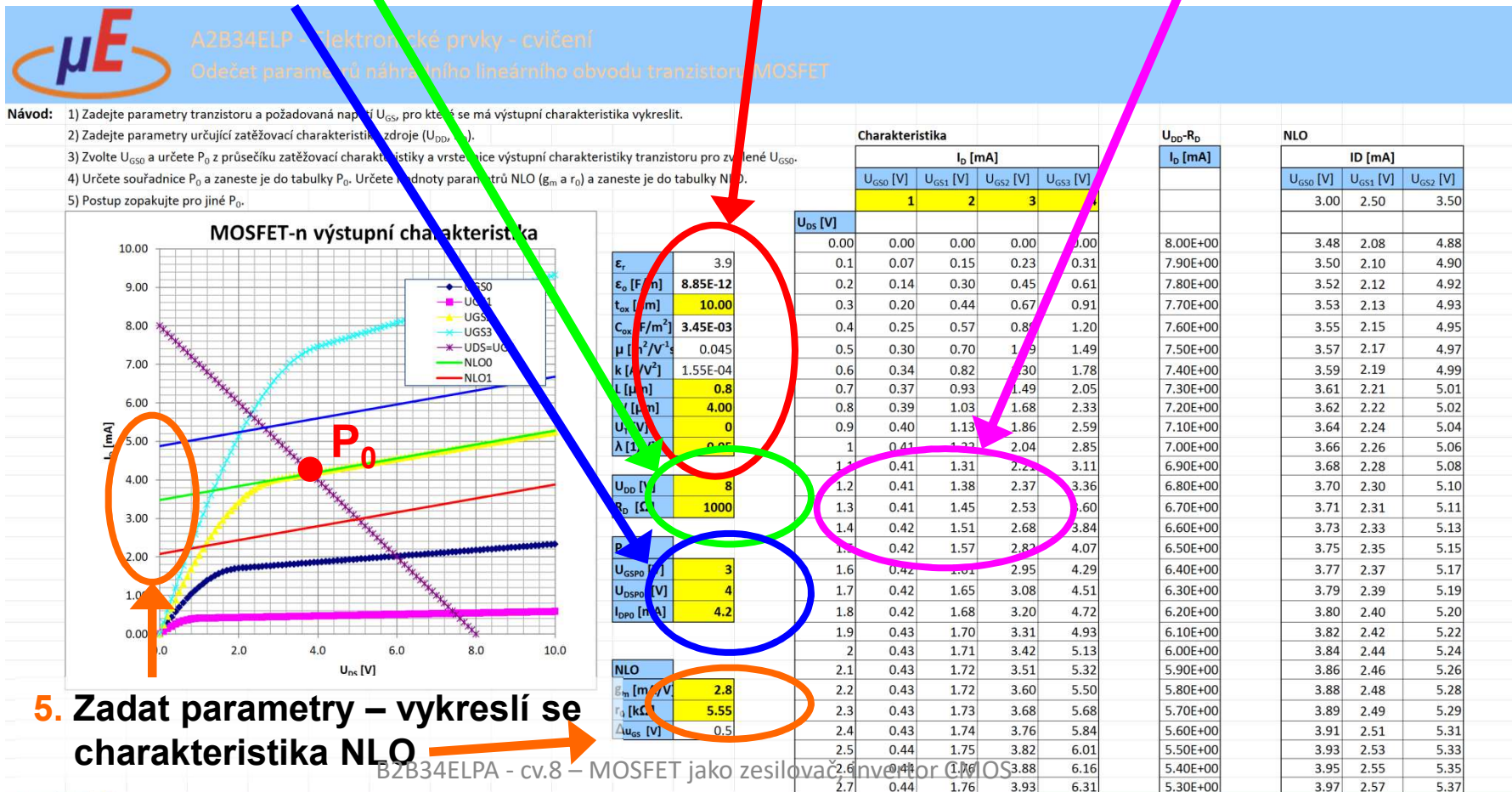
$$r_o = 14\text{ k}\Omega$$



C9.1 MOSFET jako řízený proudový zdroj

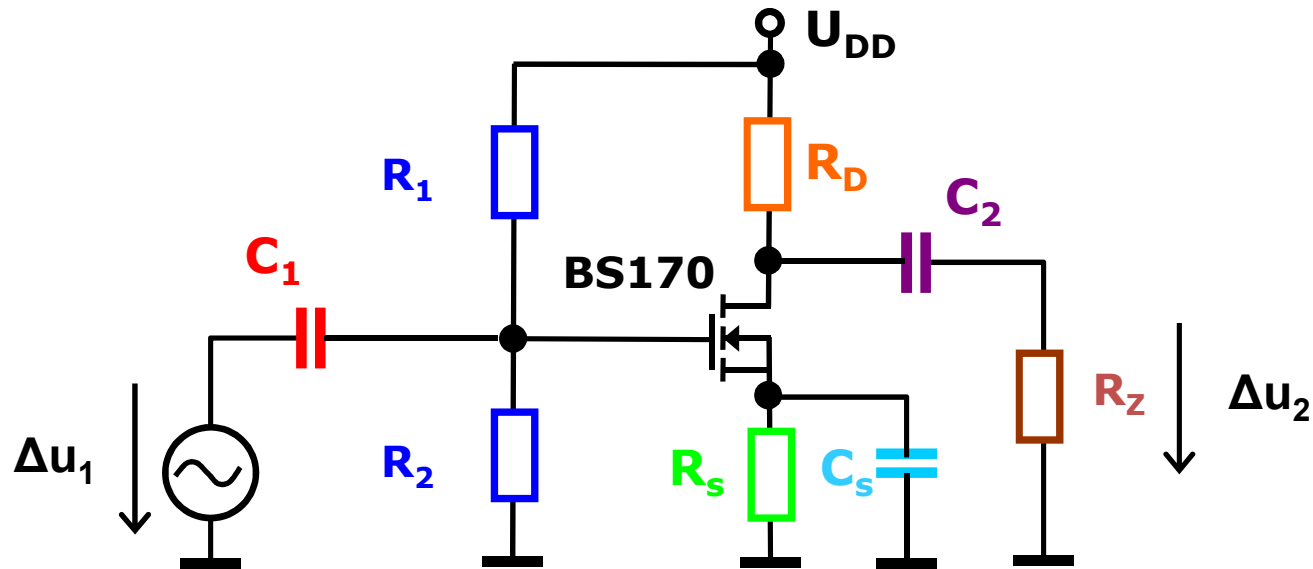
Excel: list **NLO** – odečet parametrů NLO

1. Vykreslení charakteristiky - zadat parametry tranzistoru a napětí U_{GS}
2. Zadání charakteristiky zdroje (U_{DD} , R_D).
3. Určení polohy P_0
4. Odečítání parametrů NLO (g_m , r_0)



C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Zesilovače třídy A s tranzistorem MOSFET



U_{DD}

napětí stejnosměrného napájecího zdroje

Δu_1

vstupní harmonický signál

C_1

vazební kapacita pro navázání vstupního signálu

R_1 R_2

napěťový dělič pro nastavení napětí U_{GS} (P_0)

R_D

zatěžovací odpor tranzistoru

R_S

nastavení zpětné vazby pro stabilizaci P_0 , příp. nastavení napěťového zisku

C_S

blokovací kondenzátor pro střídavé přemostění odporu R_S

C_2

vazební kapacita pro navázání výstupního signálu do zátěže R_Z

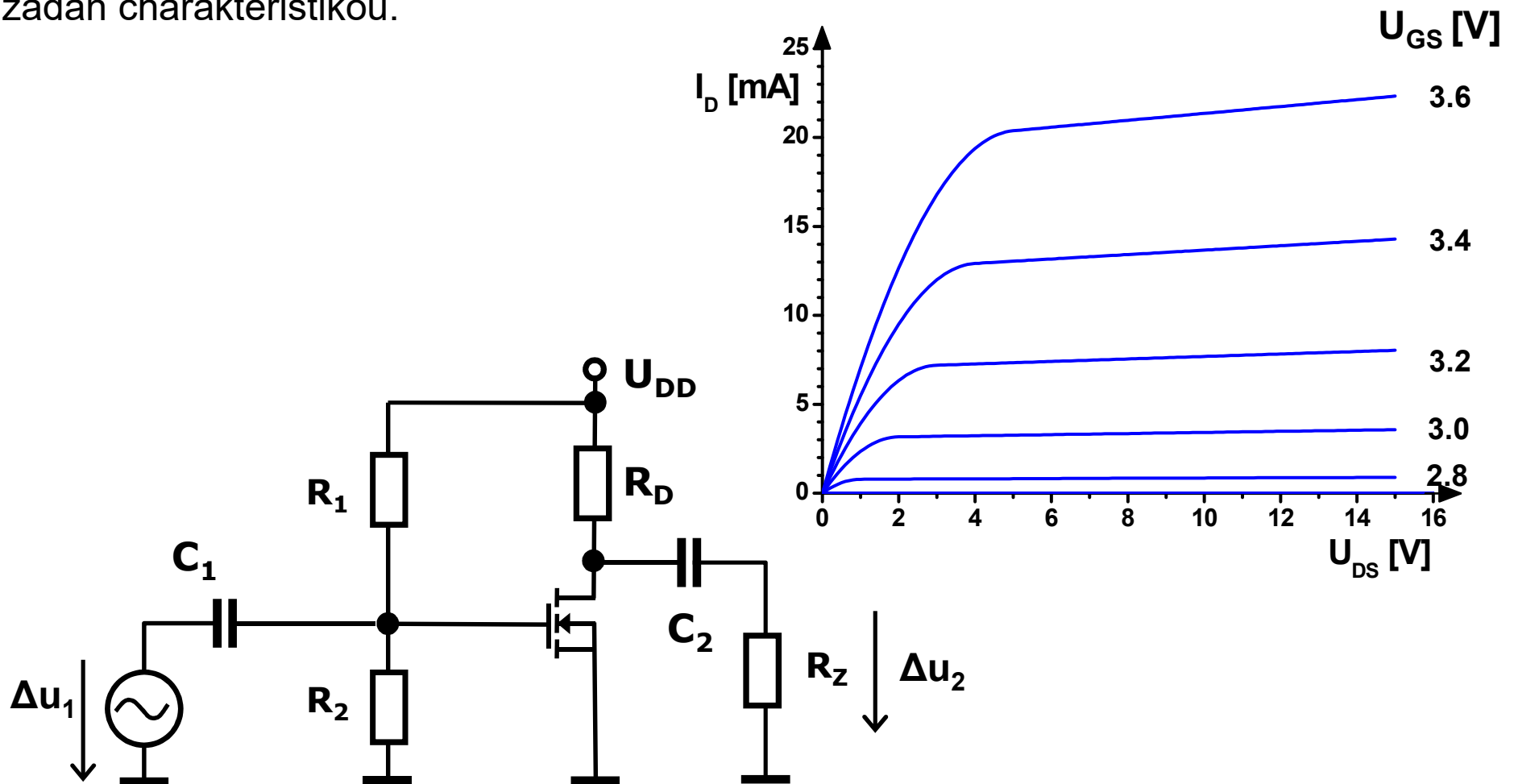
R_Z

zátěž zesilovače

C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Určete napěťové zesílení $A_u = \Delta u_2 / \Delta u_1$ zesilovače s tranzistorem MOSFET. Zadáno: $U_{DD} = 15V$, $R_D = 680$, $R_1 = 820k$, $R_2 = 220k$, $R_Z = 1M$, $C_1 = 100n$, $C_2 = 10\mu$, $f = 1kHz$, tranzistor je zadán charakteristikou.



