



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

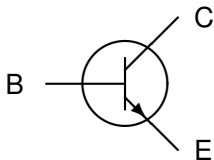
Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

4.–9.11.2020

Laskuharjoitus 7. Bipolaaritransistori BJT (npn)

Virtaohjattu virtalähde

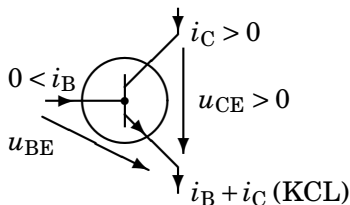


Transistori on pohjimmiltaan vakiovirtalähde, jonka päävirtaa (C–E) voidaan lineaarisesti säädellä B–E-haaran virralla. Koska päävirta voidaan sammuttaa kokonaankin, toimii transistori myös virtaohjattuna kytkimenä. Tämä jälkimmäinen käyttötapa liittyy digitaalitekniikkaan ja tehoelektroniikkaan. Ensin mainittu lineaarinen toiminta mahdollistaa signaalin vahvistamisen, mihin tehtävä 73 liittyy.

Johdanto (vrt. Kako)

Virtavahvistus β ja kanta-emitteri-diodin jännitehäviö U_{BE}

npn



$$u_{BE} \approx 0,7 \text{ V} \quad (1)$$

$$i_C = \beta i_B \quad \text{kun} \quad u_{CE} \geq 0,3 \text{ V} \quad (2)$$

$$i_C = \alpha i_E \approx I_{Se} \frac{u_{BE}}{U_T} \quad (3)$$

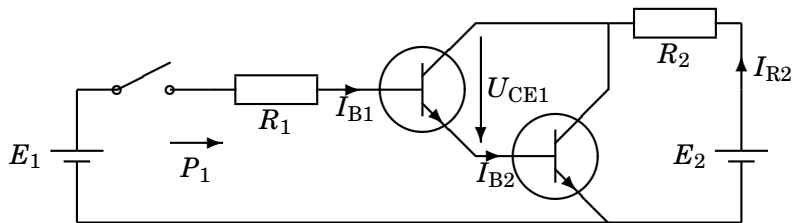
Kun transistorin yksi virta tunnetaan, kaikki virrat tunnetaan
(linearisessa toiminnassa – ei kyllästystilassa)

71. Darlington-pari

Miten suuri (ohjaus)teho P_1 on jännitelähteestä E_1 otettava, jotta vastukseen R_2 saadaan tehoa $P_2 = 80 \text{ W}$?

Transistorit muodostavat jänniteohjatun kytkimen.

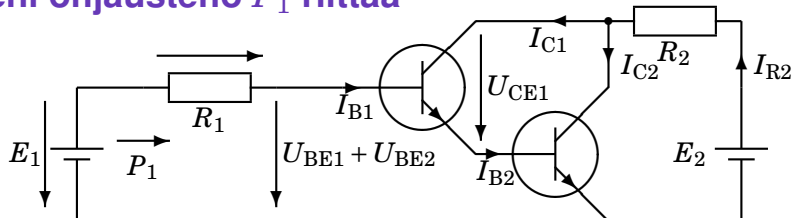
$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \Omega$, $U_{BE1} = U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$, $\beta_1 = \beta_2 = 100$.



$$P_{R2} = R_2 I_{R2}^2 = 80 \Rightarrow I_{R2} = \sqrt{\frac{P_{R2}}{R_2}} = 4 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_{B2} = I_{E1} = (\beta + 1) I_{B1} \quad (5)$$

Pieni ohjausteho P_1 riittää



$$I_{C2} = \beta \cdot I_{B2} = \beta \cdot (\beta + 1) I_{B1} \quad (6)$$

$$I_{R2} = I_{C1} + I_{C2} = \beta \cdot I_{B1} + \beta \cdot (\beta + 1) I_{B1} \quad (7)$$

$$\Rightarrow I_{B1} = \frac{I_{R2}}{\beta + \beta(\beta + 1)} = 0,392 \text{ mA} \quad (8)$$

