



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

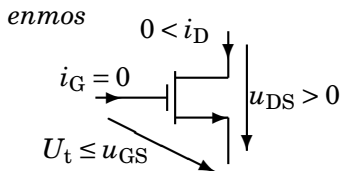
Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

11.–16.11.2020

Laskuharjoitus 8. Kanavatransistori FET (ENMOS)

Johdanto (vrt. Kako)



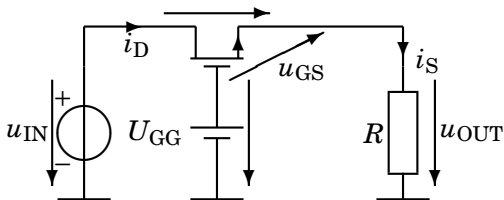
Jänniteohjattu virtalähde VCCS: u_{GS} säätelee virtaa i_D .

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*, $u_{DS}^2 \approx 0$ (tässä 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 $x = u_{DS}$:

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

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

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

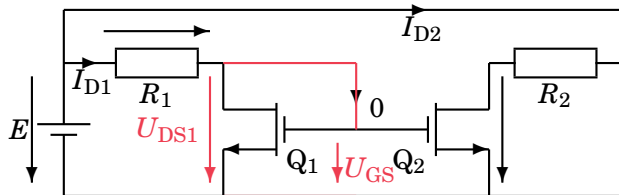
Triodialueella on oltava $u_{DS} \leq u_{GS} - U_t = 2$ eli toinen juuri ei käy.

82. Laske jännite U_{GS}

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

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

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



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

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

Elektroniikassa kilot ja millit kumoavat usein toisensa! Esim. mA · kΩ = 1 V

Juuren valinta

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

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

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

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

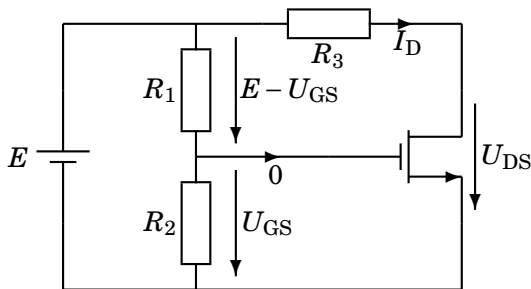
$$\Rightarrow x = 4 \text{ V} \quad (20)$$

Toinen juuri $-\frac{2}{3}$ V ei käy, koska ensinnäkin virrallisen fetin $U_{GS} > 0$, 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

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



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

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

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

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

TRI/SAT-rajalla:

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

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

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

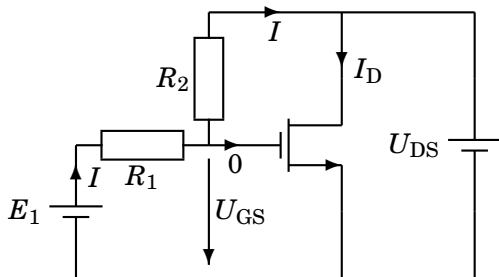
$$3 = 4R_3 K \quad (28)$$

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

84. Laske kanavan resistanssi r_{DS}

triodi-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 suoraan verrannollinen säätöjännitteeseen E_1 .