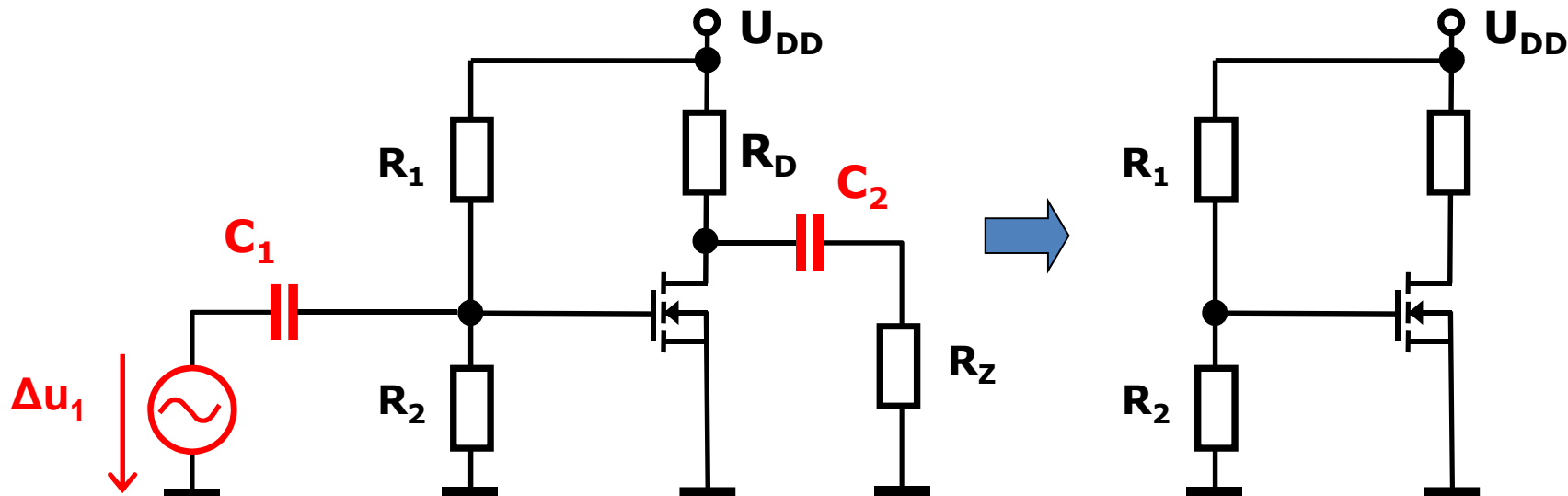
C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **A. Stejnosečná (DC) analýza = nalezení P_0 tranzistoru**

1. Zjednodušení obvodu

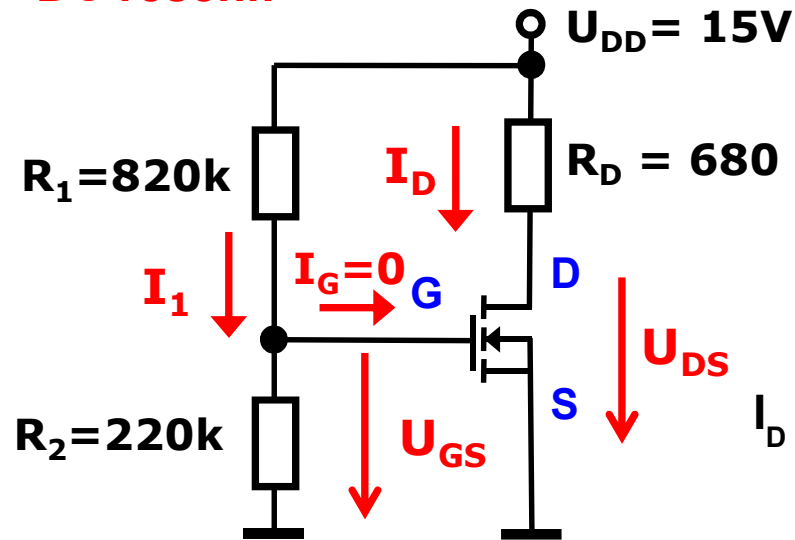
- odstranění střídavých zdrojů
- odstranění obvodových prvků, které se při DC řešení neuplatní: - kapacitory = rozpojené svorky
- induktory = zkrat



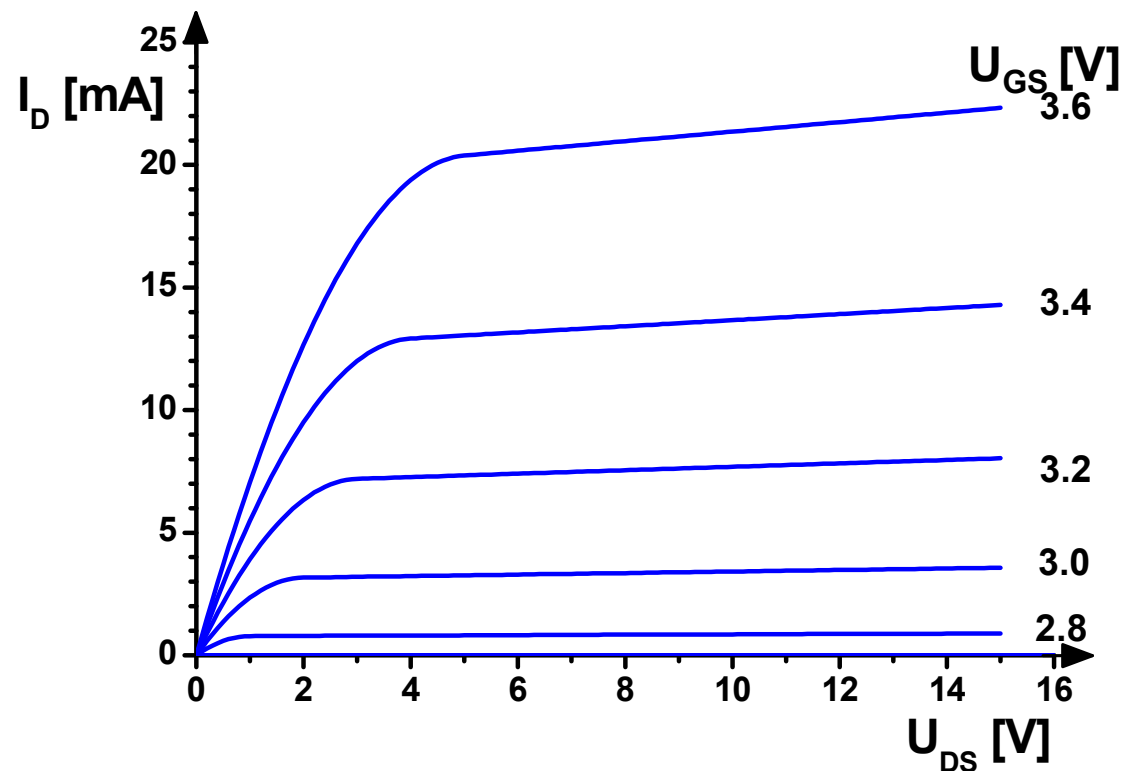
C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

DC řešení:



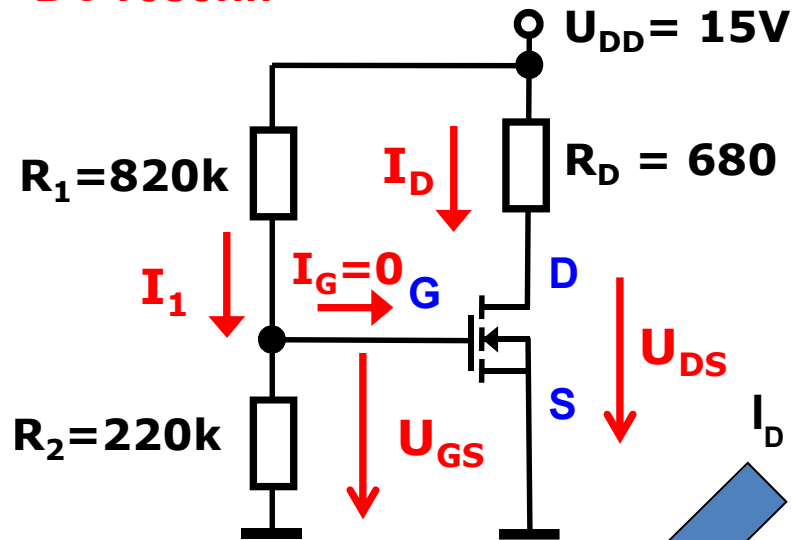
1. Popsat obvod ve shodě s charakteristikou



C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

DC řešení:



Úpravou

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

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

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

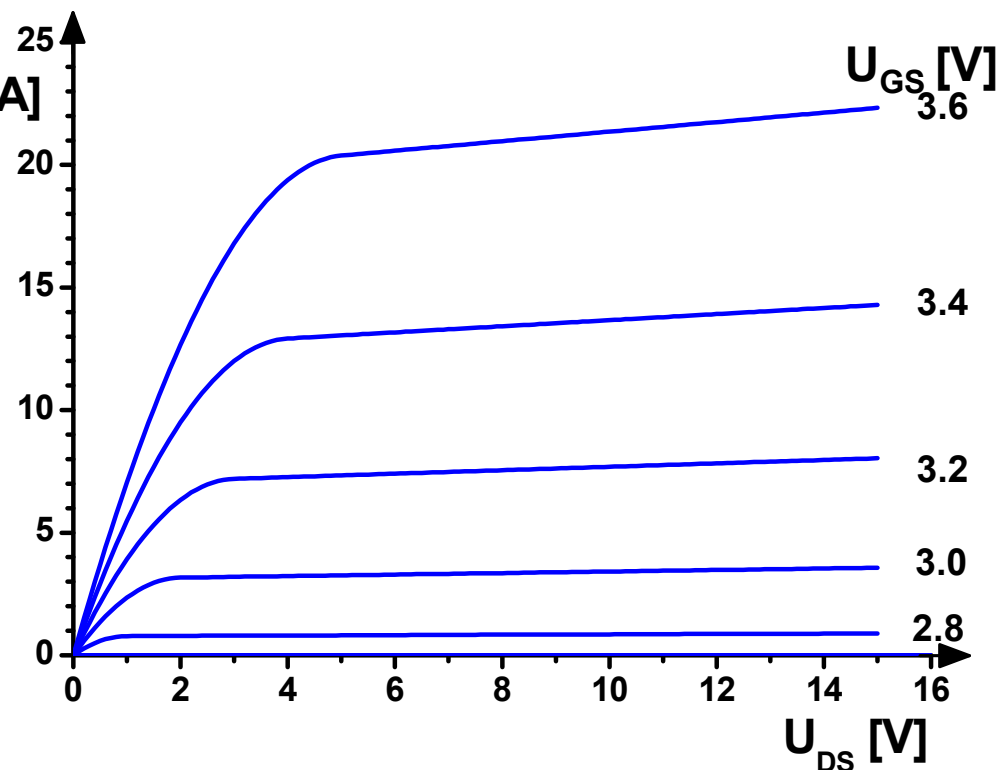
1. Popsat obvod ve shodě s charakteristikou

2. Sestavit obvodové rovnice

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

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

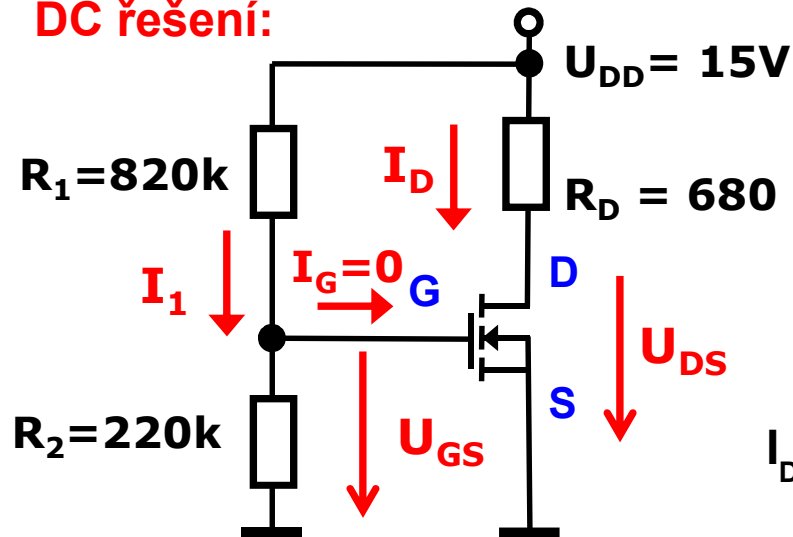
$$U_{GS} = R_2 I_1 \quad (3)$$



C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

DC řešení:



