11. Diood ja transistor raadiosagedustel

IEE2560 – Raadiosageduslik elektroonika

Pooljuhtdioodid



Foto: https://www.agsdevices.com/types-of-diodes/

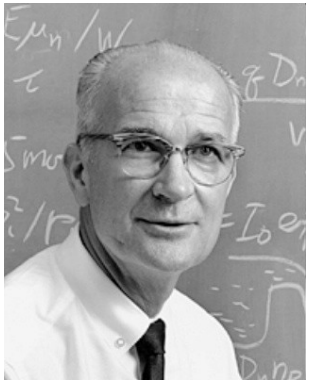
Pooljuhtdioodide liigid ja rakendused

- Alaldusdiood;
- Piiramisdiood;
- Stabilitron ehk zenerdiood;
- Schottky diood;
- PIN diood;
- Mahtuvdioodid (varikapid) ja varaktorid;
- Gunn’i diood;
- Tunneldiood;
- Valgusdiood (LED);
- Fotodiood;
- …



- Pinge alaldamine;
- Pinge stabiliseerimine;
- Moduleerimine- ja demoduleerimine;
- Sageduse kordistamine ja sagedusmuundus;
- Lülitamine;
- Vooluga tüüritav takistus (atenuaatorid ja lülitid);
- Pingega tüüritav mahtuvus (filtrid- ja ostsillaatorid);
- Signaalide genereerimine ja võimendamine;
- …

Shockley dioodi valem



William Bradford Shockley Jr.

- Dioodi pinge-voolu (UI) karakteristik

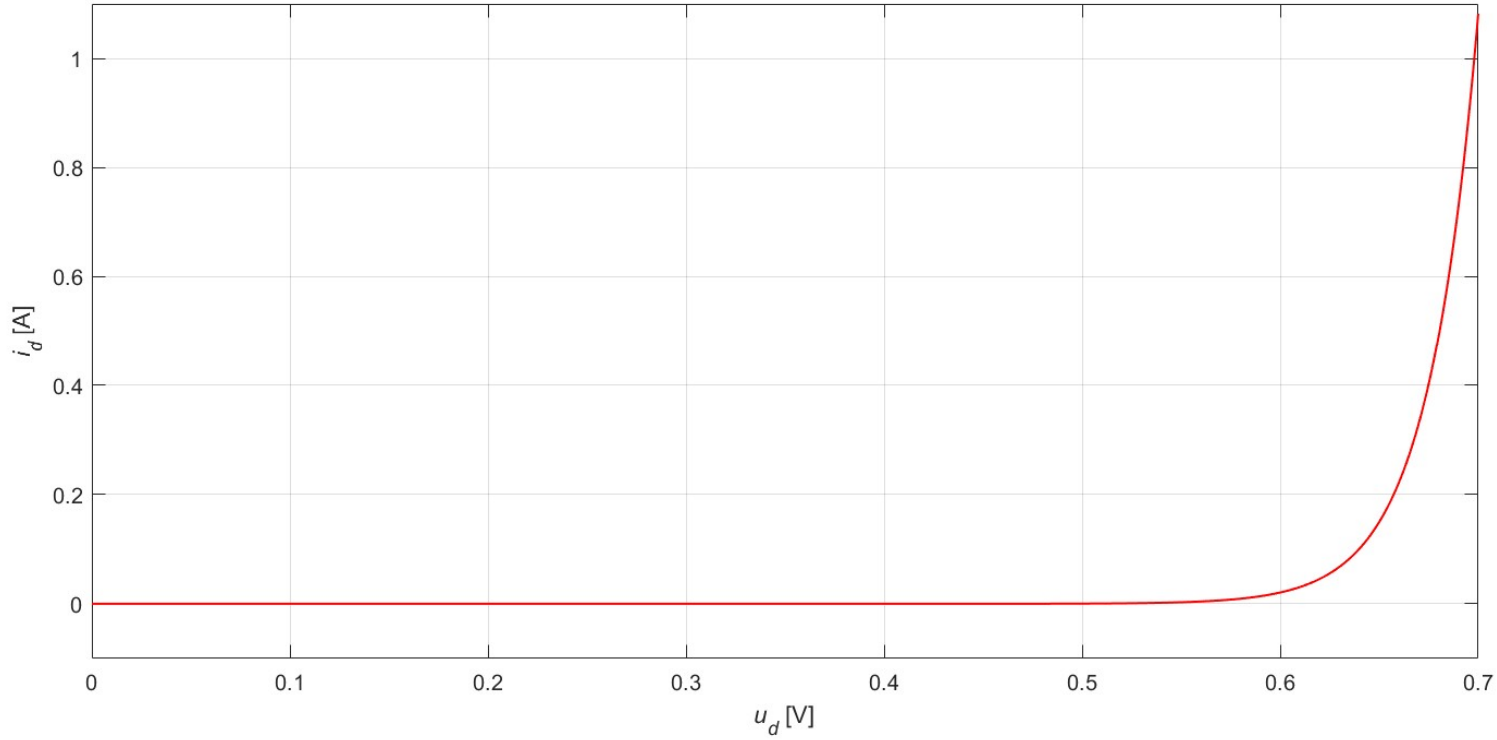
$$i_D = I_{küll}\left(e^{\frac{u_D}{nU_T}} - 1\right) = I_{küll}\left(e^{\frac{q_e u_D}{nkT}} - 1\right).$$

- Avaldises tähistab:
  - i_D dioodi läbiva voolu tugevust dioodi otstel oleva pinge u_D korral;
  - n – on ideaalsustegur (*ideality factor*), tavaliselt on väärtus vahemikus ühest kaheni, ideaalse dioodi korral võrdne ühega;
  - $I_{küll}$ on vastupingestatud dioodi küllastusvool, pikoamprite suurusjärgus;
  - U_T on termopinge (toatemperatuuril u 25 mV):

$$U_T = \frac{kT}{q_e},$$

  - kus k = 1,38·10^{-23} J/K on Boltzmanni konstant, T dioodi absoluutne temperatuur [K] ja q_e on elementaarlaeng 1,6·10^{-19} C.

