



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

# Sähkötekniikka ja elektroniikka

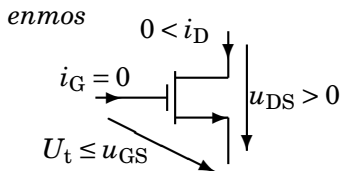
## Laskuharjoitus 8

Kimmo Silvonen (X)

17.11.2021

# Laskuharjoitus 8. Kanavatransistori FET (ENMOS)

Johdanto (vrt. Kako)



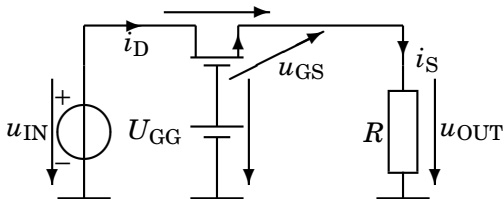
Jänniteohjattu virtalähde VCCS:  $u_{GS}$  säätelee virtaa  $i_D$ .

Sulku-tilan (CUT) lisäksi kaksi toiminta-alueita; OHM on TRI-alueen approksimaatio. Kun  $u_{DS}$  on suuri, ollaan SAT-alueella.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CUT: } u_{GS} \leq U_t \Rightarrow i_D = 0 \\ \text{OHM: } u_{DS}^2 \approx 0: \quad i_D = i_S \approx \overbrace{2K(u_{GS} - U_t)}^{\approx 1/r_{DS}} u_{DS} \\ \text{TRI: } u_{DS} \leq u_{GS} - U_t: \quad i_D = i_S = K[2(u_{GS} - U_t)u_{DS} - u_{DS}^2] \\ \text{SAT: } u_{DS} \geq u_{GS} - U_t: \quad i_D = i_S = K(u_{GS} - U_t)^2 \end{array} \right. \quad (1)$$

## 81. Kytkimen jännitehäviö $u_{DS} = u_{IN} - u_{OUT}$ ja kanavan resistanssi $r_{DS}$ kun $u_{OUT} = 1 \text{ V}$

$$K = 1 \text{ mA/V}^2, U_t = 2 \text{ V}, U_{GG} = 5 \text{ V}, R = 1 \text{ k}\Omega.$$



$U_{GG}$  on tasajännite, joka kytkee kytkimen auki tai kiinni (nyt kiinni).

$$-u_{IN} + u_{DS} + u_{OUT} = 0 \Rightarrow u_{DS} = u_{IN} - u_{OUT} \quad (2)$$

$$-U_{GG} + u_{GS} + u_{OUT} = 0 \Rightarrow u_{GS} = U_{GG} - u_{OUT} = 4 \text{ V} \quad (3)$$

# Triodi-alueen yhtälö

Kytkimissä voidaan olettaa, että  $u_{DS}$  on pieni. Silloin ollaan todennäköisesti triodi-alueella. Jos  $u_{DS}$  on *hyvin pieni*,  $u_{DS}^2 \approx 0$  (tästä tulee virhettä):

$$i_D = i_S = K[2(u_{GS} - U_t)u_{DS} \underbrace{- u_{DS}^2}_{\approx 0}] \quad (4)$$

$$i_D = i_S = \frac{u_{OUT}}{R} \approx K[2(u_{GS} - U_t)u_{DS}] \quad (5)$$

$$u_{OUT} \approx RK[2(u_{GS} - U_t)u_{DS}] \Rightarrow u_{DS} = \frac{u_{OUT}}{RK2(u_{GS} - U_t)} \quad (6)$$

$$u_{DS} = \frac{1}{1 \cdot 2(4 - 2)} = 0,25 \text{ V} \quad (7)$$

$$r_{DS} = \frac{u_{DS}}{i_{D(S)}} = 0,25 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

Koska virta on pieni, kytkimen resistanssi voi olla suurehko.

## Onko $u_{DS}^2 \approx 0$ eli onko $u_{GS} - U_t \gg u_{DS}$ ?

Suunnilleen kyllä, mutta ei tarkasti!

$$i_D = \frac{u_{OUT}}{R} = K[2(u_{GS} - U_t)u_{DS} - u_{DS}^2] \quad (9)$$

$$\frac{1}{1\text{ k}} = 1\text{ m}[2(4 - 2)x - x^2] \quad (10)$$

Tarkka vastaus; toisen asteen yhtälö, jossa  $x = u_{DS}$ :

$$1 = 2(4 - 2)x - x^2 \quad (11)$$

$$x^2 - 4x + 1 = 0 \quad (12)$$

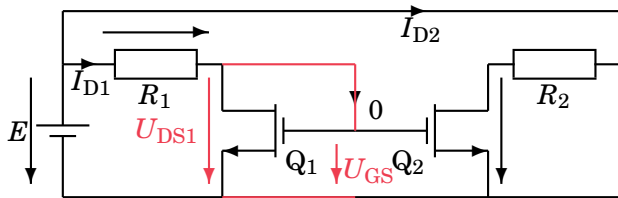
$$x = \frac{4 \pm \sqrt{4^2 - 4 \cdot 1 \cdot 1}}{2 \cdot 1} = 0,268\text{ V} \quad (13)$$

Triodialueella on oltava  $u_{DS} \leq u_{GS} - U_t = 2$  eli toinen juuri ei käy.