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

$$P_0 = [U_{GS0}, U_{DS0}, I_{D0}]$$
$$P_0 = [3.2V, (9.75V, 7.5mA)]$$

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

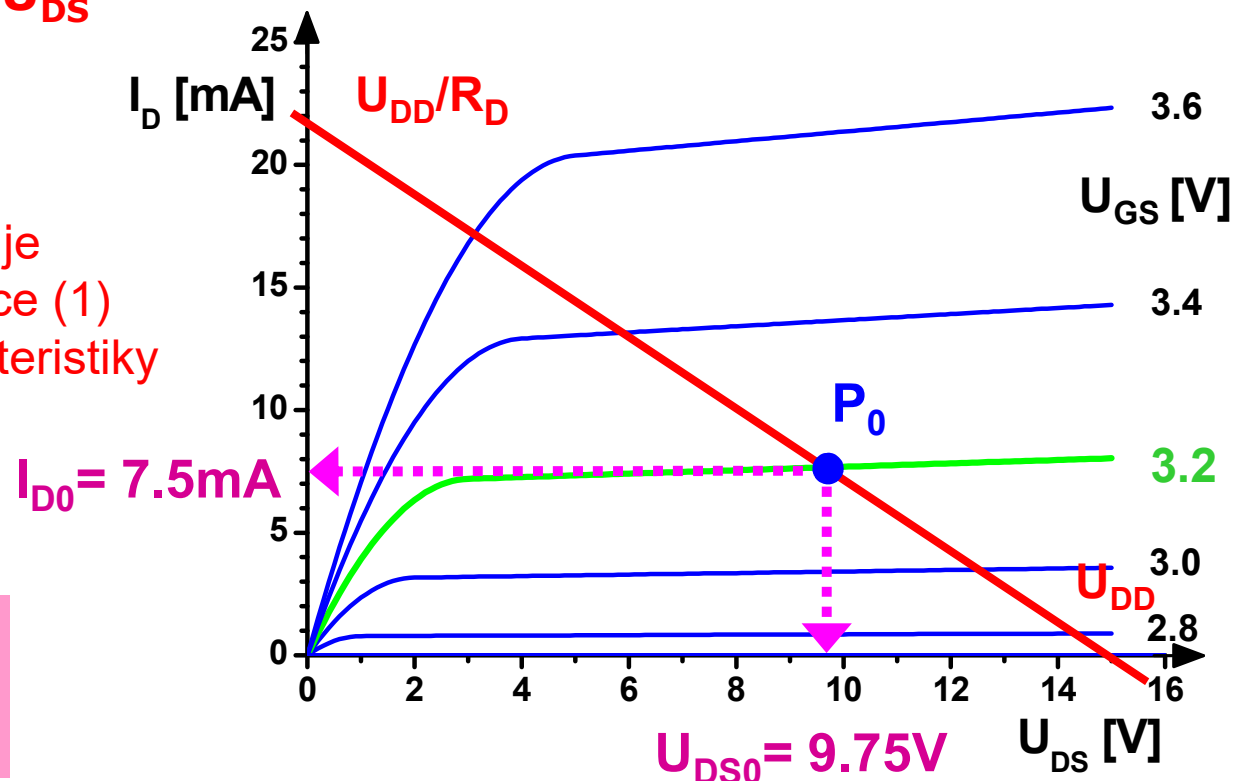
3. Grafické řešení

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

vybrat nejbližší vrstevnici charakteristiky pro U_{GS0}

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

vyčíst graf (1) v charakteristice



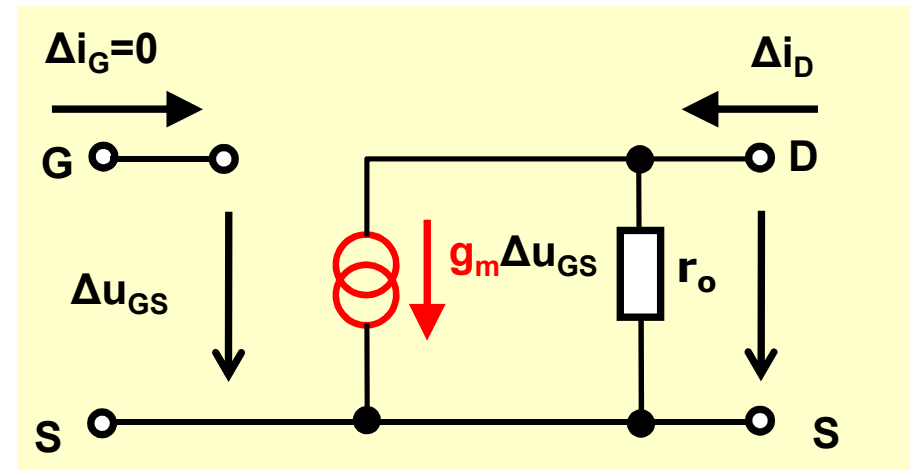
C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

B. Určení parametrů NLO pro daný P_0 :

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

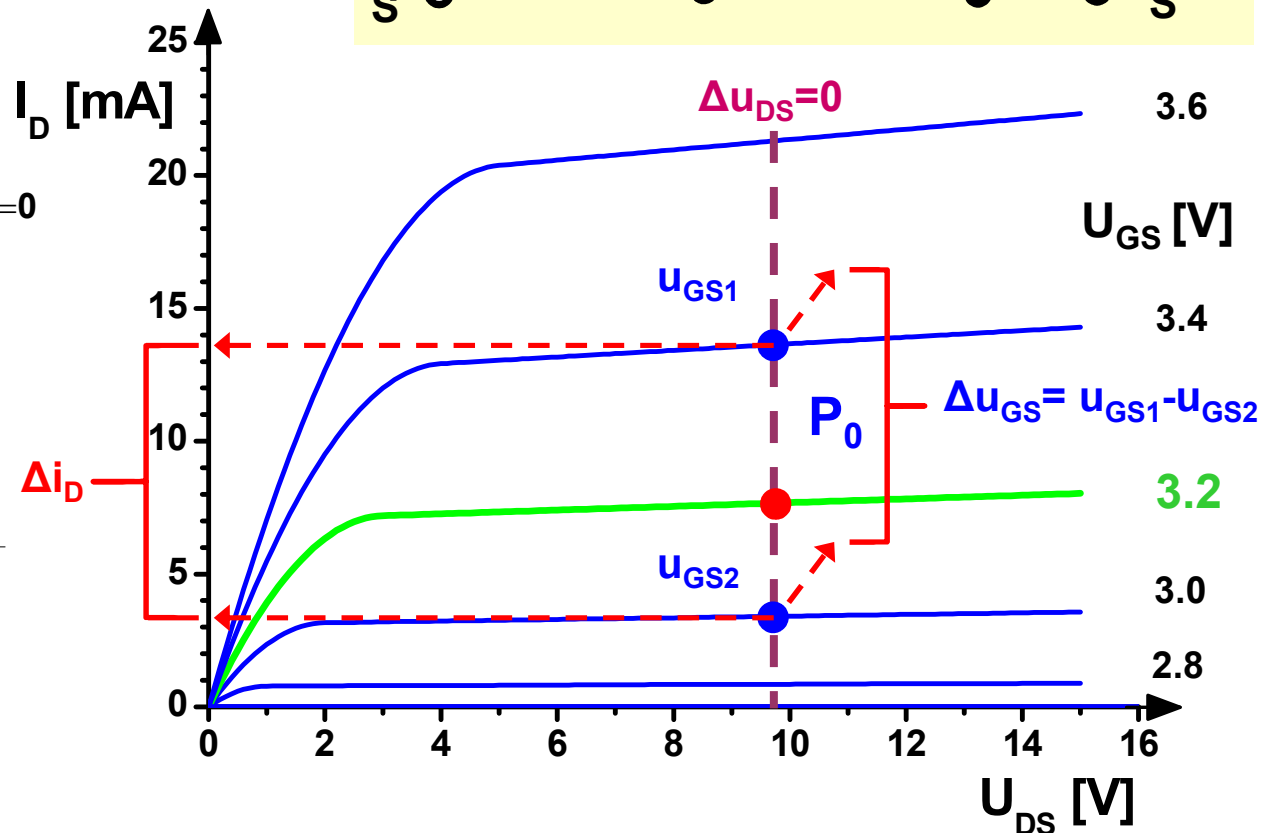
$$P_0 = [3.2V, (9.75V, 7.5mA)]$$



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

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

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



C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

B. Určení parametrů NLO pro daný P_0 :

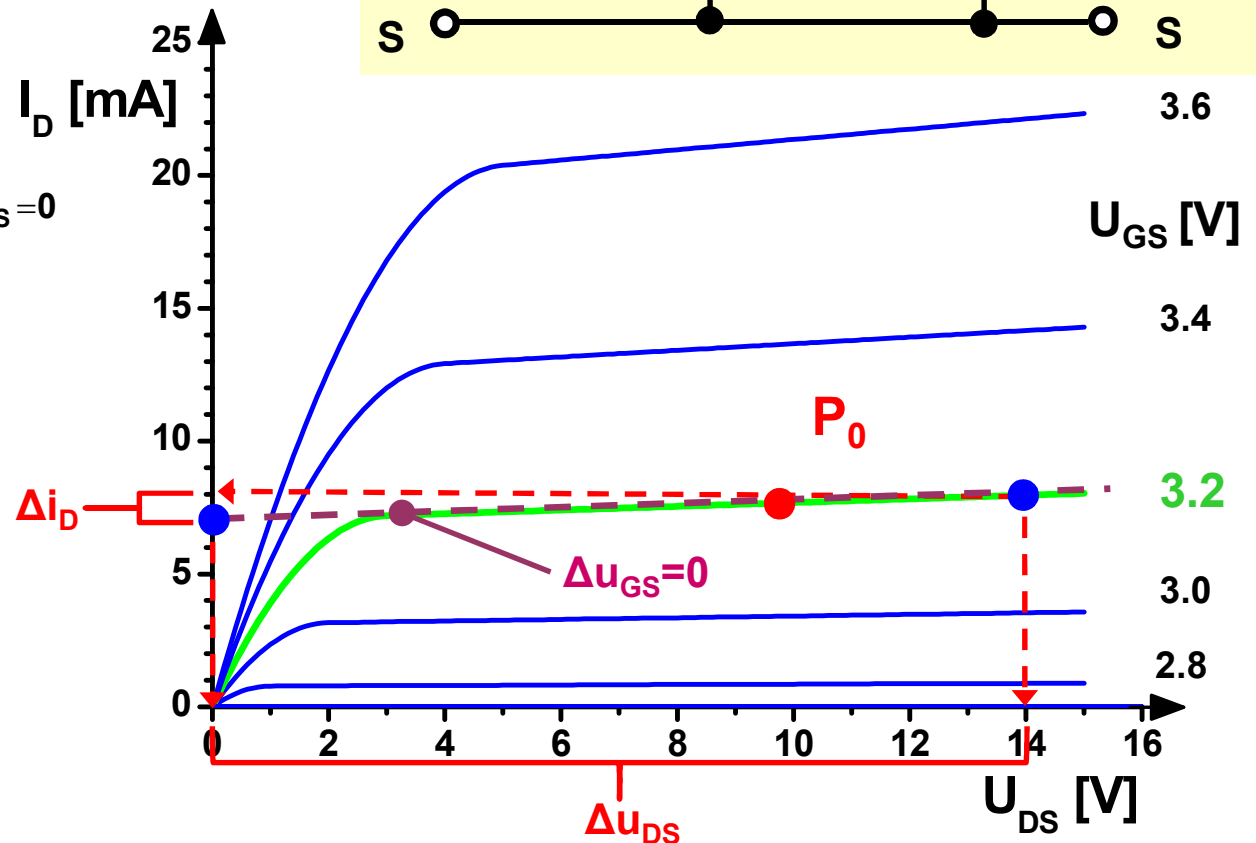
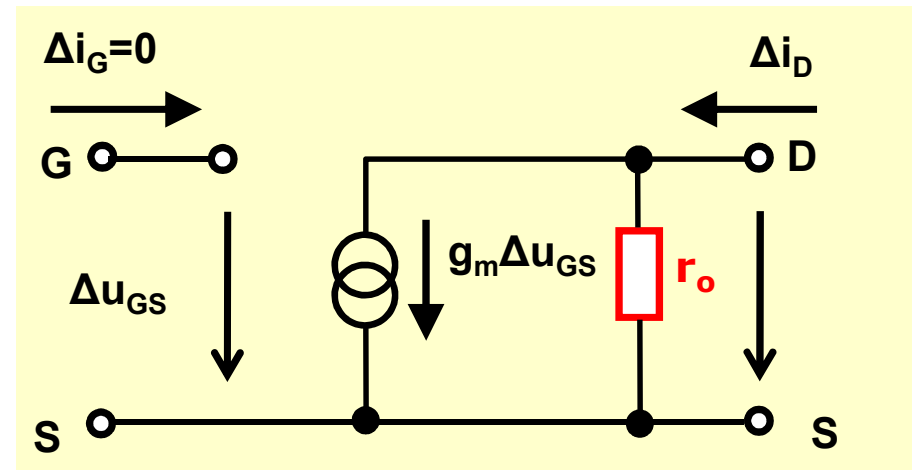
$$P_0 = [U_{GS0}, U_{DS0}, I_{D0}]$$