Shockley dioodi valem



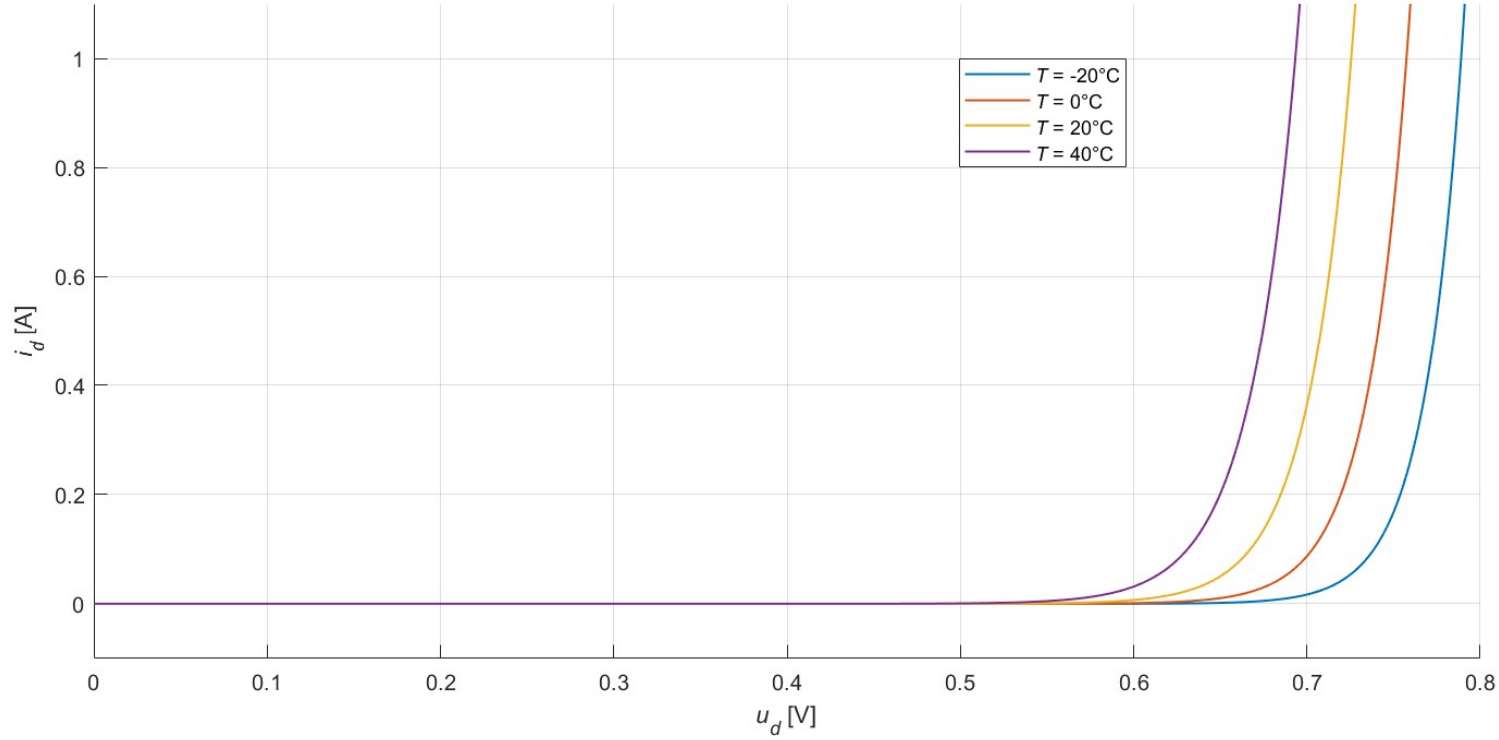
Temperatuurisõltuvus

- Nagu Shockley dioodi valemist näeme sõltub dioodi pärivoolu tugevus temperatuurist *T*.
- Tegelikult ei ole ka küllastusvool konstantne vaid see sõltub samuti temperatuurist.

$$I_{küll}(T) = K \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}.$$

kus *K* on dioodi materjalist ja ehitusest sõltuv konstant [A/K^3] ja E_g on keelutsooni laius [eV, J].