## 82. Laske jännite $U_{GS}$

Virtapeili, oletetaan saturaatio-alue:  $U_{DS1} \geq U_{GS} - U_t$

$U_t = 2 \text{ V}$ ,  $K = 100 \mu\text{A/V}^2$ .  $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 10 \text{ V}$ .



$$-E + R_1 I_{D1} + U_{GS} = 0 \quad (14)$$

$$I_{D1} = K(U_{GS} - U_t)^2 \quad (15)$$

Nuoli, jonka molemmat päät ovat irti virtapiiristä, on jännite-nuoli. Se ei ole koskaan johdin eikä sen läpi kulje koskaan virtaa!

# Elektroniikassa kilot ja millit kumoavat usein toisensa! Esim. $1 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ V}$

Juuren valinta

Edellisen sivun yhtälöparista:

$$-E + R_1 I_{D1} + U_{GS} = 0 \quad (16)$$

$$-E + R_1 K (U_{GS} - U_t)^2 + U_{GS} = 0 \quad (17)$$

$$-10 + \underbrace{R_1 K}_{1,5} (x - 2)^2 + x = 0 \quad (18)$$

$$1,5x^2 - 5x - 4 = 0 \quad (19)$$

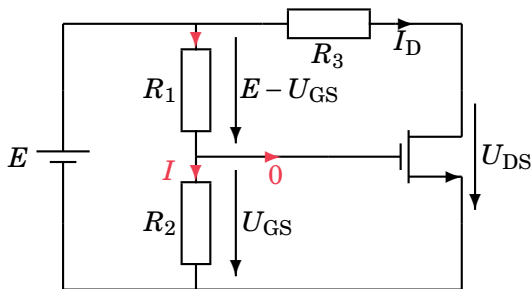
$$\Rightarrow x = 4 \text{ V} \quad (20)$$

Toinen juuri  $-\frac{2}{3}$  V ei käy, koska ensinnäkin virrallisen enmosfetin  $U_{GS} > 0$ , mutta erityisesti on oltava  $U_{GS} > U_t$ !

## 83. Millä $R_3$ :n arvolla FET on TRI- ja SAT-alueiden rajalla?

Rajalla voi käyttää kumpaa tahansa tarkkaa yhtälöä

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 40 \text{ k}\Omega, E = 5 \text{ V}, U_t = 2 \text{ V}, K = 0,1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}.$$





$$I = \frac{U_{GS}}{R_2} = \frac{E - U_{GS}}{R_1} \Rightarrow U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \quad (21)$$

$$-E + R_3 I_D + U_{DS} = 0 \quad (22)$$

$$U_{DS} = E - R_3 I_D \quad (23)$$

$$I_D = K(U_{GS} - U_t)^2 \quad (24)$$

TRI/SAT-rajalla:

$$U_{DS} = U_{GS} - U_t \quad (25)$$

$$E - R_3 K \left( \frac{4}{5} E - U_t \right)^2 = \frac{4}{5} E - U_t \quad (26)$$

$$5 - R_3 K (4 - 2)^2 = 4 - 2 \quad (27)$$

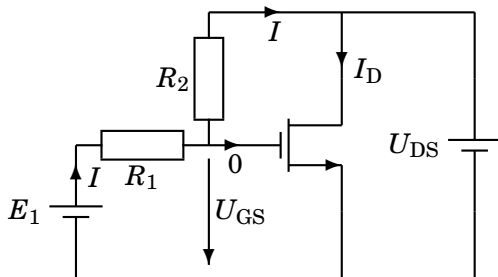
$$3 = 4R_3 K \quad (28)$$

$$R_3 = 7,5 \text{ k}\Omega \quad (29)$$

## 84. Laske kanavan resistanssi $r_{DS}$

triiodi-alueen tarkalla kaavalla

$$E_1 = 5 \text{ V}, R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega, U_t = 2 \text{ V}, K = 0,1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}.$$



$$-E_1 + R_1 I + U_{GS} = 0 \Rightarrow I = \frac{E_1 - U_{GS}}{R_1} \quad (30)$$

$$-U_{GS} + R_2 I + U_{DS} = 0 \Rightarrow I = \frac{U_{GS} - U_{DS}}{R_2} \quad (31)$$

$$I = \frac{E_1 - U_{GS}}{R_1} = \frac{U_{GS} - U_{DS}}{R_2} \quad (32)$$

$$\Rightarrow U_{GS} = \frac{E_1 + U_{DS}}{2} \quad (33)$$

$$I_D = K [2(U_{GS} - U_t)U_{DS} - U_{DS}^2] \quad (34)$$

$$I_D = K \left[ 2 \left( \frac{E_1 + U_{DS}}{2} - U_t \right) U_{DS} - U_{DS}^2 \right] \quad (35)$$

$$I_D = K(E_1 - 2U_t)U_{DS} \quad (36)$$

$$r_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_D} = \frac{1}{K(E_1 - 2U_t)} = 10 \text{ k}\Omega \quad (37)$$

$$g_{DS} = \frac{1}{r_{DS}} = KE_1 - \text{vakio} \quad (38)$$

Resistanssi ei riipu virrasta  $I_D$ ;  
konduktanssi on lineaarisesti verrannollinen säätöjännitteeseen  $E_1$ .