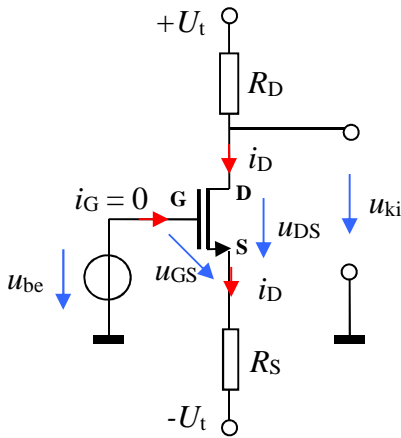


1.) Példa: MOS FET munkapontja, kivezérelhetősége (n csatornás, növekményes FET)



Adott az alábbi kapcsolás, a következő adatokkal:

$$U_t = 10 \text{ V}, \quad R_D = 6 \text{ k}\Omega, \quad R_S = 4 \text{ k}\Omega,$$

$$I_{D00} = 4 \text{ mA}, \quad U_P = 4 \text{ V}$$

Munkapont?
Kivezérelhetőség?

Munkapont számítás:

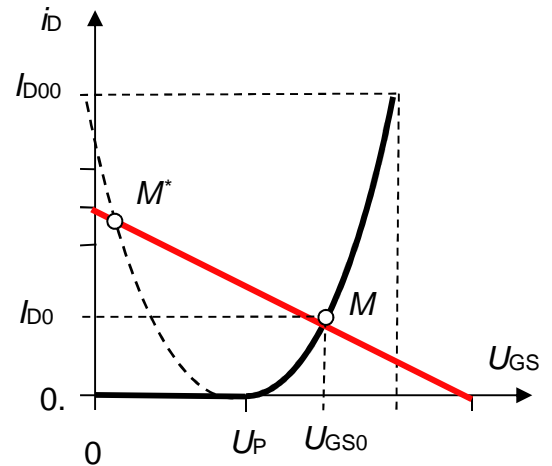
- egyenáramú számítás
- gerjesztetlen áramkör, $u_{be} = 0$
- tranzistor bemeneti (transzfer) karakterisztika:

$$i_D = I_{D00} \left(\frac{u_{GS} - U_P}{U_P} \right)^2$$

- G-S kapu lezárásának karakterisztikája: $U_t = U_{GS} + I_D R_S$
- Az egyenlet rendszer megoldása:

$$\frac{U_t - U_{GS}}{R_S} = I_{D00} \left(\frac{u_{GS} - U_P}{U_P} \right)^2 \rightarrow \frac{10 - U_{GS}}{4} = 4 \left(\frac{U_{GS} - 4}{4} \right)^2 \rightarrow U_{GS}^2 - 7U_{GS} + 6 = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow U_{GS0} = \frac{6 \text{ V}}{1 \text{ V}} \text{ hamis gyök} \rightarrow I_{D0} = 4 \left(\frac{6 - 4}{4} \right)^2 = 1 \text{ mA}$$



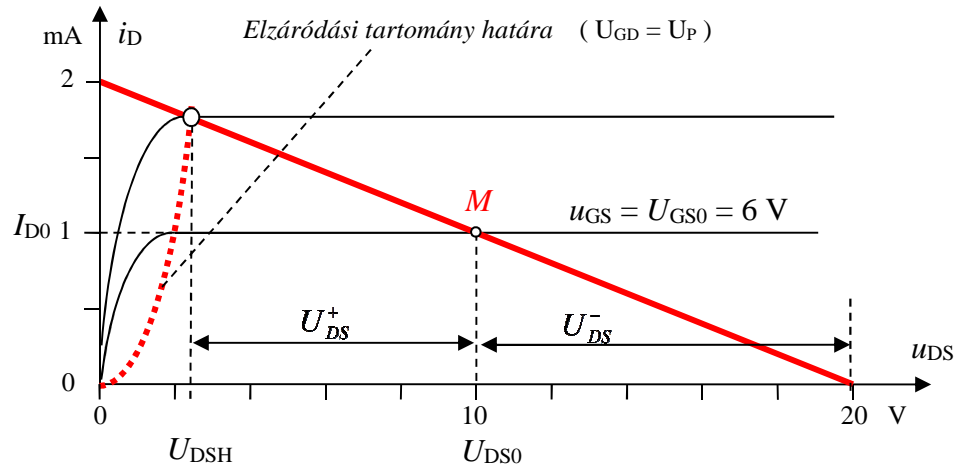
Kivezérelhetőség számítás:

- a tranzisztor kimeneti $I_D(U_{DS})$ karakterisztikája alapján,

$$\text{Az elzáródási tartomány határa: } i_D = I_{D00} \left(\frac{u_{DS}}{U_P} \right)^2$$

- a D-S kapu (egyenáramú és váltóáramú) lezárási karakterisztikája alapján

$$U_{DS} = 2U_t - I_D(R_D + R_S), \rightarrow i_D = \frac{2U_t}{R_D + R_S} - \frac{u_{DS}}{R_D + R_S}$$



- az egyenletrendszer megoldása:

$$\left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right)^2 + \left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right) \frac{U_P}{I_{D00}(R_S + R_D)} - \frac{2U_t}{I_{D00}(R_D + R_S)} = 0$$

$$\left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right)^2 + \left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right) \frac{4}{4 \cdot 10} - \frac{20}{4 \cdot 10} = 0$$

$$U_{DSH} = 4 \cdot \frac{-0.1 + \sqrt{0.1^2 + 2}}{2} = 2.63V$$

- a tranzisztor kivezérelhetősége

$$\text{nyitó irány: } U_{DS}^+ = U_{DS0} - U_{DSH} = 10 - 2.63 = 7.37V$$

$$\text{záró irány: } U_{DS}^- = (R_D + R_S)I_{D0} = 10V$$

- kimeneti kivezérelhetőség a kimeneti leosztással:

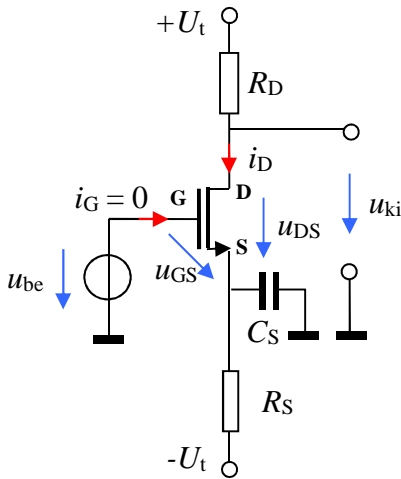
$$U_{ki}^+ = U_{DS}^+ \frac{R_D}{R_S + R_D} = 7.37 \frac{6}{10} = 4.42V$$

$$U_{ki}^- = U_{DS}^- \frac{R_D}{R_S + R_D} = 10 \frac{6}{10} = 6V$$

Gyakorló feladat:

Számoljuk ki a munkaponti és kivezérelhetőségi adatokat, ha az eredeti n-csatornás növekményes MOS-FET-et n-csatornás kiürítéses MOS-FET-re cseréljük, melynek paraméterei: $I_{D00} = 2 \text{ mA}$, $U_P = -2 \text{ V}$. ($I_{D0} = 2,447 \text{ mA}$, $U_{GS0} = 0,212 \text{ V}$)

2.) Példa: Mi változik, az előző példához képest, ha az áramkörbe beteszünk egy source hidegítő kondenzátort?



Adott az alábbi kapcsolás, a következő adatokkal:

$$U_t = 10 \text{ V}, \quad R_D = 6 \text{ k}\Omega, \quad R_S = 4 \text{ k}\Omega,$$

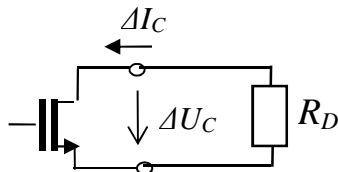
$$I_{D00} = 4 \text{ mA}, \quad U_P = 4 \text{ V}$$

Munkapont?
Kivezelhetőség?