Temperatuurisõltuvus



Transistorid

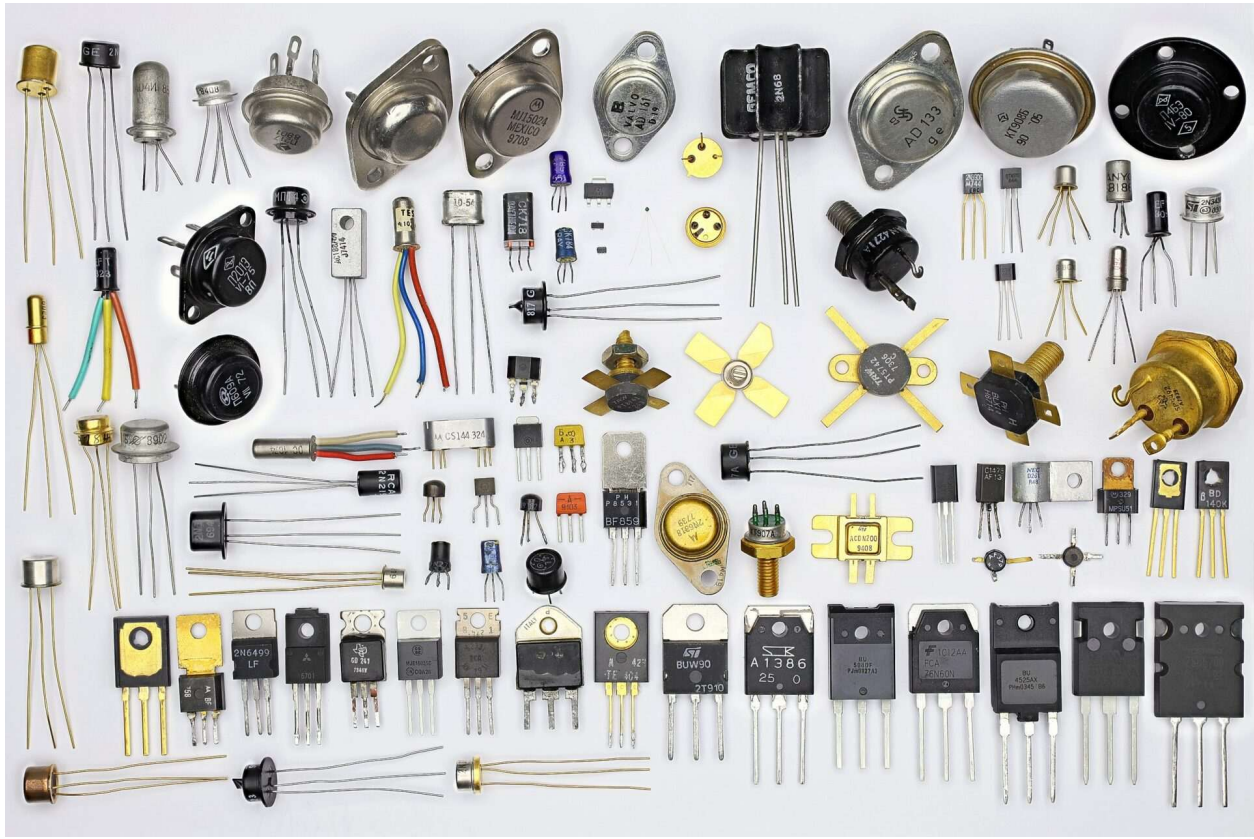


Foto: https://hamradioacademy.com/the-role-of-the-transistor-in-amateur-radio/

Transistori mudelid

- Transistor on **mittelineaarne seade**!
- Üheks levinumaks mittelineaarseks transistori mudeliks on **Ebers-Moll'i** mudel.
- Juhul kui võimendatava signaali amplituud on väike võime me vaadelda transistorit lihtsustatuna lineaarse seadmena. Sellisel juhul öeldakse, et transistor opereerib **väikese signaali režiimis** (*small signal model*).
- Tuntuimad lineaarsed mudelid on transistori **hübriidmudel**, **Giocoletto** ehk hübriid-pii mudel ja transistori **T-mudel**.

Ebers-Moll'i mudel



Jewell James Ebers

- Juuresolev joonis vastab npn transistorile.
- Aktiivrežiimis:

$$i_E = I_{Eküll}\left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1\right),$$
$$i_K = \alpha_p i_E,$$
$$i_B = \left(1 - \alpha_p\right) i_E.$$

- Emitteri küllastusvool on $I_{Eküll}$, u_{BE} on baasi- ja emitteri vaheline pinge ja α_p on vooluvõimendustegur ühise baasiga režiimis.