$$-E_1 + R_1 I_{B1} + U_{BE1} + U_{BE2} = 0 \quad (9)$$

$$E_1 = R_1 I_{B1} + U_{BE1} + U_{BE2} = 5,32 \text{ V} \quad (10)$$

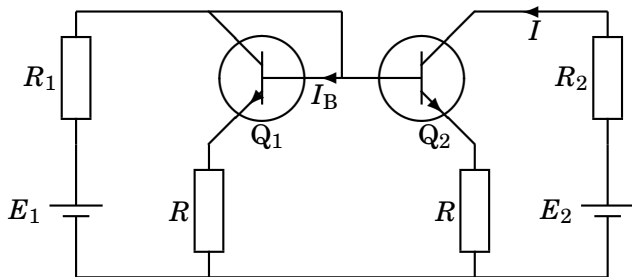
$$P_1 = E_1 I_{B1} \approx 2 \text{ mW} \quad (11)$$

$$(E_2 \geq R_2 I_{R2} + U_{CE1\min} + U_{BE2} = 5 \cdot 4 + 0,3 + 0,7 = 21 \text{ V}) \quad (12)$$

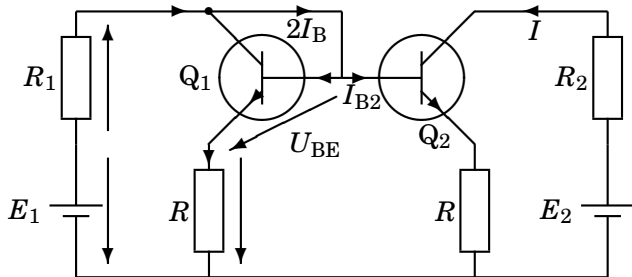
72. Virtapeili

Paljonko virta I muuttuu prosentteina, jos $\beta_1 = \beta_2 = 100$ kaksinkertaistuvat arvoon 200?

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 0 \text{ }\Omega$, $R = 100 \text{ }\Omega$, $E_1 = E_2 = 4 \text{ V}$, $U_{BE1} = U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$
(eivät muutu).



Q_1 ja Q_2 viittaavat transistoreihin, eivät virtoihin.



$$-E_1 + R_1(\beta_1 + 2)I_B + U_{BE} + R(\beta_1 + 1)I_B \quad (13)$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{E_1 - U_{BE}}{R_1(\beta_1 + 2) + R(\beta_1 + 1)} = 29,44 \mu\text{A} \quad (14)$$

$$I_{B2} = I_{B1} \Rightarrow I = \beta_2 I_{B2} = \frac{E_1 - U_{BE}}{R_1 \frac{\beta_1 + 2}{\beta_2} + R \frac{\beta_1 + 1}{\beta_2}} \quad (15)$$

Virta ei juuri muutu

R:t muodostavat negatiivisen takaisinkytkennän

$$I = \beta_2 I_{B2} = \frac{E_1 - U_{BE}}{R_1 \frac{\beta_1 + 2}{\beta_2} + R \frac{\beta_1 + 1}{\beta_2}} \approx \frac{E_1 - U_{BE}}{R_1 + R} \quad (16)$$

$$\beta = 100 \Rightarrow I = 2,94 \text{ mA} \quad (17)$$

$$\beta = 200 \Rightarrow I = 2,97 \text{ mA} \quad (18)$$

Muutos virrassa on noin 1 %. Hyvät transistoripiirit toimivat sitä paremmin, mitä korkeampi β on. Tarkistus (ei vaadittu):

$$U_{CE1} = E_1 - R_1(\beta_1 + 2)I_B - R(\beta_1 + 1)I_B = 0,7 \text{ V} \geq 0,3 \text{ V} \quad (19)$$

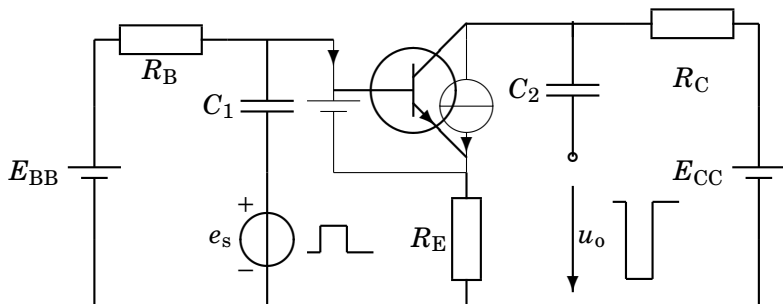
$$U_{CE2} = E_2 - R_2\beta_2 I_B - R(\beta_2 + 1)I_B = 2,5 \text{ V} \geq 0,3 \text{ V} \quad (20)$$