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

$$r_0 = 1/y_{22} = \left(\frac{\Delta u_{DS}}{\Delta i_D} \right)_{\Delta u_{GS}=0} \bigg|_{P_0}$$

$$r_0 = \frac{14V - 0V}{8mA - 7mA}$$

$$r_0 = 14 \text{ k}\Omega$$



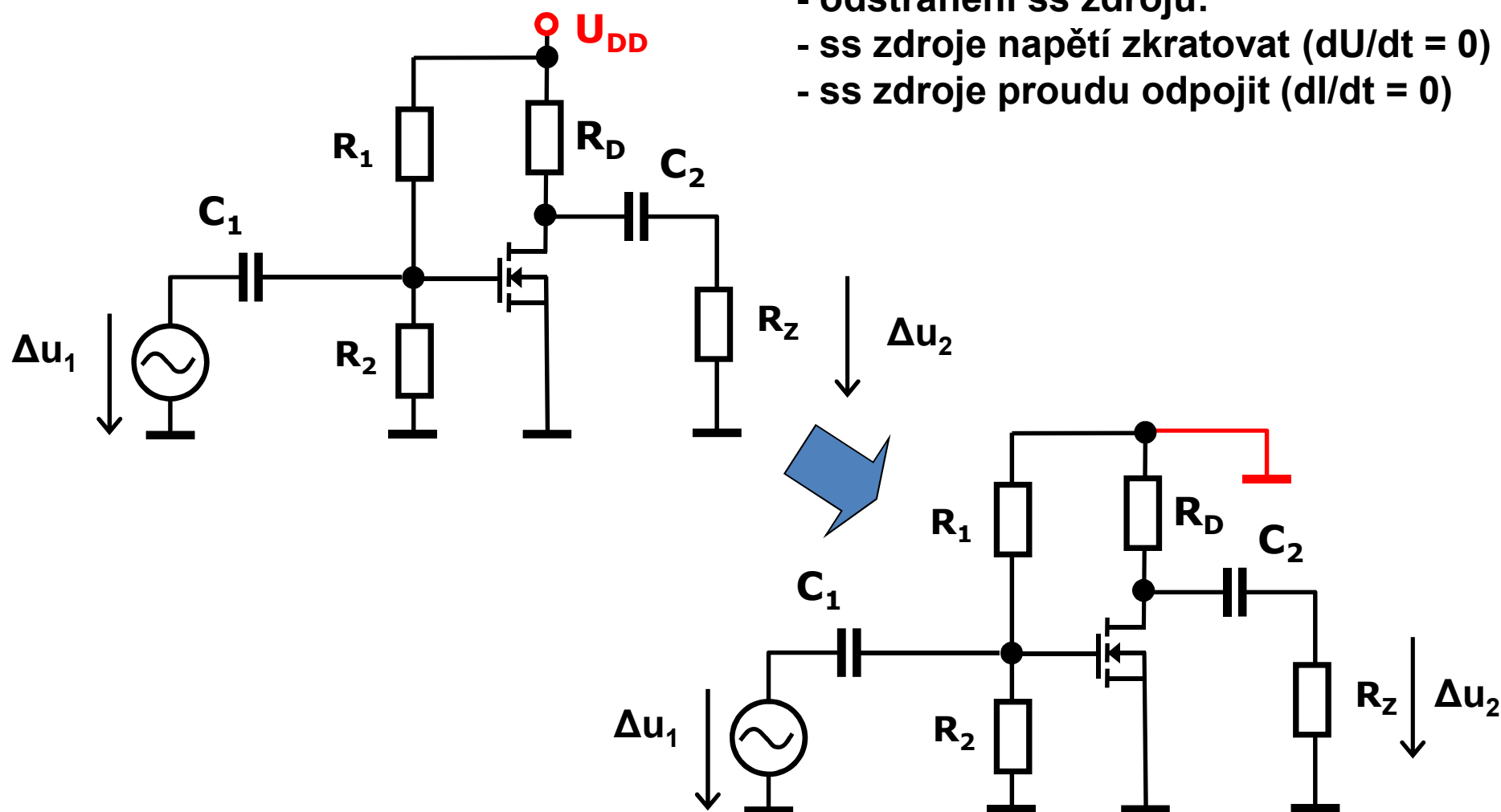
C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **C. AC analýza = řešení harmonického ustáleného stavu s NLO**

1. Zjednodušení obvodu

- odstranění ss zdrojů:
- ss zdroje napětí zkratovat ($dU/dt = 0$)
- ss zdroje proudu odpojit ($di/dt = 0$)

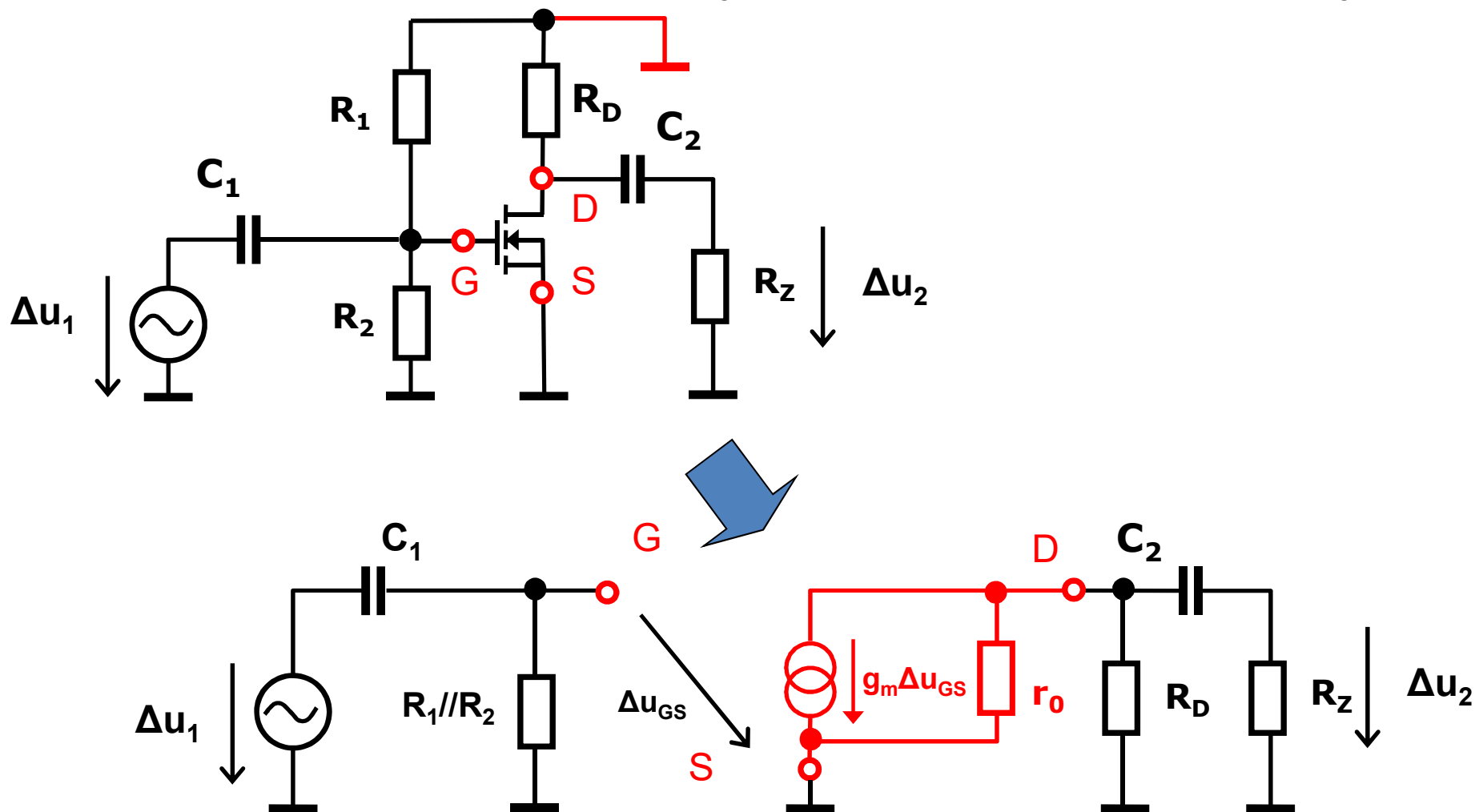


C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **C. AC analýza = řešení harmonického ustáleného stavu s NLO**

2. Náhrada tranzistoru jeho NLO (pozor na správné připojení!)

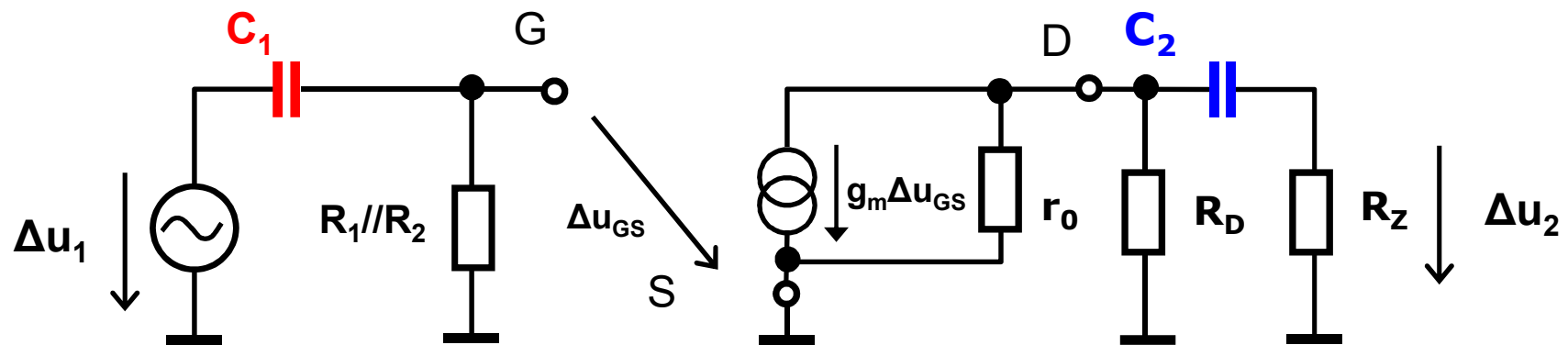


C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **C. AC analýza = řešení harmonického ustáleného stavu s NLO**