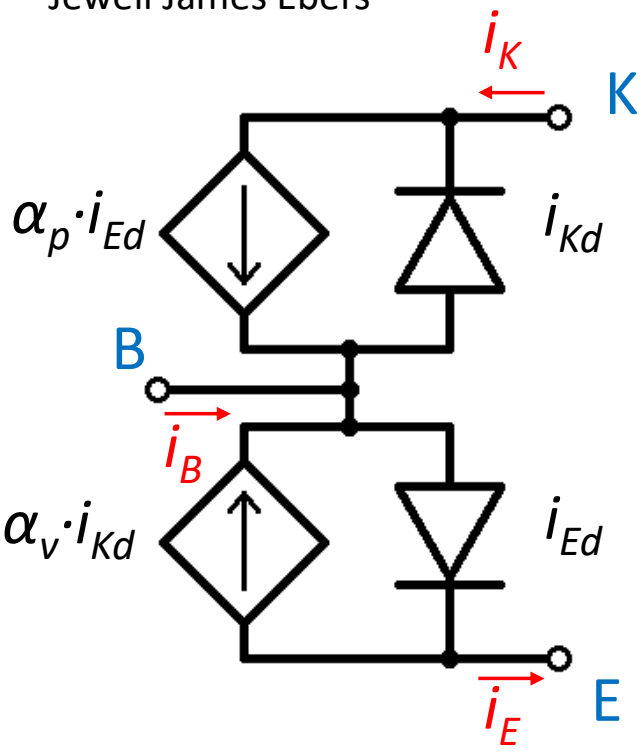


Foto: https://en.wikipedia.org/wiki/Jewell_James_Ebers

Transistori Giocoletto mudel

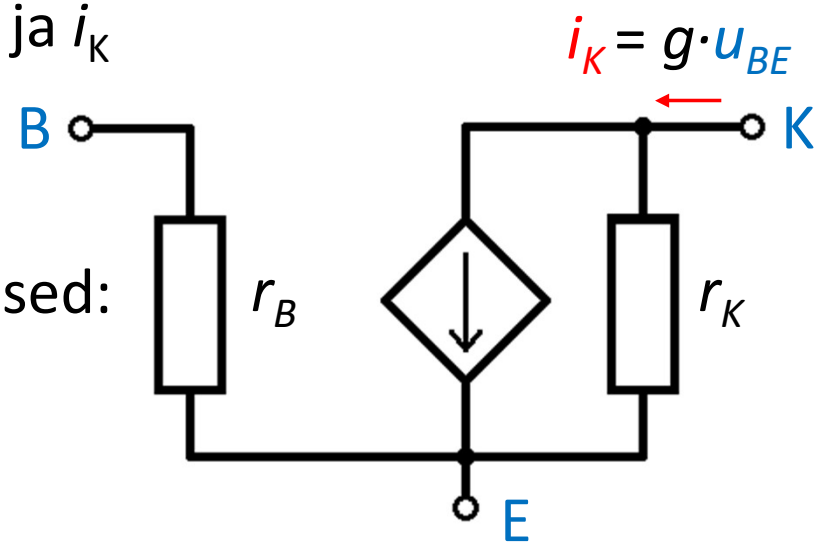

Lawrence Joseph Giacoletto

- Ebers-Moll'i mudeli lineariseerimise tulemus.
- Mudelis on sõltumatuteks muutujateks sisend- ja väljundpinged (ÜE režiimis) u_{BE} ja u_{KE}. Sõltuvad muutujad on vastavalt sisend- ja väljundvoolud i_B ja i_K

$$i_B = \frac{1}{r_B} u_{BE}, \qquad i_K = g u_{BE} + \frac{1}{r_K} u_{KE}.$$

- Parameetrite r_B, r_K ja g arvutamise aluseks on seosed:

$$i_K = I_{küll}\left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1\right) = \beta i_B.$$



https://giacoletto.org/the-giacoletto-brothers/lawrence-joseph-giacoletto/

Early efekt



James M. Early

- Kollektorpinge muutmine mõjutab baasi efektiivset paksust. Aseskeemis võib seda nähtust, tuntud kui **Early efekt**, vaadelda sisemise alalispinge tagasisidena. Kollektorvool

$$i_K = I_{küll}\left(1 + \frac{u_{KE}}{U_A}\right)\left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1\right),$$

kus U_A on **Early pinge**. Viimase väärtus on tüüpiliselt vahemikus 15…150 V.