73. Laske transistorivahvistimen toimintapiste

Lineaarinen toiminta ja DC-sijaiskytkentä

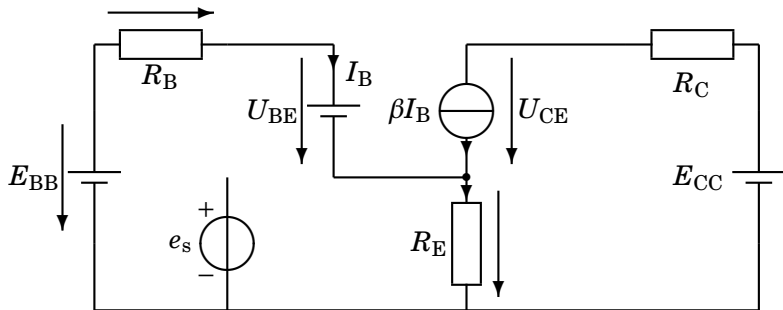
Toimintapiste: I_B , I_C , U_{CE} , $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$

$\beta = 99$, $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1 \text{ k}\Omega$, $E_{BB} = 2,7 \text{ V}$, $E_{CC} = 9 \text{ V}$.



DC-analyysi

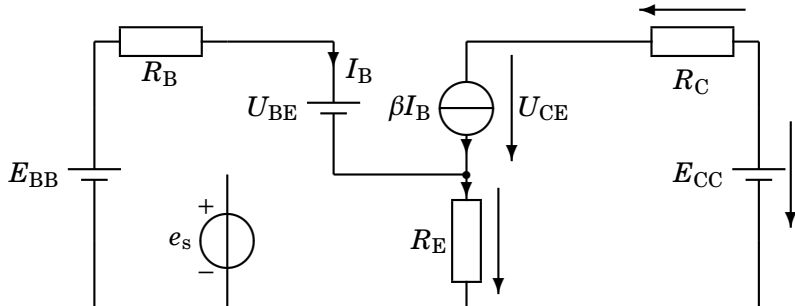
Kondensaattorit katkaistaan



$$-E_{BB} + R_B I_B + U_{BE} + R_E (\beta + 1) I_B = 0 \quad (21)$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{E_{BB} - U_{BE}}{R_B + R_E (\beta + 1)} = 10 \mu\text{A} \quad (22)$$

Kollektori-emitteri-piirin yhtälö



$$I_C = \beta I_B = 990 \mu\text{A} \quad (23)$$

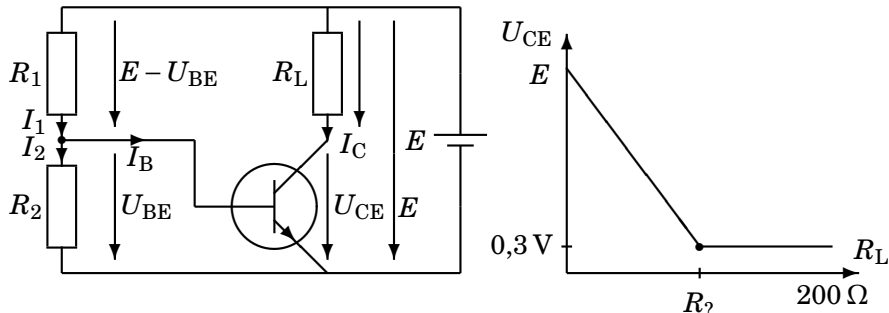
$$-E_{CC} + R_C \beta I_B + U_{CE} + R_E (\beta + 1) I_B = 0 \Rightarrow \quad (24)$$

$$U_{CE} = E_{CC} - R_C I_C - R_E (\beta + 1) I_B = 5,03 \text{ V} \quad (25)$$

74. Transistorin kyllästyminen eli saturaatio

Oleta, että U_{CE} kyllästyy kuvan mukaisesti arvoon 0,3 V

Huomaa kuvan lisämerkinnät alkuperäiseen kuvaan verrattuna!
Mitä arvoja saa virta I_C , kun kuormavastus R_L vaihtelee välillä
 $0 \dots 200 \Omega$. $R_1 = 4,65 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 700 \Omega$, $\beta = 100$, $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $E = 10 \text{ V}$.