3. Uvážení uplatnění vazebních kapacit



Pro optimální navázání vstupního signálu musí platit:

$$X_{C_1} = \frac{1}{2\pi f C_1} \ll R_1 // R_2 \quad \text{tj. reaktance } C_1 \text{ je zanedbatelná vůči } R_1 // R_2$$

$$C_1 \gg \frac{1}{2\pi f (R_1 // R_2)} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1000 \cdot (220k // 820k)} = 0.92 \text{ nF}$$

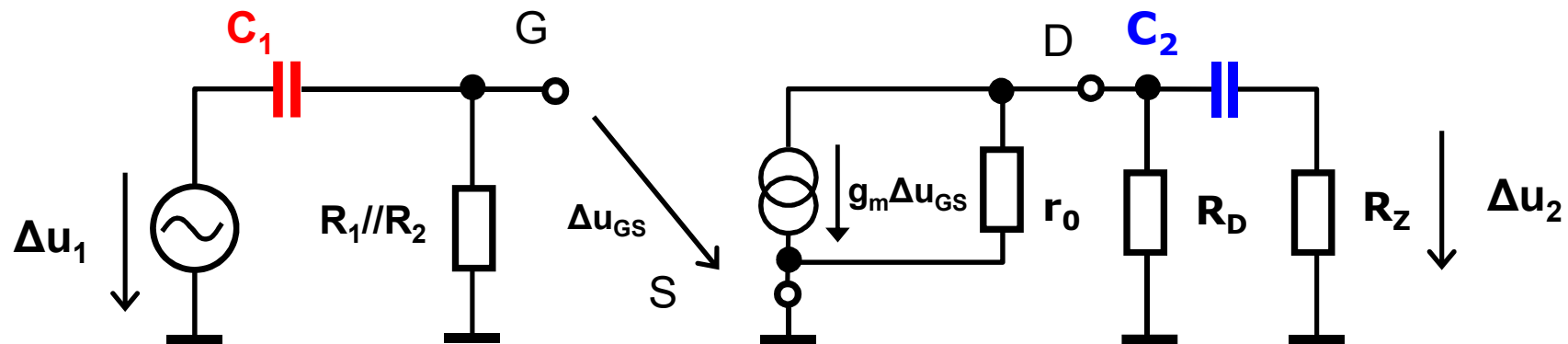
Vzhledem k tomu, že **$C_1 = 100 \text{ nF}$** , podmínka platí a kapacitor C_1 lze nahradit zkratem.

C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **C. AC analýza = řešení harmonického ustáleného stavu s NLO**

3. Uvážení uplatnění vazebních kapacit



Pro optimální navázání výstupního signálu musí platit:

$$X_{c2} = \frac{1}{2\pi f C_2} \ll (R_Z + r_o // R_D) \quad \text{tj. reaktance } C_2 \text{ je zanedbatelná vůči } R_Z \text{ a } R_{\text{výst}}$$

$$C_2 \gg \frac{1}{2\pi f (R_Z + r_o // R_D)} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1000 \cdot (1\text{M} + 14\text{k} // 680)} = 0.16 \text{ nF}$$

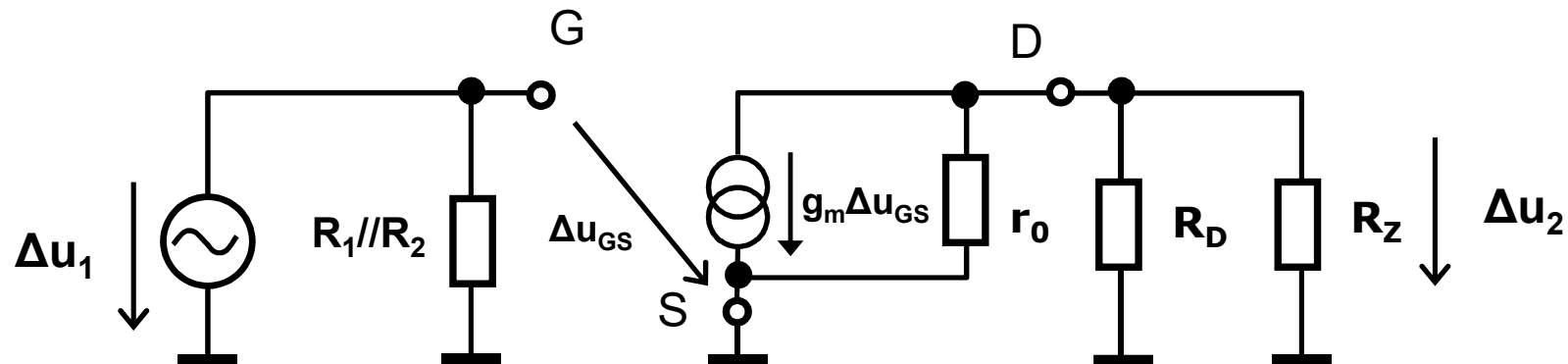
Vzhledem k tomu, že $C_2 = 10 \mu\text{F}$, podmínka platí a kapacitor C_2 lze nahradit zkratem.

C9.2 Aplikace tranzistoru MOSFET v zesilovači

Příklad CP9.1:

Řešení: **C. AC analýza = řešení harmonického ustáleného stavu s NLO**

4. Sestavení obvodových rovnic a jejich vyřešení



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

$$\Delta u_2 = -g_m \cdot \Delta u_{GS} \cdot (r_0 // R_D // R_Z)$$



$$A_u = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1} = -g_m \cdot (r_0 // R_D // R_Z)$$

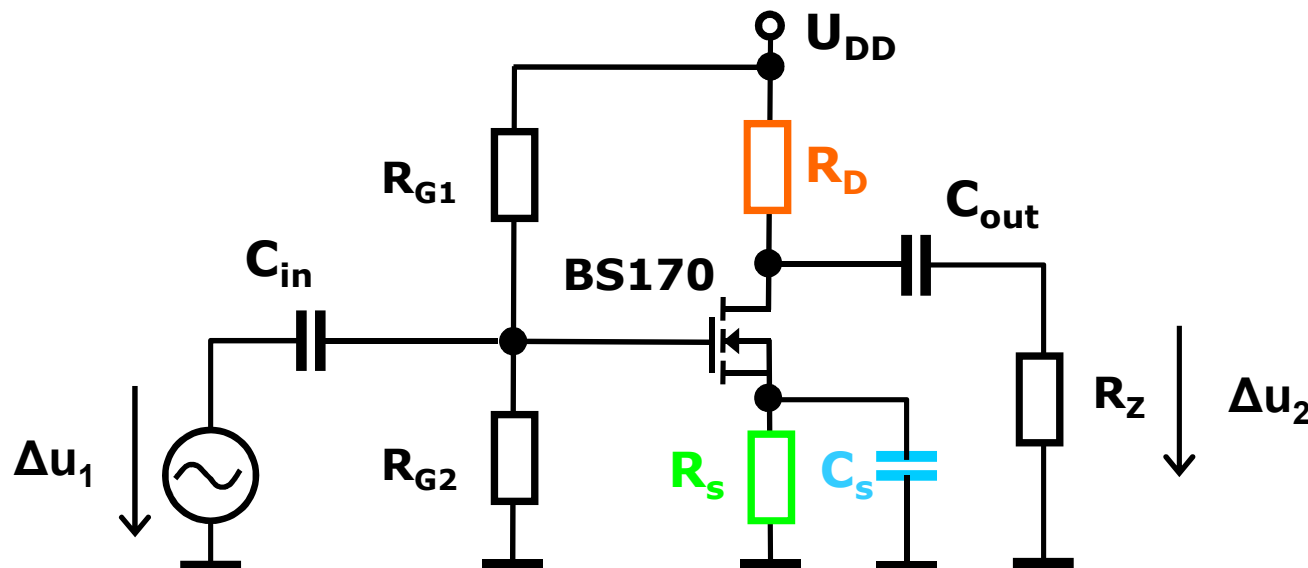
$$A_u = -25.5 \text{ mS} \cdot (14 \text{ k}\Omega // 680 \Omega // 1 \text{ M}\Omega) = -16.6$$

M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

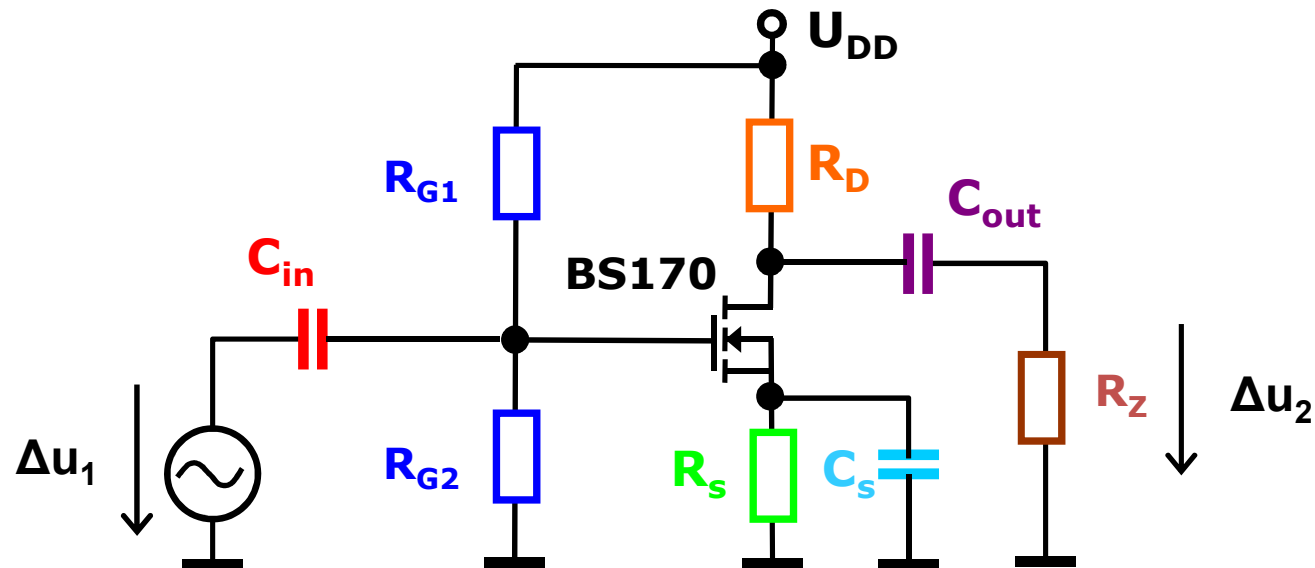
Úkol měření:

Změřte dvoukanálovým osciloskopem napět'ové zesílení $A_u = \Delta u_2 / \Delta u_1$ zesilovače s tranzistorem MOSFET pro uvedené kombinace hodnot prvků R_D , R_S a C_S . Experimentální výsledky porovnejte s výsledky simulací a teoretickým odhadem.