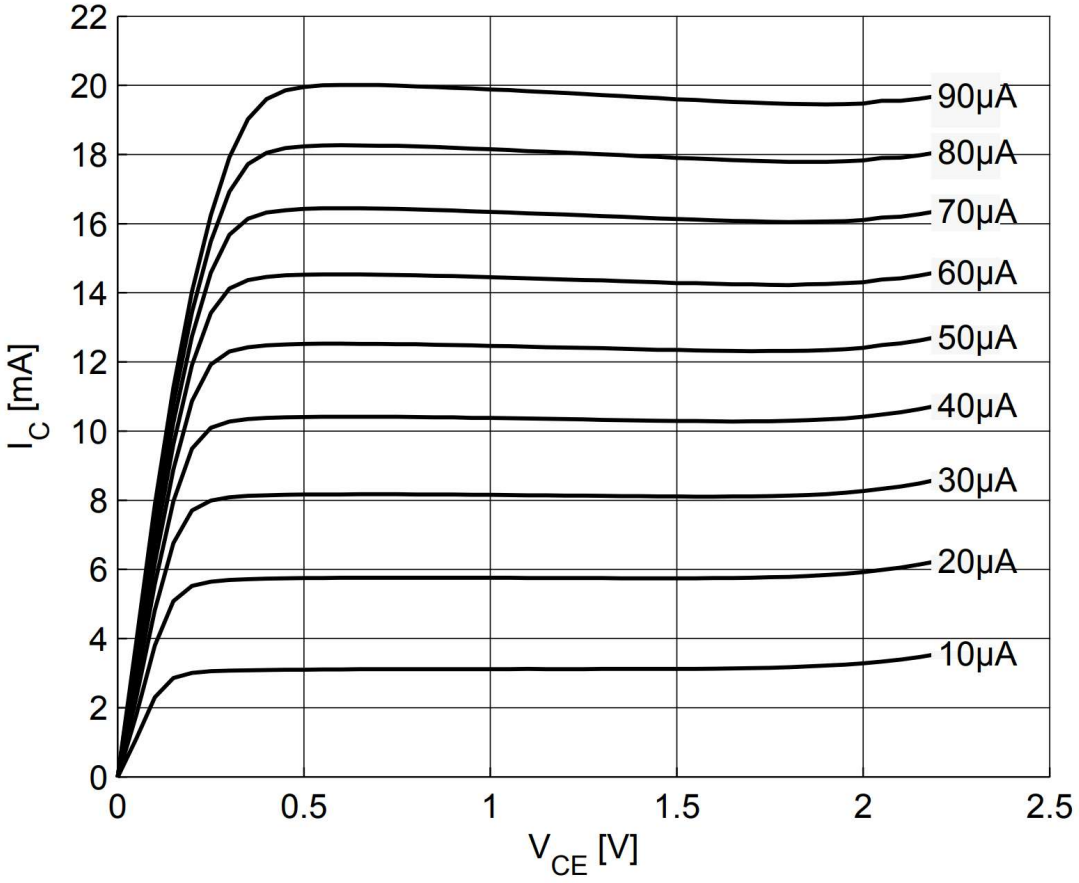
- Transistori väljundtakistus

$$r_K = \left.\frac{u_{KE}}{i_K}\right|_{u_{BE}=0} = \frac{U_{KE0} + U_A}{I_{K0}} \approx \frac{U_A}{I_{K0}}.$$