Lineaarinen toiminta

Huomaa, että vastusten R_1 ja R_2 jännitteet tunnetaan U_{BE} :n perusteella, vaikka niitä ei suoraan annettu tehtävässä.

$$I_B = I_1 - I_2 = \frac{E - U_{BE}}{R_1} - \frac{U_{BE}}{R_2} = 1 \text{ mA} \quad (26)$$

Linearisessa toiminnassa siis $I_C = \beta I_B = 100 \text{ mA}$.

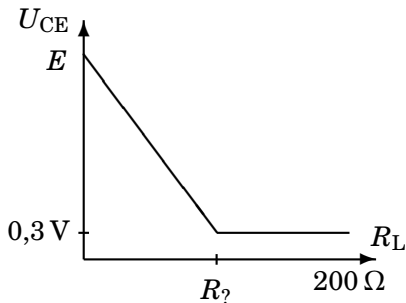
Tutkitaan seuraavaksi, millä vastusarvolla (R_L) ollaan käyrän kulmapisteessä:

$$U_{CE} = E - R_L \underbrace{I_C}_{\beta I_B} = 0,3 \quad (27)$$

$$\Rightarrow R_L = R_L = \frac{E - 0,3}{\beta I_B} = 97 \Omega \quad (28)$$

Kun $0 \leq R_L \leq 97 \Omega$, on $I_C = 100 \text{ mA}$.

Kyllästyminen



Virtavahvistuserrointa β saa käyttää vain silloin, kun $U_{CE} \geq 0,3 \text{ V}$.

Transistorin virtavahvistus β pienenee, kun transistori joutuu epälineaariselle toiminta-alueelleen eli $U_{CE} \leq 0,3 \text{ V}$.

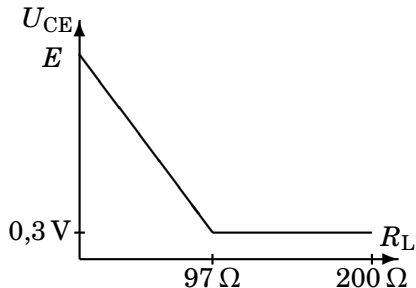
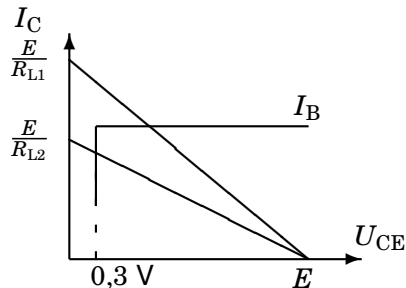
Kun R_L kasvaa, kyllästyy jännite U_{CE} lopulta noin 0,3 volttiin, eikä laske sen alapuolelle, vaikka virtaa I_B tai vastusta R_L kasvatettaisiin.

Epälineaarinen toiminta

Jos R_L kasvaa yli 97 ohmin, alkaa β ja siten myös kollektorivirta pienentyä: $I_C \approx \frac{E-0,3}{R_L}$. Kahdensadan ohmin kohdalla virta on

pienentynyt alle puoleen: $I_{C\text{MIN}} = \frac{E-0,3}{R_{L\text{MAX}}} = 48,5 \text{ mA}$.

Transistorin yksinkertaistetut ominaiskäyrät, joihin tehtävän ratkaisu perustui:



Vastaukseksi saatu käyrä.

Pystyakselin vasemmalla puolella on kollektorivirta ja oikealla puolella virtavahvistus. APLACilla piirretty käyrä (alla) on hyvin samanlainen, vaikka se perustuukin tarkempaan piirimalliin (Ebers–Moll). Käyrän tarkka muoto riippuu transistorin parametreistä.