R_D	1k	1k	10k	10k
R_S	100	100	1k	1k
C_S	100u	0	100u	0



M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET



Význam jednotlivých obvodových prvků:

$U_{DD}=15V$	napětí stejnosměrného napájecího zdroje
Δu_1	harmonický signál z RC generátoru, volit $\Delta u_1 \approx 10mV$, $f = 1kHz$
C_{in}	vazební kapacita pro navázání vstupního signálu
R_{G1} R_{G2}	napět'ový dělič pro nastavení napětí U_{GS} (P_0), volit tak, aby $U_{DS} \approx U_{DD}/2$
R_D	zatěžovací odpor tranzistoru
R_S	nastavení zpětné vazby pro stabilizaci P_0 , příp. nastavení napět'ového zisku
C_S	blokovací kondenzátor pro střídavé přemostění odporu R_S
C_{out}	vazební kapacita pro navázání výstupního signálu do zátěže R_Z
R_Z	zátěž zesilovače – osciloskop $R_Z = 1M\Omega$

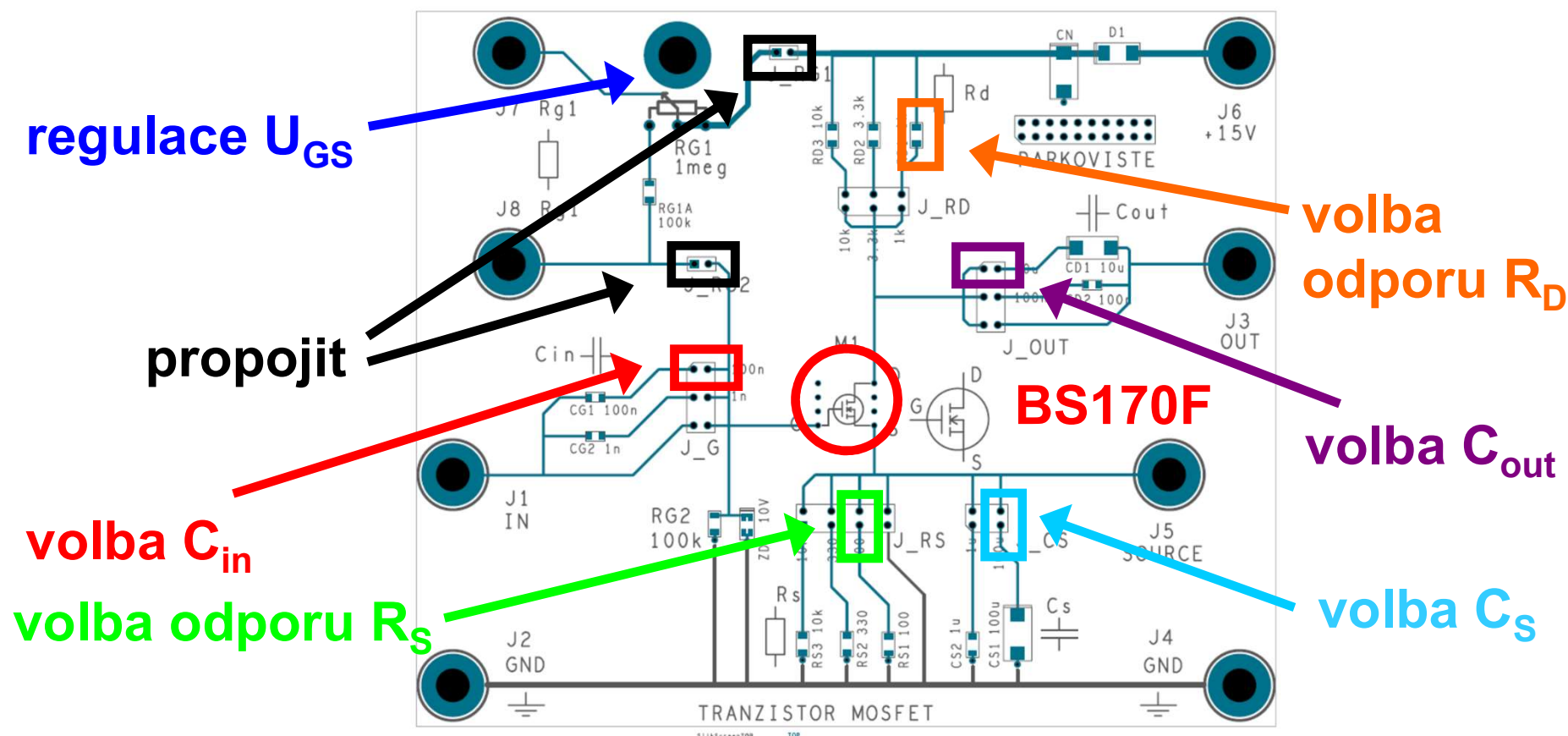
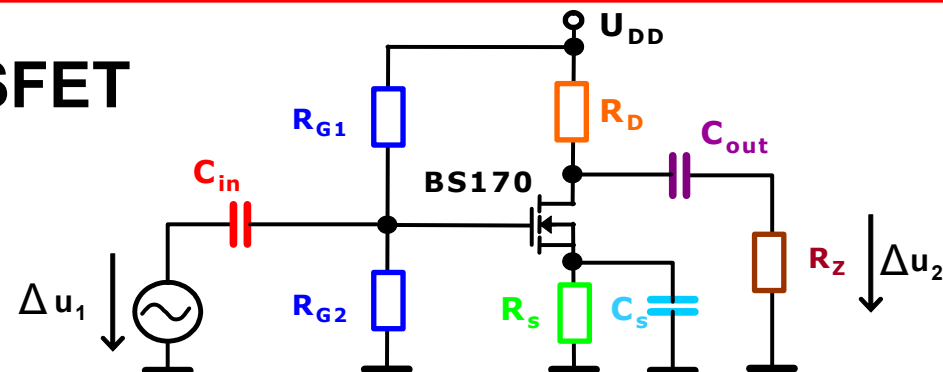
M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

Katalogový list tranzistoru BS170F

PARAMETRY@podmínky				
U_{DS}		Drain-Source Voltage	60	V
I_D	$T_{amb} = 25^{\circ}C$	Continuous Drain Current	0.15	A
I_{DM}		Pulsed Drain Current	3	A
U_{GS}		Gate Source Voltage	± 20	V
P_{tot}	$T_{amb} = 25^{\circ}C$	Power Dissipation	330	mW
BU_{DSS}	$I_D = 100\mu A, U_{GS} = 0V$	Drain-Source Breakdown Voltage	60 - 90	V
$U_{GS(th)}$	$I_D = 1mA, U_{DS} = U_{GS}$	Gate-Source Threshold Voltage	0.8 - 3	V
I_{GSS}	$U_{GS} = 15V, U_{DS} = 0V$	Gate-Body Leakage	10	nA
$R_{DS(on)}$	$U_{GS} = 10V, I_D = 200mA$	Static Drain-Source On-State Resistance	5	Ω
g_{fs}	$U_{DS} = 10V, I_D = 200mA$	Forward Transconductance	200	mS
C	$U_{DS} = 10V, U_{GS} = 0V, f = 1MHz$	Input Capacitance	60	pF
$t_{d(on)}$	$U_{DD} = 15V, I_D = 600mA$	Turn-On Delay Time	10	ns
$t_{d(off)}$	$U_{DD} = 15V, I_D = 600mA$	Turn-Off Delay Time	10	ns

M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

Přípravek s tranzistorem MOSFET

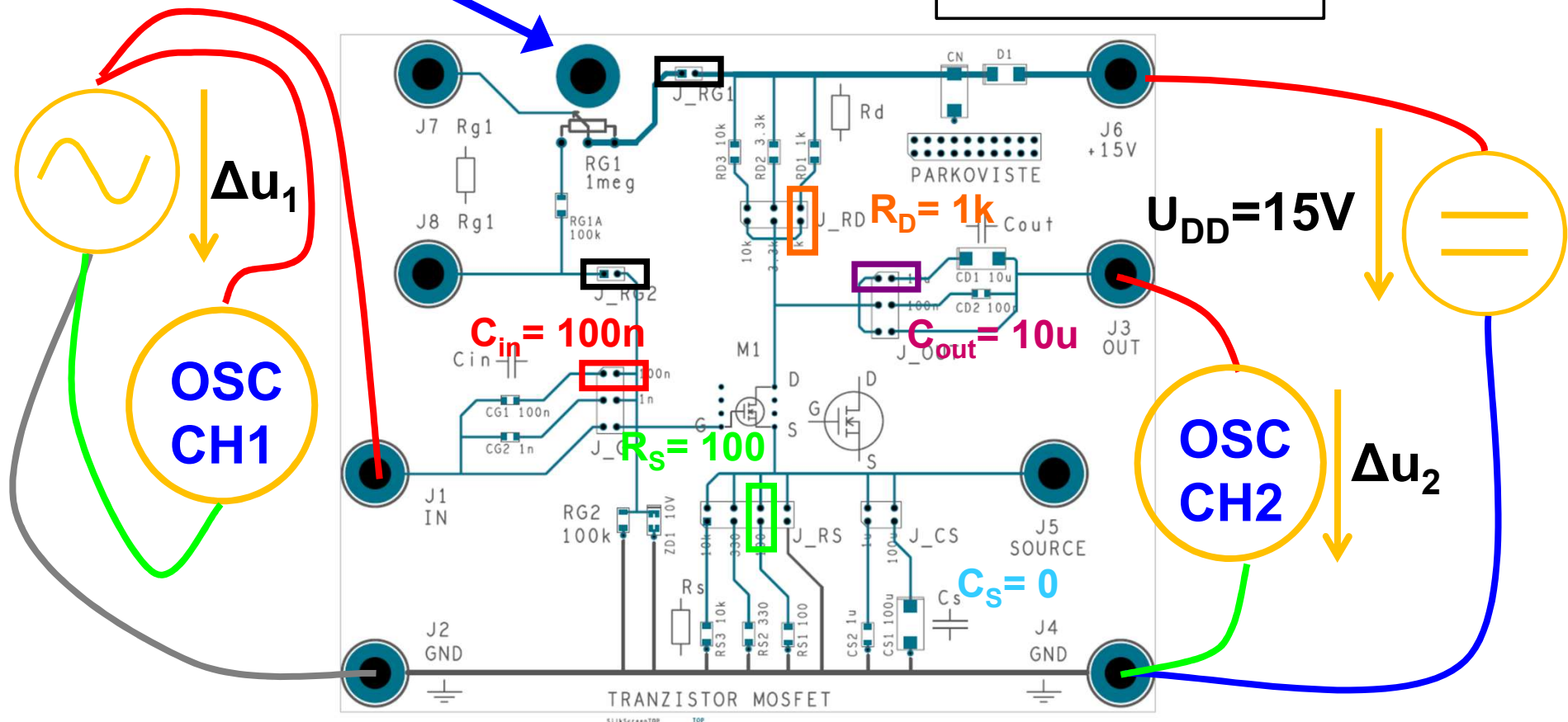
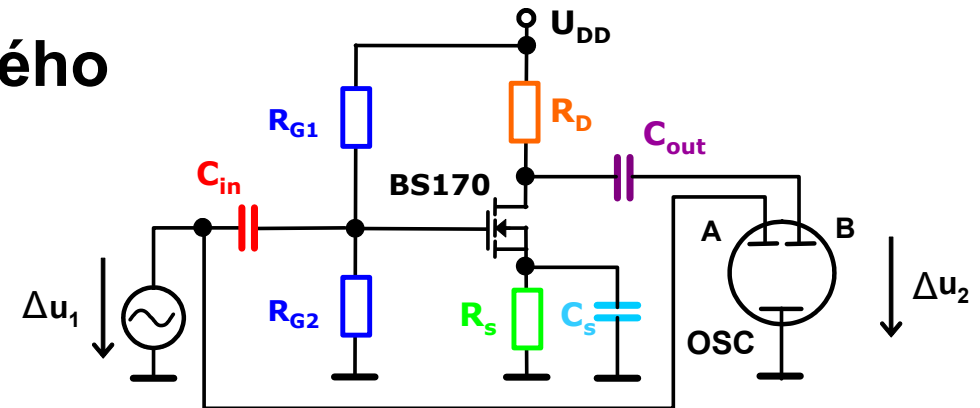


