

# SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIIKKA

tXt-7 2017, Kimmo Silvonen

Osa VII, 13.11.2017

## 1 Bipolaaritransistori BJT

Yleiskielessä transistorilla tarkoitetaan joko bipolaaritransistoria BJT tai kanavatransistoria eli fettiä. **Transistori** on aktiivinen peruskomponentti, jota käytetään kaikkialla elektroniikassa. Aktiivisuus tarkoittaa tässä sitä, että transistori pystyy antamaan ulos suuremman (signaali)tehon kuin siihen syötetään sisään. Näinhän asia ei tarkkaan ottaen ole, vaan lisäteho otetaan erillisestä tasajännitelähteestä. Hyödylliseksi transistorin tekee nimenomaan se, että tasajännitelähteestä otettua virtaa voidaan säädellä signaalin tahdissa pienellä ohjausvirralla tai ohjausjännitteellä.

John Bardeen, William Shockley ja Walter H. Brattain keksivät transistorin Bellin laboratorioissa 23.12.1947 ja saivat siitä Nobel-palkinnon 1956. Bardeen on ainoana saanut kaksi fysiikan Nobelia — toinen tuli v. 1972 suprajohtavuuden teorian luomisesta. Kolmikko tunnetaan myöskin nimellä *the Transistor Three*. Saman laboratorion John Pierce, väittää keksineensä nimen *transistori* mukaelmana sanasta *transresistanssi*.

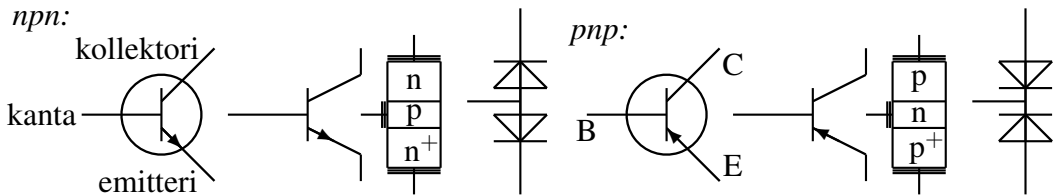
Shockleyn lukuisien keksintöjen joukossa oli myös tyristorien kantaisä, nelikerroksinen Shockleyn diodi, jota hän tutkimusryhmän johtajana piti lupaavampana jatkokehittelyn kohteena kuin transistoria. Historioitsijoiden mukaan Shockley oli vainoharhainen tyranni, mikä johti ongelmiin yrityksessä. Niinpä kahdeksan hänen alaistaan (mm. Intelin perustajat Moore ja Noyce) siirtyi vuonna 1957 lentokonetehailija Sherman Fairchildin leipiin ja perusti autotallifirman Kalifornian Mountain View:hin. Firman perustaminen johti mm. mikropiiriin ja IC-operaatiovahvistimen keksimiseen. Fairchild Semiconductoria pidetään piilaakson hautomona ja sen

*spin-off* tunnetaan nimellä *Fairchildren*.

Transistorin tyypillisiä käyttökohteita ovat vahvistimet, oskillaattorit, kytkimet, vakiovirtalähteet, anturit, nopeat logiikkapiirit, ym. Nykyisin MOS-kanavatransistorit ovat osittain syrjäyttäneet tavallisen transistorin lähinnä hyvän integroitavuutensa, pienen tehonkulutuksensa ja kytkimisessä pienen jännitehäviönsä takia.

## 1.1 npn- ja pnp-transistori

Kerrostamalla kolme puolijohdemateriaalia järjestyksessä *npn* tai *pnp* syntyy **bipolaaritransistori** eli **BJT** (*bipolar junction transistor*) (kuva 1). Bipolaarisuus viittaa siihen, että varauksenkuljettajina toimivat sekä aukot että elektronit toisin kuin mosfeteissä, joiden n-kanavaisissa versioissa varauksenkuljettajina ovat elektronit yksinään, mutta p-kanavaisissa pelkät aukot. Ympyrä jätetään varsinkin mikropiireissä piirrosmerkistä usein pois. Emitterillä oleva nuoli kuvaa virran kulkusuuntaa normaalissa toiminnassa.



**Kuva 1.** *npn*- ja *pnp*-transistorin piirrosmerkit ja *pn*-liitosten periaatteellinen sijainti. Nuoli osoittaa emitterivirran todellisen suunnan. Ensimmäiset transistorit tehtiin germaniumista — v. 1954 valmistettiin Bellin laboratorioissa ensimmäinen piitransistori; pii on ominaisuuksiltaan ylivoimainen.