A C_S kondenzátor hatására a munkaponti és egyenáramú viszonyok nem változnak,

Tehát továbbra is : $U_{GS0} = 6 \text{ V}, \quad I_{D0} = 1 \text{ mA}, \quad U_{DS0} = 10 \text{ V}$

A tranzisztor D-S kapujának váltóáramú lezárása azonban már megváltozik, mivel a C_S kondenzátort rövidzárral kell figyelembe venni:



A váltóáramú lezárás karakterisztikája:

$$\Delta U_{DS} = -\Delta I_D R_D$$

azaz $U_{DS} - U_{DS0} = -(I_D - I_{D0}) R_D$

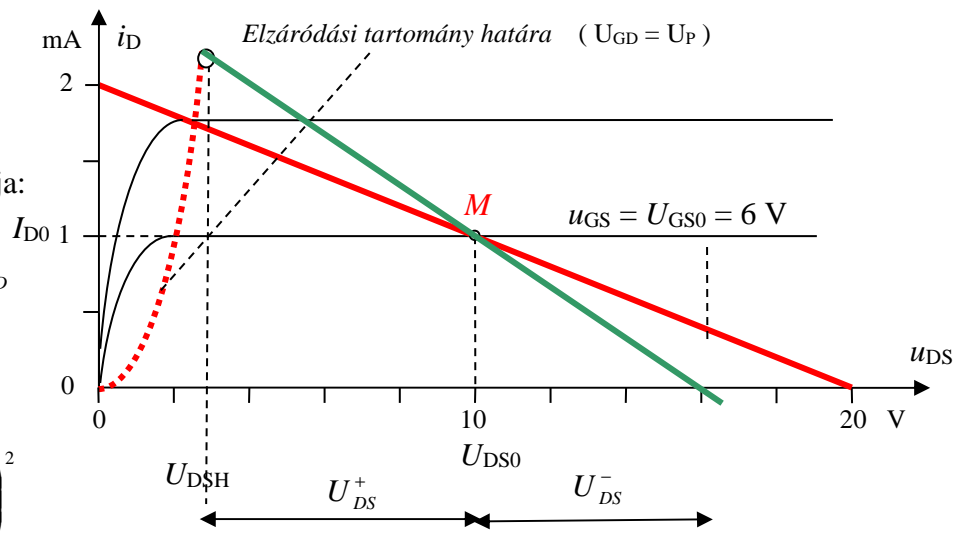
U_{DSH} -ra a megoldandó egyenlet:

$$\frac{U_{DS0} + R_D I_{D0} - U_{DSH}}{R_D} = I_{D00} \left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right)^2$$

azaz $\frac{10 + 6 - U_{DSH}}{6} = 4 \left(\frac{U_{DSH}}{4} \right)^2 \rightarrow 1,5 U_{DSH}^2 + U_{DSH} - 16 = 0 \rightarrow U_{DSH} = 2,95 \text{ V}$

- a tranzisztor kivezelhetősége
nyitó irány: $U_{DS}^+ = U_{DS0} - U_{DSH} = 10 - 2.95 = 7.05 \text{ V}$
záró irány: $U_{DS}^- = R_D I_{D0} = 6 \text{ V}$

Mivel $U_{ki} = U_{DS}$ a kimeneti kivezelhetőség egyenlő a tranzisztor kivezelhetőségével.



3. Példa: Munkapont számítás, kivezérelhetőség

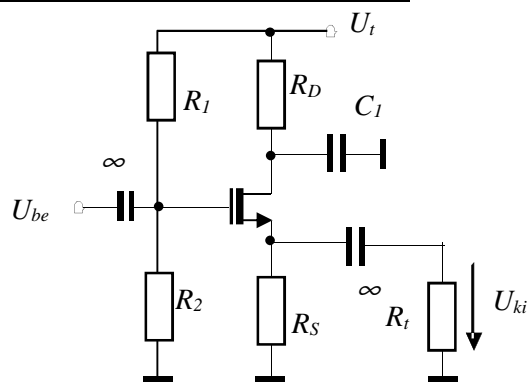
Az áramkör adatai:

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega, R_D = 500 \Omega, R_t = 9 \text{ k}\Omega, R_1 = R_2 = 40 \text{ k}\Omega,$$