M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

Zapojení pro měření napět'ového zisku

$\Delta u_1 \sim 10 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$

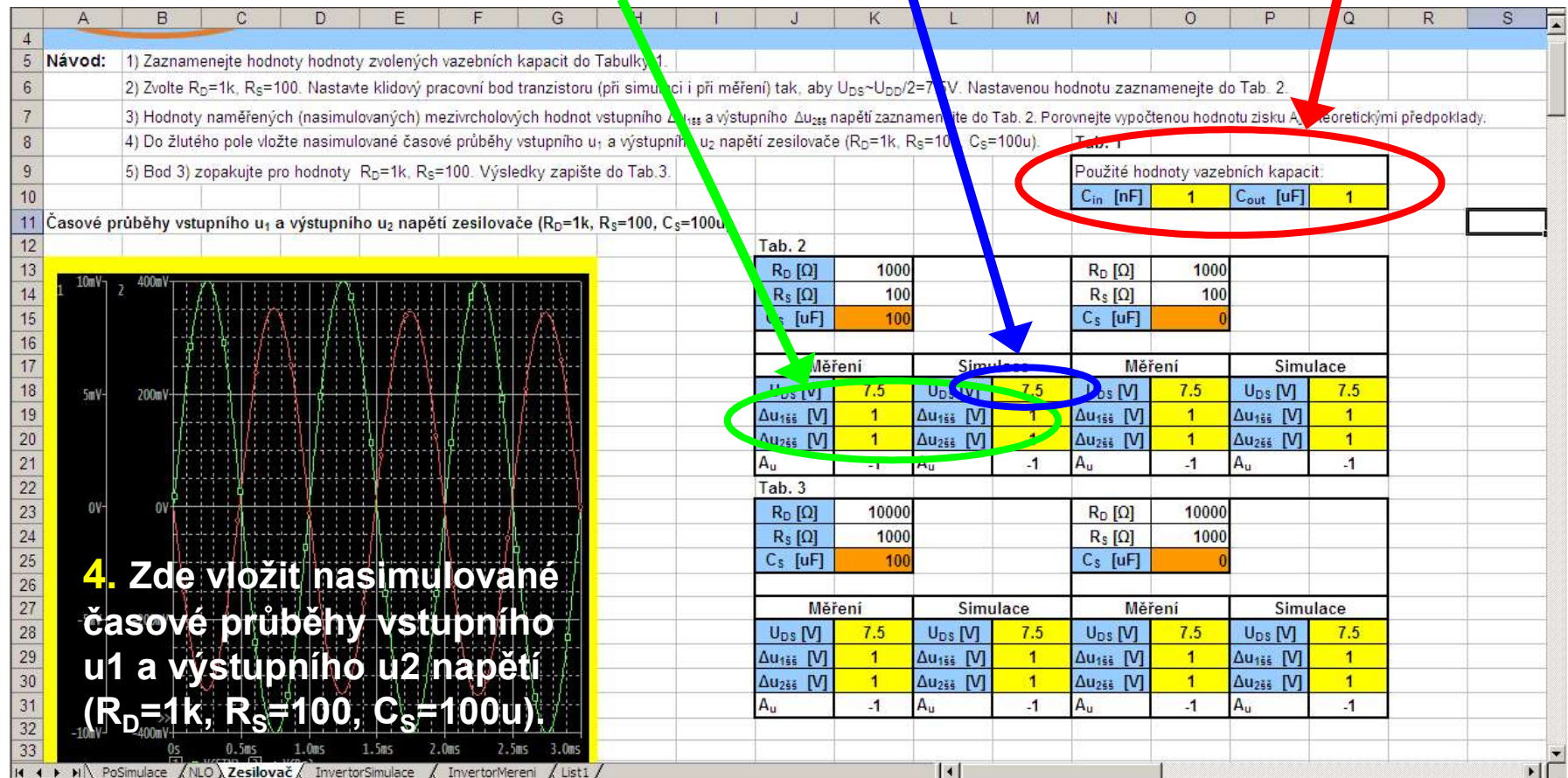
regulace U_{GS}



M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

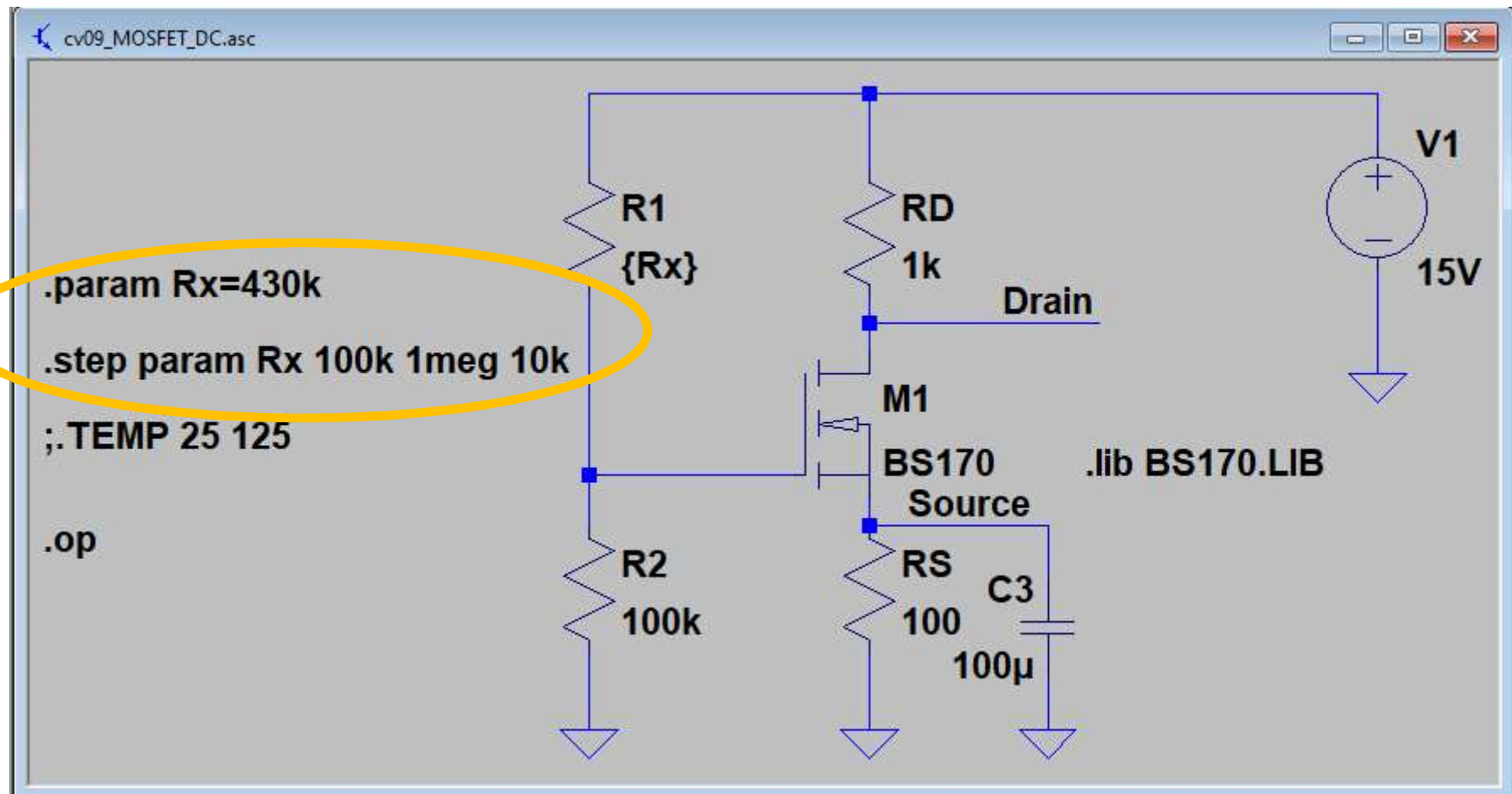
Zpracování výsledků

1. Zapsat hodnoty zvolených vazebních kapacit
2. Pro $R_D=1k$, $R_S=100$ nastavit P_0 tranzistoru (při simulaci i při měření) tak, aby $U_{DS} \sim U_{DD}/2 = 7.5V$. Nastavenou hodnotu zaznamenejte do Tab. 2.
3. Zaznamenat naměřené (nasimulované) hodnoty Δu_{1ss} a Δu_{2ss} Tab. 2.



S9.1: Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

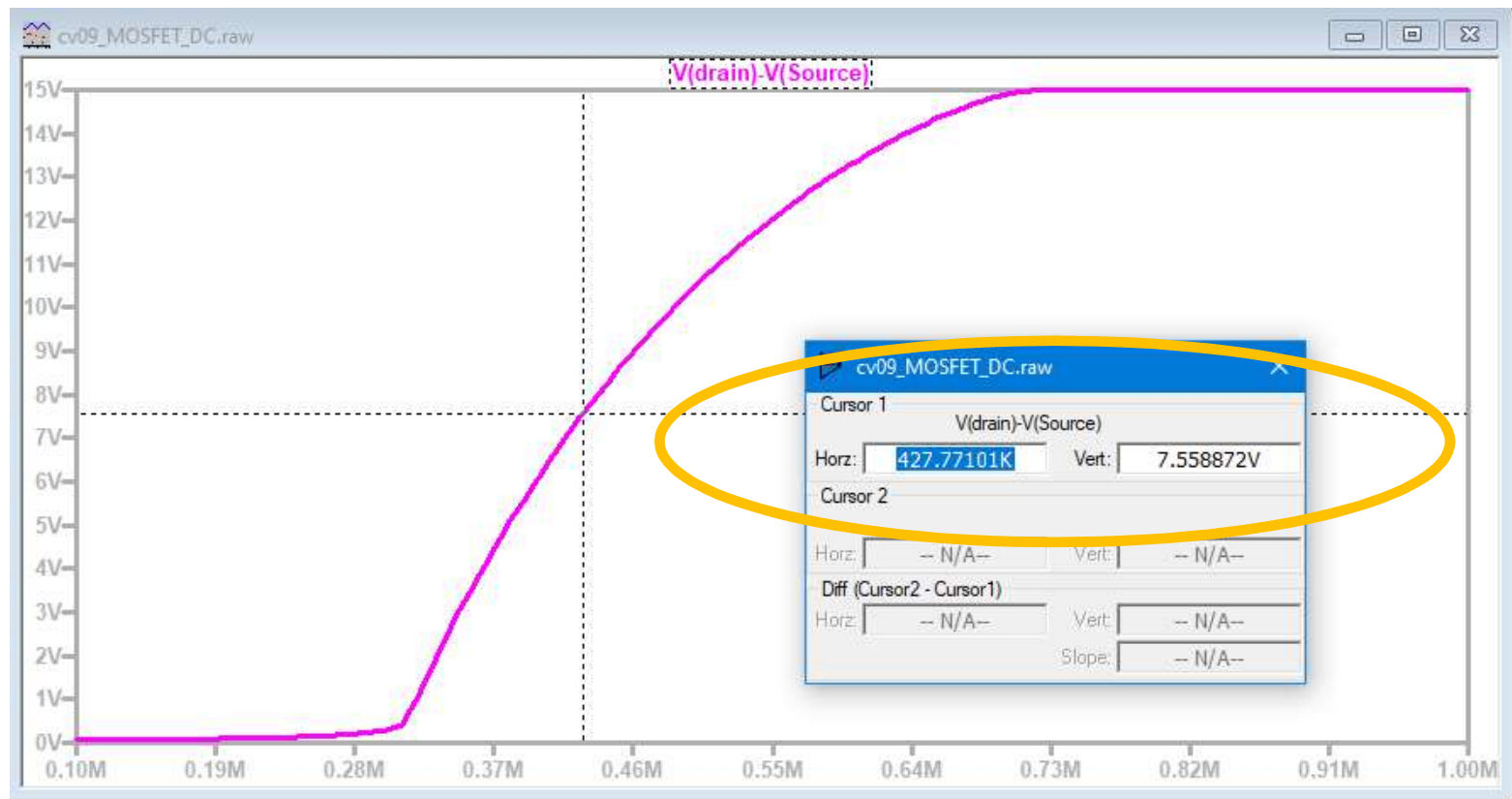
- 1) Nastavení pracovního bodu $U_{ds}=7.5V$
- 2) Zesilovač SE