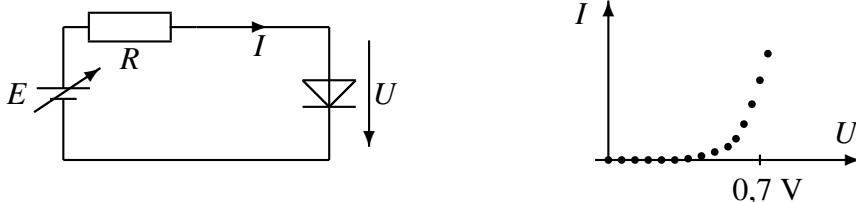
Transistori koostuu siis kahdesta *pn*-liitoksesta, jotka näkyvät tasavirtamittauksissa diodeina. Tätä tietoa voi hyödyntää tutkittaessa, onko transistori *npn*- vai *pnp*-tyyppiä, ja onko se edes ehjä.

Virran pitäisi kulkea *pn*-liitoksen läpi vain diodin nuolen suuntaan. Melko tavallisia vikoja ovat *pn*-liitoksen palaminen poikki tai oikosulkuun. Myös väli C-E voi olla oikosulussa, vaikka diodit näyttäisivätkin ehjiltä; normaalisti C-E-väli näyttää olevan poikki, ellei kannalla kulje virtaa. Koska diodi ei johda virtaa aivan pienellä jännitteellä, on monissa yleismittareissa tavallisen vastusmittauksen lisäksi hieman korkeammalla

jännitteellä toimiva transistori- ja diodimittausalue. Vanhoissa analogisissa yleismittareissa plusjohtimeen tulee vastusmittauksessa yleensä negatiivinen jännite; tämä johtuu mittarin sisäisestä rakenteesta. Tarkista asia toisella jännitemittarilla, ellet ole varma!

Transistorin kolmen elektrodin nimet ovat Bardeenin keksintöä; ensimmäisessä transistorissa kanta oli pohjalevynä, siitä siis nimi *base*. Emitteri emittoi *npn*-transistorissa elektroneja ja *pnp*-transistorissa aukkoja, jotka kollektori kerää; tästä syntyy päävirtapiirin virta, jota kanta–emitterijännite  $u_{BE}$  ja siitä riippuva kantavirta  $i_B$  säätelevät. Transistorin keskimäinen puolijohdealue, **kanta** (B, *base*), on hyvin ohut. **Kollektori** (C, *collector*) ja **emitteri** (E, *emitter*) eivät nekään ole keskenään samanlaisia. Rakenteellisten erojen lisäksi emitterimateriaali on vahvemmin seostettu eli "dopattu" epäpuhtausatomeilla; merkintä  $n^+$  tai  $p^+$  tarkoittaa juuri tätä. Nykyaikaisessa transistorissa pohjalla olevan kollektorin päälle on kasvatettu ohut kantakerros ja sen päälle emitterisaarekkeet.

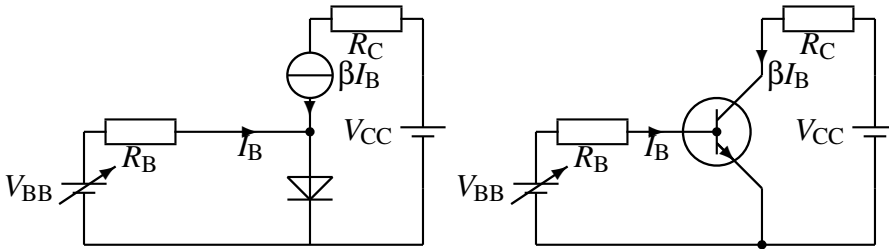
Palataan vielä vertailun vuoksi diodin toimintaan. Diodin virta jännitteen funktiona noudattaa eksponenttikäyrää. Kuvan 2 säädettävällä tasajännitelähteellä voidaan muuttaa lähdejännitettä, jolloin diodin virta muuttuu jännitteen funktiona oheisen käyrän mukaisesti.