Foto: https://www.smecc.org/james_m__early.htm

Transistori väljundtunnusjooned - näide

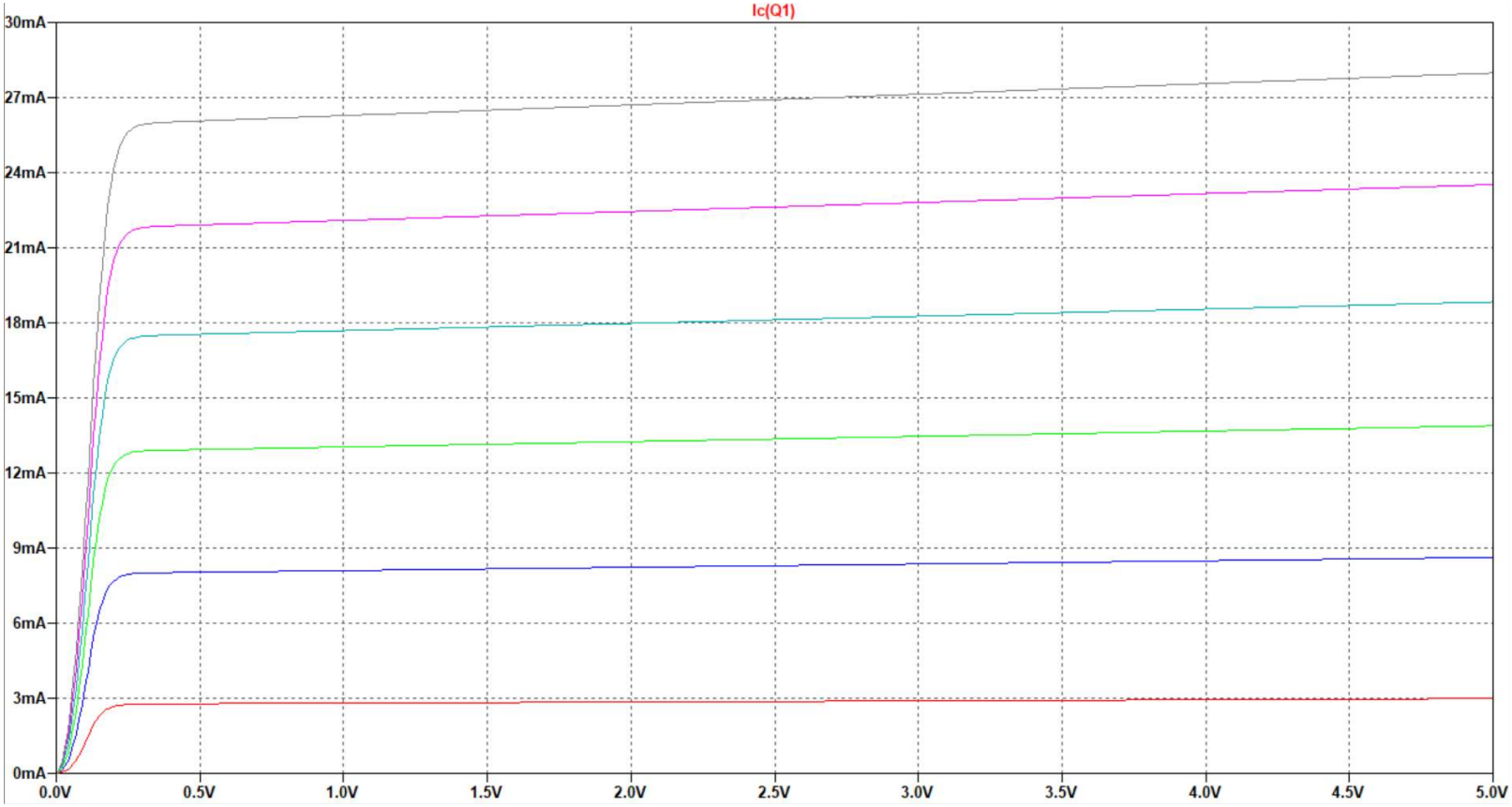
Transistor:
BFR843EL3



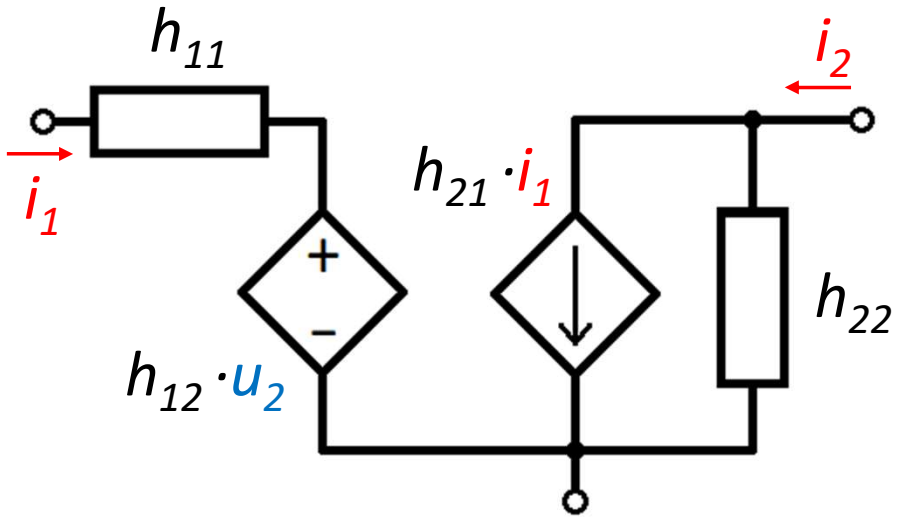
Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/196/Infineon_BFR843EL3_DS_v02_00_EN-1840621.pdf

Transistori väljundtunnusjooned - näide

Transistor:
BC547B



Transistori hübriidmudel



- Transistori lülitusviisi (ÜE, ÜK või ÜB) näitab parameetri alaindeks.
- Sisendimpedants

$$h_{11} = \left.\frac{u_1}{i_1}\right|_{u_2=0} .$$

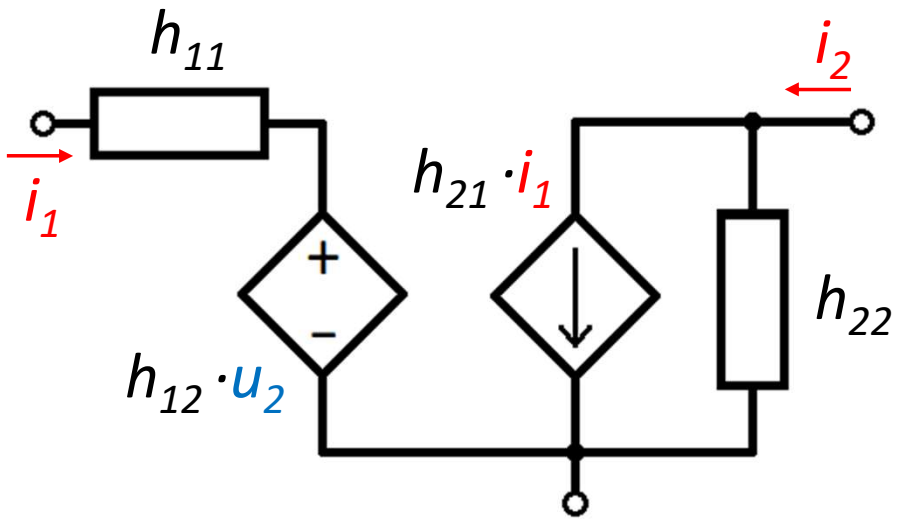
- Pingevastuside

$$h_{12} = \left.\frac{u_1}{u_2}\right|_{i_1=0} .$$

- Vooluülekanne

$$h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_i}\right|_{u_2=0} .$$

Transistori hübriidmudel II



- Väljundjuhtivus

$$h_{22} = \left.\frac{i_2}{u_2}\right|_{i_1=0}.$$

- Maatrikskujul

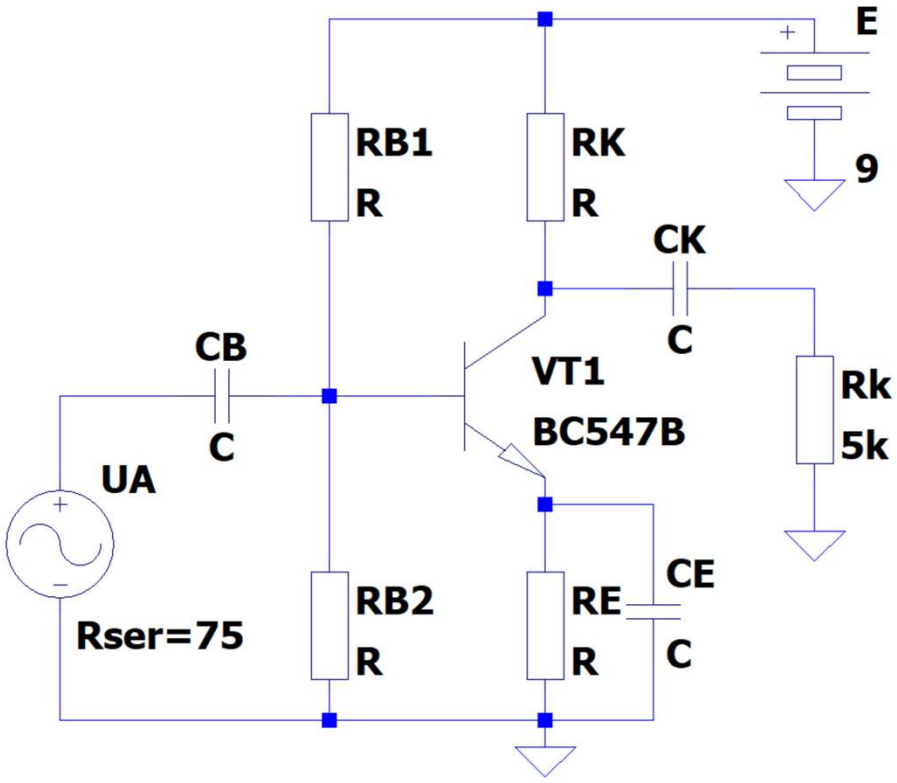
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