A növelményes MOS-FET tranzisztor adatai:

$$U_P = 2 \text{ V}, I_{00} = 2 \text{ A}$$

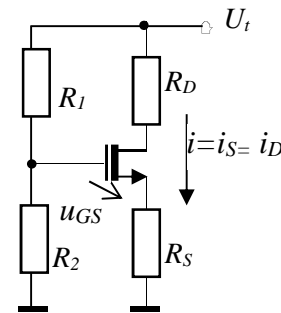
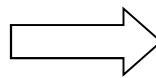
1. Mekkora legyen U_t értéke ahhoz, hogy a tranzisztor munkaponti árama 8 mA legyen?
2. Mekkora a vágás nélkül maximális szinuszos kimeneti feszültség csúcserőke, ha a $C_I = \infty$?
3. Mekkora a kivezérelhetőség, ha $C_I = 0$ (azaz kivesszük az áramkörből)?



Megoldás:

1. **Munkapont számítás** egyenáramú helyettesítő képből:

- Egyenáramú, gerjesztetlen állapot, $U_{be} = 0$!
- Kapacitások \rightarrow szakadás

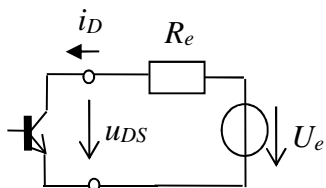


$$i_D = I_{00} \left(\frac{u_{GS} - U_P}{U_P} \right)^2 \Rightarrow u_{GS} = \left(\sqrt{\frac{i_D}{I_{00}} + 1} \right) U_P = \left| i_D = I_{D0} = 8 \text{ mA} = U_{GS0} = 6 \text{ V} \right.$$

$$U_{G0} = U_{GS0} + R_S I_{D0} = 6 + 1 \cdot 8 = 14 \text{ V}, \quad U_{G0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_t = \frac{1}{2} U_t \Rightarrow U_t = 28 \text{ V}$$

2. **Kivezérelhetőség, ha $C_I = \infty$**

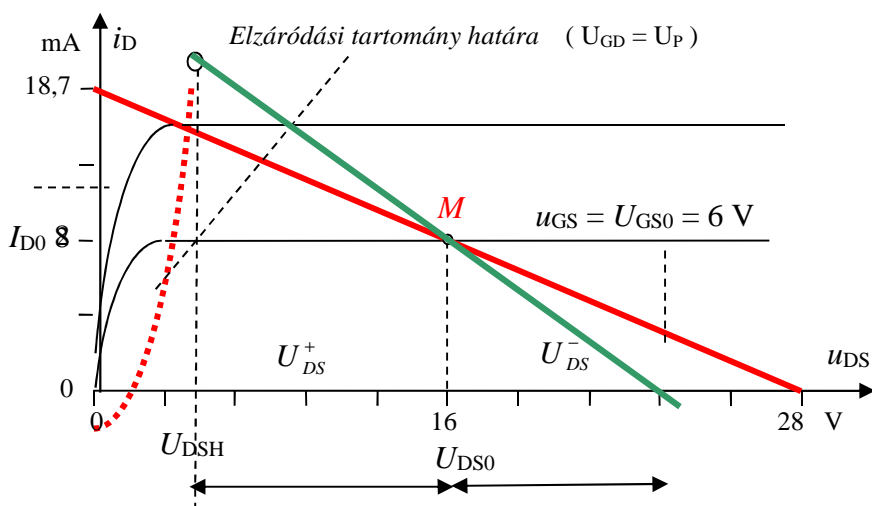
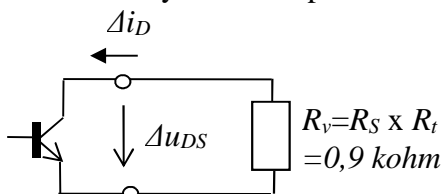
Egyenáramú helyettesítő kép:



$$R_e = R_D + R_S = 1.5 \text{ kohm}$$

$$U_e = U_t = 28 \text{ V}$$

Váltó áramú helyettesítő kép:



U_{DSH} határ feszültség meghatározása: a határ-parabola és a váltóáramú munka-egyenes metszéspontja

$$I_{00} \left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right)^2 = I_{D0} - \frac{U_{DSH} - U_{DS0}}{R_S \times R_t} \Rightarrow \frac{1}{2} (U_{DSH})^2 + \frac{1}{0.9} U_{DSH} - \left(8 + \frac{16}{0.9} \right) = 0 \Rightarrow U_{DSH} = 6.15 \text{ V}$$

Nyitó irányú kivezérelhetőség: $U_{DS}^+ = U_{DS0} - U_{DSH} = 9,85V$

Záró irányú kivezérelhetőség $U_{DS}^- = R_v I_{D0} = 7,2V$

Szimmetrikus kivezérelhetőség: $U_{ki} = \min(U_{DS}^+, U_{DS}^-) = \boxed{7,2V}$

Kimeneti kivezérelhetőség: = tranzisztor kivezérelhetőség

3. Kivezérelhetőség, ha $C1=0$

Egyenáramú analízis: $R_e = R_D + R_S = 1.5k\Omega$

$$U_e = U_t = 28V$$

Váltóáramú analízis: $R_v = R_D + R_S \times R_t = 1.4k\Omega$

U_{DSH} határ feszültség meghatározása: a határ-parabola és a váltóáramú munka-egyenes metszéspontja

$$I_{D0} \left(\frac{U_{DSH}}{U_P} \right)^2 = I_{D0} - \frac{U_{DSH} - U_{DS0}}{R_D + R_S \times R_t} \implies \frac{1}{2} (U_{DSH})^2 + \frac{1}{1,4} U_{DSH} - \left(8 + \frac{16}{1,4} \right) = 0 \implies U_{DSH} = 5,56V$$

nyitóirányú kivezérelhetősége: $U_{DS}^+ = U_{DS0} - U_{DSH} = 16 - 5,56 = 10,44V$

záróirányú kivezérelhetősége: $U_{DS}^- = R_v I_{D0} = 11,2V$

szimmetrikus kivezérelhetőség: $U_{DS} = \min(U_{DS}^+, U_{DS}^-) = 10,44V$

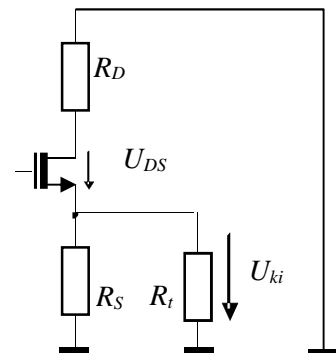
A kimeneti kivezérelhetőség: (\neq a tranzisztor kivezérelhetőségével)

A váltóáramú helyettesítőkép alapján számolt kimeneti leosztás:

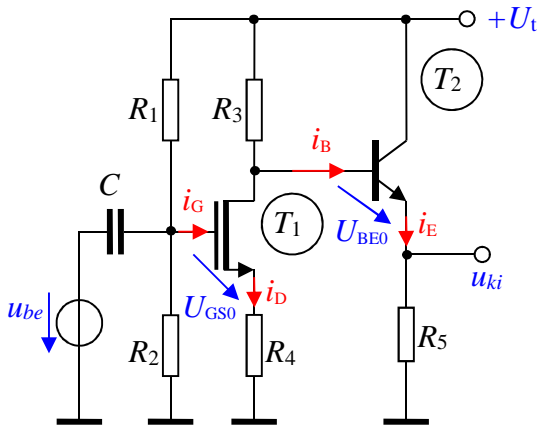
$$K = \left| \frac{U_{ki}}{U_{CE}} \right| \frac{R_S \times R_t}{R_S \times R_t + R_D} = 0,643$$

A kimeneti szimmetrikus kivezérelhetőség:

$$U_{KI} = U_{DS}^+ \frac{R_S \times R_t}{R_S \times R_t + R_D} = \underline{\underline{6,71V}}$$



4.) Példa: Munkapont számítás



Az áramkör adatai:

$$U_t = 12 \text{ V}, \quad R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega, \quad R_4 = 2 \text{ k}\Omega, \quad R_5 = 9.38 \text{ k}\Omega,$$

T_1 : n csatornás növekményes MOS FET

$$i_D = I_{D00} \left(\frac{u_{GS} - U_P}{U_P} \right)^2, \quad U_P = 2 \text{ V}, \quad I_{D00} = 1 \text{ mA},$$

T_2 : n-p-n tranzisztor, $\beta=B=99$, $U_{BE0}=0,6 \text{ V}$,

Feladat: Munkaponti áramok és feszültségek meghatározása

$$I_{D0} = ?, \quad I_{E0} = ? \quad U_{DS0} = ? \quad U_{CE0} = ? \quad U_{ki0} = ? \text{ stb.}$$

Mit mondhatunk a tranzisztorok kivezélhetőségeiről?