**Kuva 2.** Diodin virta  $I$  jännitteen  $U$  funktiona. Transistorin B–E -liitoksen ominaiskäyrä on samanmuotoinen kuin diodilla. Vaikka parametreissa on eroa, virrallisen *pn*-liitoksen jännite on molemmilla samaa suuruusluokkaa. Virta alkaa selvästi kulkea vasta, kun jännite saavuttaa 0,7 V.

## 1.2 Virtavahvistus

Transistorin voisi ajatella syntyvän **virtaohjatusta virtalähteestä**, joka saa ohjauksensa liitoskohtaan tulevasta kantavirrasta  $I_B$  (kuva 3). Transistorin päävirtapiirin (C–E) läpi kulkee jännitelähteestä tuleva virta, joka on siis suoraan verrannollinen paljon pienempään ohjausvirtaan  $I_B$ .



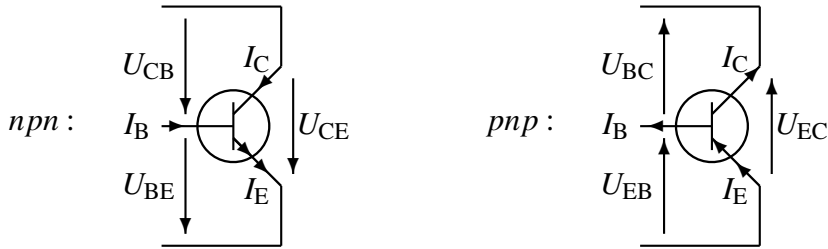
**Kuva 3.** Transistorin mallintaminen diodin ja virtaohjatus virtalähteen (CCCS) avulla. Transistorin piirrosmerkkiin ei yleensä ole tapana piirtää solmua sisään — Kirchhoffin virtalaki toteutuu silti. Kuvan transistori on *nnp*-tyyppiä.

Päävirtapiirissä kulkevan kollektorivirran ja kantavirran suhde  $\beta$  on tyypillisesti suuruusluokaltaan 100 tai enemmän. **Virtavahvistuskerroin** ei siis oikeastaan tarkoita sitä, että virta jotenkin vahvistuisi, vaan pikemminkin kahden erillisen virran suhdelukua. Kannan kautta emitterille kulkevalla pienellä virralla  $I_B$  voidaan säädellä huomattavasti suurempaa kollektorilta emitterille menevää virtaa  $I_C = \beta I_B$ .

Koska lineaarisella toiminta-alueella kollektorivirta on suoraan verrannollinen kantavirtaan, sanotaan transistorin toimivan virtavahvistimena. Energiaa ei kuitenkaan nyhjästä tyhjästä, vaan transistori vaatii toimiakseen käyttövoiman tasajännitelähteestä. Alaindeksi, jossa on sama kirjain kahdesti, tarkoittaa yleensä piirin syöttö- eli **käyttöjännitettä**. Esim.  $V_{CC}$  tai  $U_{CC}$  on transistorin kollektorille (C) (ehkä vastuksen kautta) kytketty käyttöjännite, vaikka se toisesta päästään on kytketty maahan eli esim. emitterille.

Vastus  $R_C$  ei ole *transistorin* toiminnan kannalta välttämätön. Monessa sovelluskytkenässä vastus kuitenkin tarvitaan. Todellisella transistorilla ei ole kuvaan merkittyä solmukohtaa, eikä diodia ja ohjattua lähdettä voida käsitellä erillisinä. Transistori noudattaa tätä yksinkertaista piirimallia likimain niin kauan, kun ohjatus lähteen jännite pysyy positiivisena.

Kuvaan 4 on merkitty *nnp*- ja *pnp*-transistorien virtojen ja jännitteiden todelliset suunnat. Varsinkin datakirjoissa kaikki transistorin virrat määritellään sisäänpäin IEC:n yleisstandardin mukaisesti. Tällöin *nnp*-transistorin emitterivirta ja *pnp*-transistorin kanta- ja kollektorivirta ovat negatiivisia. Kursseillani **virtojen suunnat** on kuitenkin valittu selvyysden vuoksi siten, että kaikki transistorin virrat ovat aina lukuarvoiltaan positiivisia; perusteluna valinnalle ovat pedagogiset syyt.



**Kuva 4.** Transistorin virtojen ja jännitteiden suunnat. Näiden suuntien mukaiset virrat ja jännitteet ovat siis normaalisti lukuarvoiltaan positiiviset (ks. teksti yllä). Jännite  $U_{CB}$  voi olla *npn*-transistorilla joskus negatiivinen ja vastaavasti jännite  $U_{BC}$  voi *pnp*-transistorilla olla joskus negatiivinen.