- Kus **hübriidparameetrite** maatriks on

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}.$$

Alalisvooluvastusidega astme tööpunkt

- Lähteandmed:
  - Kasutatav transistor: BC547B;
  - Toitepinge: E = 9V;
  - Tööpunkt: U_{KE} = 4 V ja I_K = 3 mA;
  - Töösagedus: f = 8,8 MHz;
- Allika- ja koormuse impedantsid:
  - Z_A (R_A) = 75 Ω ja
  - Z_k (R_k)= 5 kΩ;



Emittertakisti väärtus

- Tüüpilise ränitransistori baasipinge temperatuurisõltuvus on.

$$\frac{dU_{BE}}{dT} \approx -2{,}5\,\frac{\mathrm{mV}}{^{\circ}\mathrm{C}}.$$

- Viimase mõju transistori kollektorvoolu stabiilsusele:

$$\Delta I_K \approx -\frac{dU_{BE}}{dT}\frac{I_K}{U_E}.$$

- Mõju vähendamiseks valitakse praktikas emitteri alalispinge väärtus vahemikus $U_E \approx 1\ldots 4$ V. Seega emitteritakisti takistus

$$R_E = \frac{U_E}{I_K}.$$

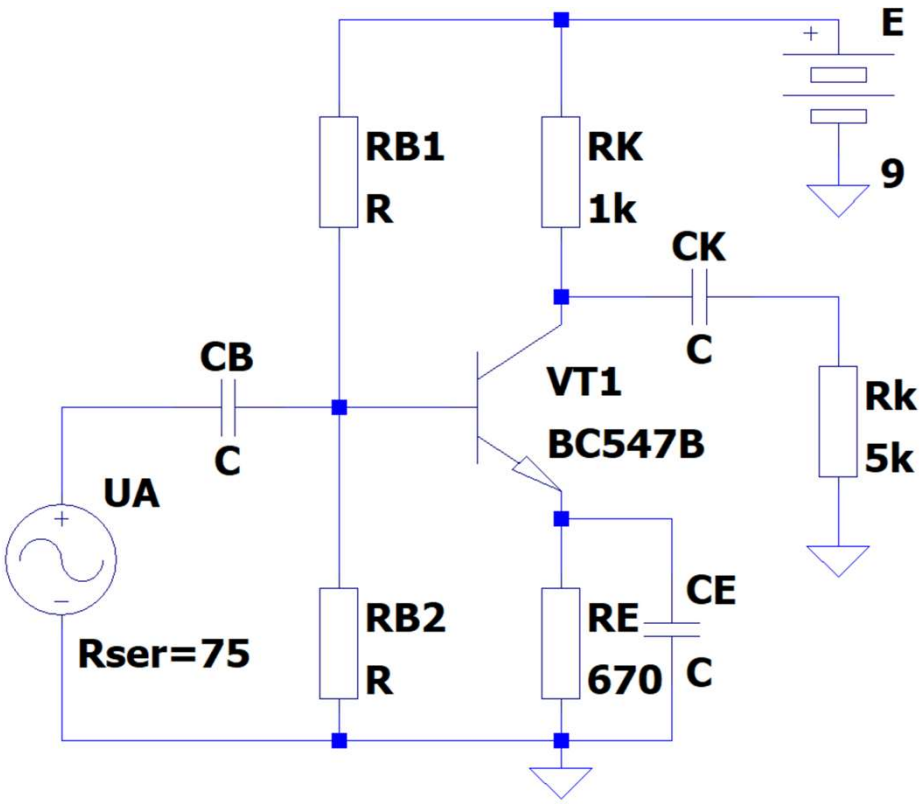
- Valime oma näites $U_E = 2$ V ja saame, et $R_E = 670\ \Omega$.

Kollektortakisti takistus

- Kollektori alalispinge maa suhtes on $U_K = U_{KE} + U_E$, meie näiteks 6 V.
- Kollektortakisti takistus

$$R_K = \frac{E - U_{KE} - U_E}{I_K}.$$

- Saame väärtuseks R_K = 1 kΩ



Tempertuuri mõju vooluvõimendustegurile

- Transistori vooluvõimendustegur kasvab koos temperatuuriga umbes pool protsenti iga kraadi kohta: $d\beta/dT$ = 0,5%/°C. Selle mõju kollektorvoolu stabiilsusele avaldub kujul:

$$\Delta I_K \approx I_{Kmin}\left(\frac{\beta_{max}-\beta_{min}}{\beta_{max}\beta_{min}}\right)\left(1+\frac{R_B}{R_E}\right).$$

  Praktikas ei tohiks suhe R_B/R_E ületada kümmet.