Megoldás:

Vegyük észre, hogy I_{D0} tól függ I_{E0} , de I_{E0} -tól I_{D0} nem függ! Ugyanis, T_1 I_{D0} munkaponti áramától T_2 tranzisztornak a bázis potenciálja és így emitter potenciálja is függ, tehát az R_5 -ön folyó áram is, mely T_2 tranzisztor munkaponti I_{E0} áramát adja.

Ugyanakkor T_2 I_{E0} munkaponti áramától T_1 tranzisztornak csak a drain potenciálja függ, de T_1 U_{GS} feszültsége (mely T_1 munkaponti áramát határozza meg) nem.

Tehát először kiszámíthatjuk I_{D0} -t, majd ennek ismeretében I_{E0} -t, végül az áramok ismeretében a potenciálokat, feszültségeket is megkapjuk.

$$I_{D0} = ? \quad \text{Mivel } i_G = 0, \text{ a GATE-elektroda (egyen-) potenciálja: } U_G = U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6 \text{ V}$$

$$\text{Az } U_{GS} \text{ feszültségre felírható egyenletek: } \quad U_G = U_{GS0} + I_{D0} R_4 \quad I_{D0} = I_{D00} \left(\frac{U_{GS0} - U_P}{U_P} \right)^2$$

$$\text{Numerikus adatokkal (V, mA, k}\Omega \text{ koherens egységekre vonatkozóan): } \quad 6 = U_{GS0} + 2I_{D0}, \quad I_{D0} = \frac{(U_{GS0} - 2)^2}{4}$$

$$\text{Amiből: } \quad 4I_{D0} = (6 - 2I_{D0} - 2)^2 = 4(2 - I_{D0})^2 \quad \rightarrow \quad I_{D0}^2 - 5I_{D0} + 4 = 0$$

Megoldásként a kisebbik (-) gyököt választjuk:

$$I_{D0} = \frac{5 - \sqrt{25 - 16}}{2} = \frac{5 - 3}{2} = 1 \text{ mA}$$

$$I_{E0} = ? \quad \text{Az } R_3 \text{ árama: } I_{D0} + I_{B0} = I_{D0} + (1 - A)I_{E0}.$$

$$\text{A felírható hurok egyenlet: } \quad U_t = (I_{D0} + (1 - A)I_{E0})R_3 + U_{BE0} + I_{E0}R_5, \quad A = \frac{B}{1 + B} = 0.99$$

$$\text{Ebből: } \quad I_{E0} = \frac{U_t - I_{D0}R_3 - U_{BE0}}{R_5 + (1 - A)R_3} = \frac{12 - 2 - 0.6}{9.38 + 0.02} = \frac{9.4}{9.4} = 1 \text{ mA}$$

$$\text{A feszültségek: } \quad U_{DS0} = U_t - R_3(I_{D0} + I_{B0}) - R_4 I_{D0} = 7,98 \text{ V} > \sqrt{\frac{I_{D0}}{I_{D00}}} U_P = 2 \text{ V}$$

$$U_{CE0} = U_t - R_5 I_{E0} = 2,62 \text{ V} \quad (>? \quad U_m)$$

$$U_{ki0} = R_5 I_{E0} = 9,38 \text{ V}$$

Vegyük észre, hogy ha T_1 tranzisztor árama nyitó irányba változik (nö), akkor T_2 tranzisztor árama záró irányba változik (csökken) és fordítva. Tehát a tranzisztorok kivezélhetőségei nem függetlenek, egymást befolyásolják, korlátozhatják.