Lähellä kylläystilaa voi *npn*-transistorin  $U_{CB}$  tai *pnp*-transistorin  $U_{BC}$  olla toiminnan häiriintymättä niukasti negatiivinen. Huomaa, että alaindeksien järjestys vastaa nuolen ja jännitteen suuntaa. Kollektorivirran suunta kääntyy vain, jos kollektorin ja emitterin välinen potentiaaliero vaihtaa merkkiä. Jännite  $U_{CE}$  kyllästyy virrallisena minimissään noin 0,1 ... 0,3 volttiin. Aivan nollavirralla mennään tietysti origoon.

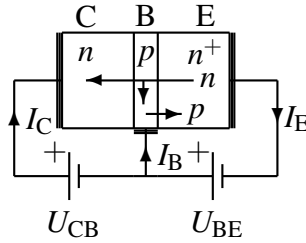
### 1.3 Transistorin puolijohdefysiikkaa

Tämä alaluku perustuu osittain diodin yhteydessä käsiteltyyn *pn*-liitokseen. Toisaalta voit halutessasi hypätä suoraan kohtaan 1.4.

Kuvassa 5 tasajännitelähteiden tarkoituksena on biasoida *npn*-transistorin C–B-väli estosuuntaan, mutta B–E-väli päästösuuntaan. Tämä vastaa tavallisia transistorin toimintaolosuhteita (aktiivinen tila), joista poiketaan lähinnä vain kytkin- ja digitaalisovelluksissa. Käytännön kytkennöissä on yleensä vain yksi tasajännitelähde, josta toinen käyttöjännite saadaan esimerkiksi jännitteenjakajalla tai vakiovirtalähteellä (esim. virtapeili).

Pääosa transistorin virroista syntyy varauksenkuljettajien diffuusion takia. Jännite  $U_{BE}$  hylkii emitterillä olevia elektroneja kohti kantaa (B) ja kannalla olevia aukkoja kohti emitteriä. Koska emitteri on vahvasti seostettu, on elektronivirta suurempi kuin aukkovirta. Sekä elektronien että aukkojen muodostama virta saa aikaan kuvan mukaisen emitterivirran  $I_E$ . Koska transistorin kanta on hyvin ohut, ehtii emitterin emittoimista elektroneista vain pieni osa rekombinoitua. Suuri osa elektroneista injektoiduu jännitteen  $U_{CB}$  avittamana samantien kollektorille. **Kollektori** tavallaan

**kerää** kannan läpi diffusoituneet **elektronit**.



**Kuva 5.** Transistorin *pn*-liitokset. Kuvan transistori on *nnpn*-tyyppiä. Emitterillä oleva merkintä  $n^+$  tarkoittaa vahvaa seostusta eli paljon V ryhmän epäpuhtausatomeita.

Näin muodostuva kollektorivirta on ensi sijassa riippuvainen emitteriltä lähtevien elektronien määrästä. Tämä taas riippuu jännitteestä  $U_{BE}$ . **Jännite  $U_{CB}$  ei juurikaan vaikuta virran voimakkuuteen** — riittää, että se on positiivinen, jotta elektronit tajuavat mennä oikeaan suuntaan. Samalla periaatteella kuin diodin *pn*-liitoksessa, tulee kollektorivirta olemaan muotoa

$$I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad (1)$$

Pinta-alaan suoraan verrannollisena **saturaatiovirta**  $I_S$  toimii myös **skaalausparametrinä**. Mikroipiireissä on usein tarvetta skaalata transistorien virtoja määrättyllä suhteella (esim. kertoimella kaksi). Mainittakoon, että itseispuolijohteen varauksenkuljettajatiheys on voimakkaasti lämpötilan funktio. Hehheh,  $I_S$  on suoraan verrannollinen viime mainitun neliöön!

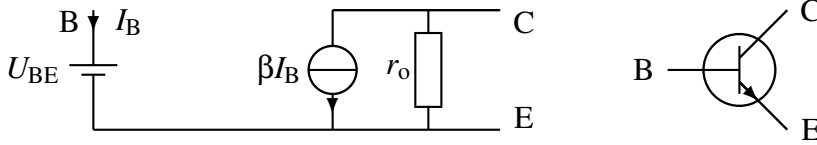
Kantavirta on suoraan verrannollinen kollektorivirtaan:

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_C \quad (2)$$

missä  $\beta$  on (yhteisemitterikytkennän) **virtavahvistus**.