S9.1: Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

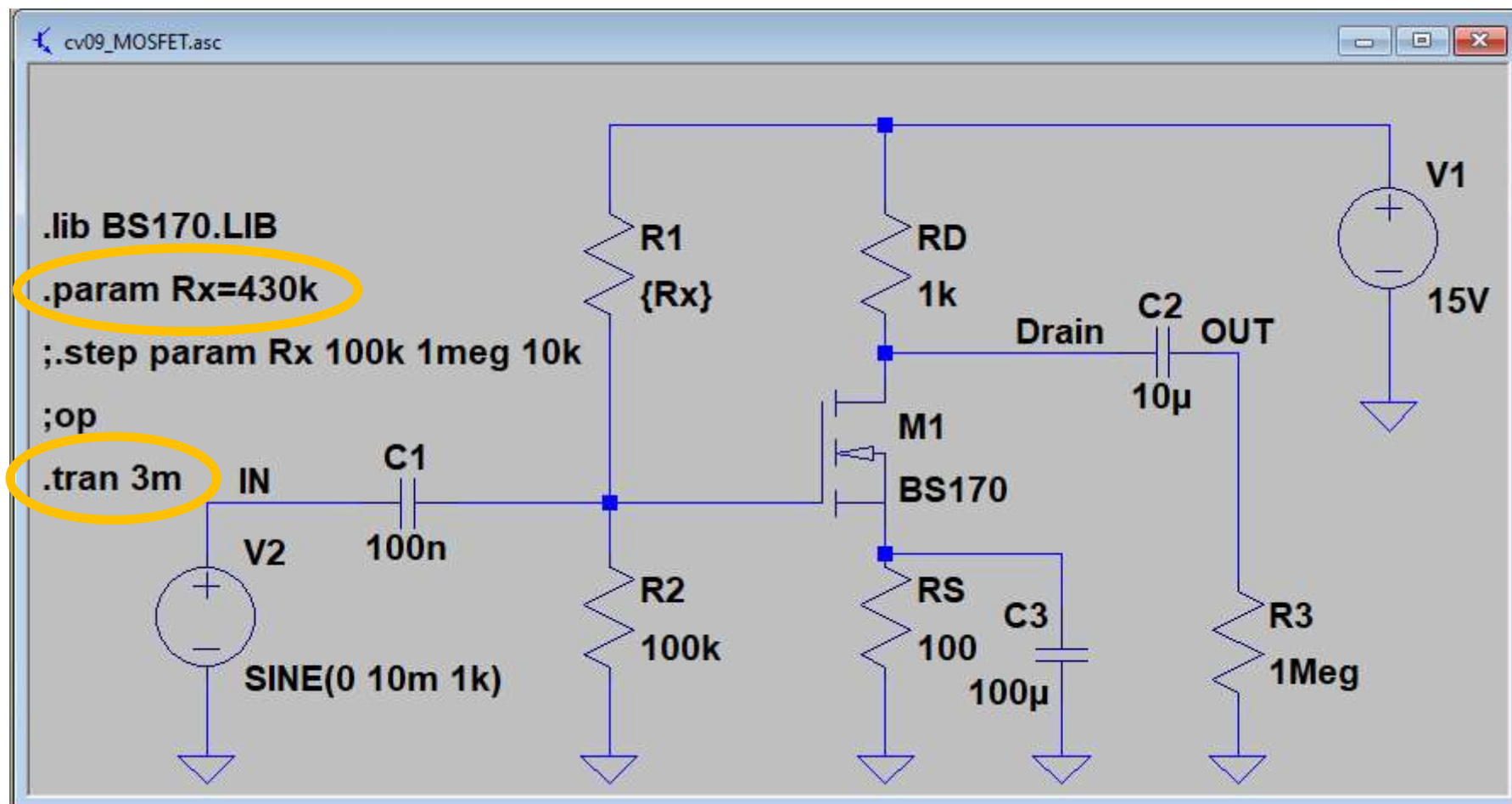
- 1) Nastavení pracovního bodu $U_{ds}=7.5V$
- 2) Zesilovač SE

Pomocí kurzoru odečtete hodnotu R_1 pro $U_{ds}=7.5V$



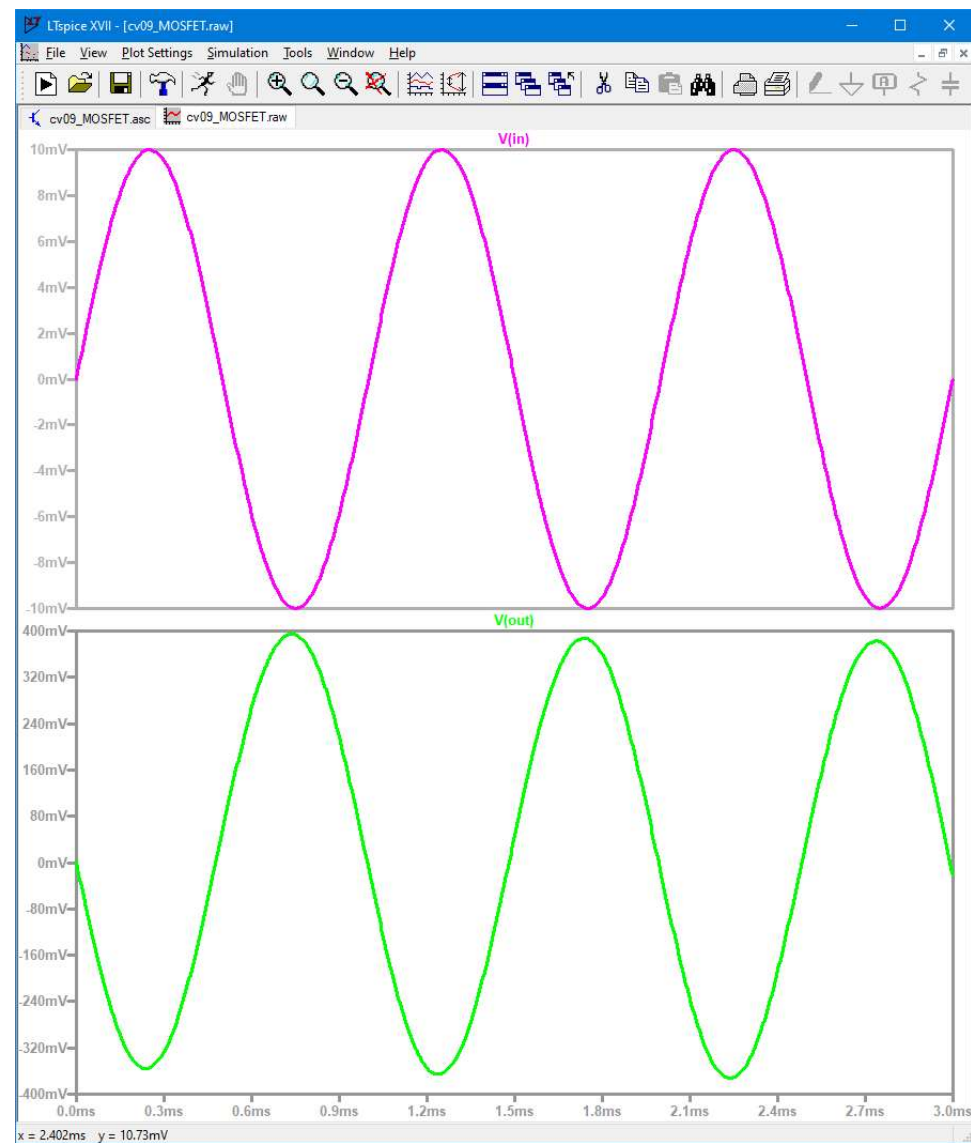
S9.1: Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

- 1) Nastavení pracovního bodu $U_{ds}=7.5V$
- 2) **Zesilovač SE**



S9.1: Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

- 1) Nastavení pracovního bodu $U_{ds}=7.5V$
- 2) **Zesilovač SE**



S9.1: Simulace zesilovače s tranzistorem MOSFET

- 1) Nastavení pracovního bodu $U_{ds}=7.5V$
- 2) **Zesilovač SE**

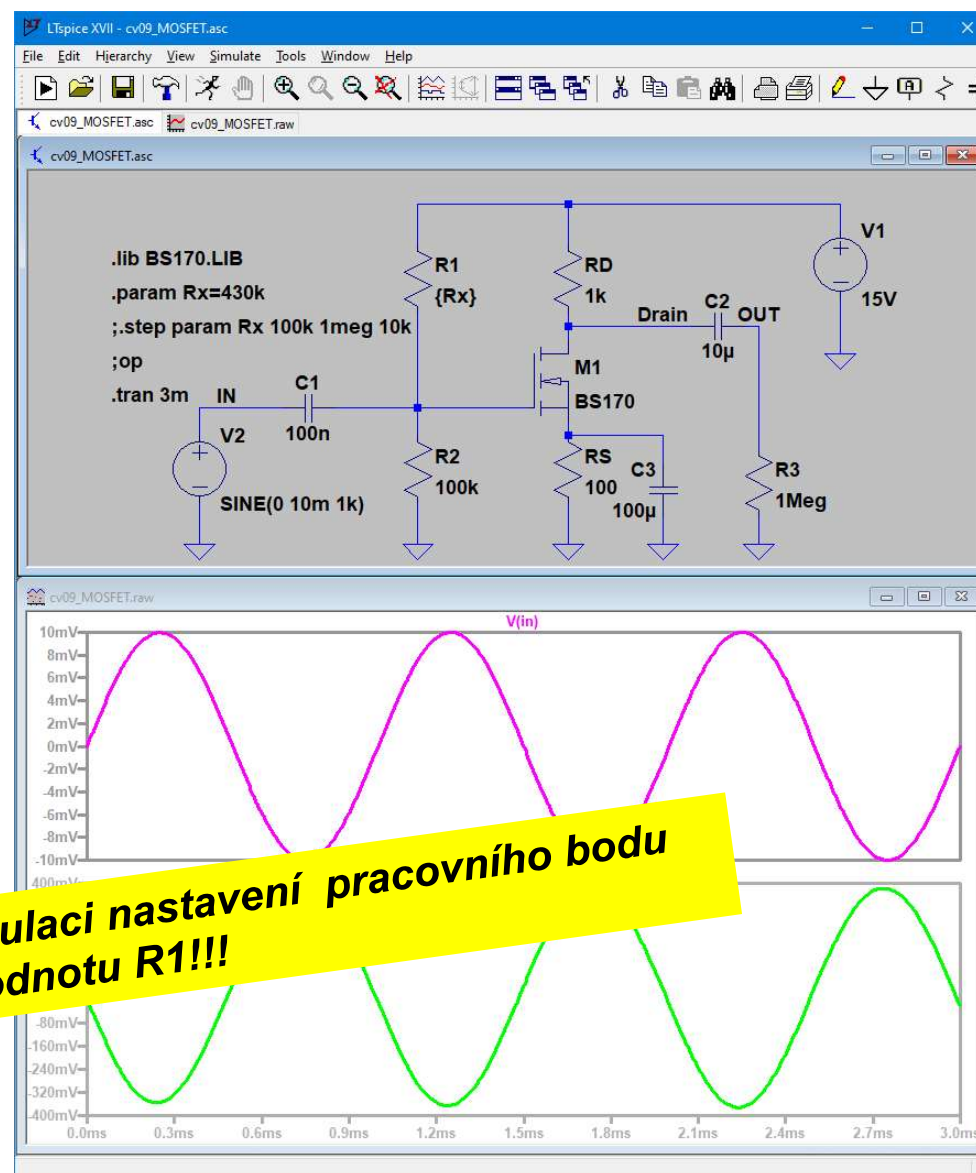
Spustíte postupně simulace pro
 $R_d=1k$ a $10k$

Pro každou kombinaci odečtete do Excelu

- vstupní napětí Δu_1
- výstupní napětí Δu_2

Výsledky simulací porovnejte s měřením.

Pro $R_d=10k$ je potřeba znovu spustit simulaci nastavení pracovního bodu a nastavit jinou hodnotu R_1 !!!



M9.1: Měření zesilovače s tranzistorem MOSFET

Zpracování výsledků

1. Zapsat hodnoty zvolených vazebních kapacit
2. Pro $R_D=1k$, $R_S=100$ nastavit P_0 tranzistoru (při simulaci i při měření) tak, aby $U_{DS} \sim U_{DD}/2 = 7.5V$. Nastavenou hodnotu zaznamenejte do Tab. 2.
3. Zaznamenat naměřené (nasimulované) hodnoty Δu_{1ss} a Δu_{2ss} Tab. 2.