- Takistus $R_B = R_{B1}||R_{B2}$.
- Kui tulemus ületab kümmet, siis võib baasipingejaguri voolu tõsta ja arvutusi korrata.

Baasipingejaguri arvutused.

- Pinge baasipingejaguri alumisel õlal on $U_B = U_E + U_{BE}$.
- Baasipingejagurit võiks läbida vool I_{Bpj}, mis on **vähemalt** 10 korda suurem baasivoolust $I_B = I_K/\beta$. Seega baasipingejaguri alumise õla takistus:

$$R_{B2} \leq \frac{U_E + U_{BE}}{10 I_{Bpj}} = \frac{U_E + U_{BE}}{10 I_K} \beta_{min}.$$

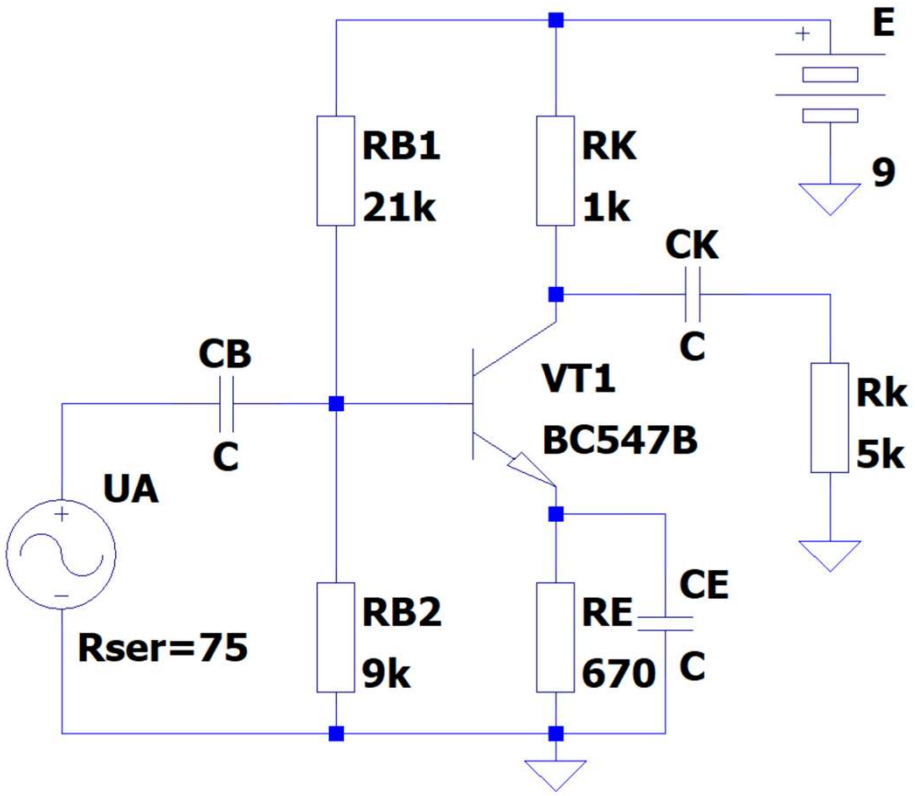
- Baasipingejaguri ülemise õla takistus on seega

$$R_{B1} = R_{B2} \frac{E - (U_E + U_{BE})}{U_E + U_{BE}}.$$

- Kontrolli kas, R_B/R_E < 10. Vajadusel suurenda baasipingejaguri voolu ja korda kahte viimast arvutust.

Baasipingejaguri arvutused.

- Esimesel katsel saime väärtused R_{B1}= 18 kΩ ja R_{B2} = 42 kΩ. Viimastele vastab R_B = 12,6 kΩ mis on palju suurem kui 10R_E = 6,7 kΩ
- Kahekordistame baasipingejaguri voolu suuruseni 0,3 mA ja saame: R_{B1}= 9 kΩ ja R_{B2} = 21 kΩ. Viimastele vastab R_B = 6,3 kΩ mis jääb lubatud 10R_E piiresse.



Astme pingevõimendus

- Pingevõimendustegur

$$k_u = \frac{R_K}{R_E + r_E},$$

kus

$$r_E = \frac{U_T}{I_K} \approx \frac{1}{40 I_K} = \frac{0{,}025}{I_K}.$$

- Emittertakisti R_E mõju vähendamiseks ühendatakse sellega rööbiti kondensaator C_E mahtuvusega:

$$C_E \geq \frac{3\beta}{2\pi f (R_A + r_B)},$$

kus transistori sisendtakistus (h_{11E})

$$r_B = \beta \frac{U_T}{I_K} \approx \frac{\beta}{40 I_K}.$$

Eralduskondensaatorite mahtuvus

- Eralduskondensaatorid C_B ja C_K takistavad alalispinge soovimatut läbipääsu. Samas ei tohi nad märkimisväärselt vähendada võimendatud signaali edasipääsu:

$$C_B \geq \frac{1}{2\pi f(R_A + r_E)},$$

$$C_K \geq \frac{1}{2\pi f(R_K + R_k)}.$$