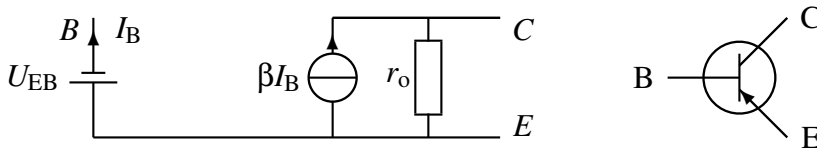
## 1.4 Toimintapisteen laskeminen

Tasavirtalaskuissa transistorin kanta-emitteridiodi voidaan mallintaa **tasajännitelähteellä** (kynnysjännite) ja virtavahvistus **virtaohjatulla virtalähteellä** (kuvat 6 ja 7). Vakiintuneen ja melko tarkan approksimaation mukaisesti *nnpn*-transistorilla  $U_{BE} \approx 0,7$  V ja vastaavasti *pnp*-transistorilla  $U_{EB} \approx 0,7$  V; alaindeksien järjestys kertoo jännitteen suunnan.



**Kuva 6.** Transistorin (*nnp*) sijaiskytkentä tasavirralla. Sisäinen vastus  $r_o$  esitellään myöhemmin; sitä käytetään harvoin tasavirtatarkastelussa, koska lasketut tulokset ovat parametrien epätarkkuuden takia joka tapauksessa likiarvoja.

Kaikki virrat ja jännitteet ovat *pnp*-transistorilla vastakkaisuuntaiset *nnp*-transistoriin verrattuna.



**Kuva 7.** *pnp*-transistorin tasavirtasijaiskytkentä.

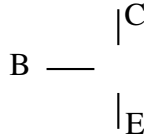
Jos  $U_{BE}$  haluttaisiin laskea tapauskohtaisesti tarkemmin, olisi transistorin "diodi-parametrit" tunnettava. Tarkemmissa transistorin piirimalleissa (esim. SPICE-malli) on kymmeniä parametrejä; tällaisia sijaiskytkentöjä pystytään käyttämään ainoastaan piirisuunnitteluohjelmissa. Tarkkoja malleja tarvitaan mm. mikropiirien suunnittelussa.

## 1.5 Transistori kytkimenä

Transistori toimii **kytkimenä** mm. logiikkapiireissä ja hakkuriteholähteissä. Kun transistori on sulkutilassa, on kytkin auki. Kyllästystilassa taas kytkin on kiinni. Se, onko tällöin kyseessä looginen ykkönen vai nolla, riippuu sovelluskytkennästä. Transistorikytkimen kuorma voi olla emitteri- tai kollektoripuolella. Luontevin paikka sille on kollektoripiirin kanssa sarjassa. Kuorma on siis se laite, jonka virtaa kytkin säätelee. Kytkimen ohjaus tuodaan transistorin kannan ja emitterin välille. Transistorikytkimen etuina ovat sähköinen ohjaus (rele ilman liikkuvia osia) ja se, että pienellä ohjausvirralla voidaan kytkeä paljon suurempaa virtaa.

Virran-, jännitteen- ja tehonkeston lisäksi transistorin kytkentänopeudella on kytkinsovelluksissa usein suuri merkitys. Kytkinkäyttöön suunnitellut transistorit ovat yleensä hyviä muissakin sovelluksissa.

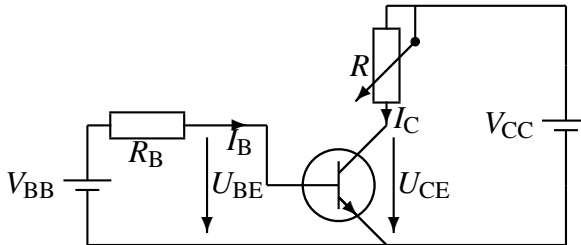
**Sulkuutilassa** (*cut off*) transistorin  $U_{BE}$  on pienempi kuin diodin kynnyksjännite 0,5 V. Molemmat  $pn$ -liitokset ovat estosuunnassa; virta ei kulje mihinkään suuntaan. Sijaiskytkentä on suorastaan piirisuunnittelijan unelma — epäideaalisuustakanaan ei juuri ole haittaa (kuva 8).



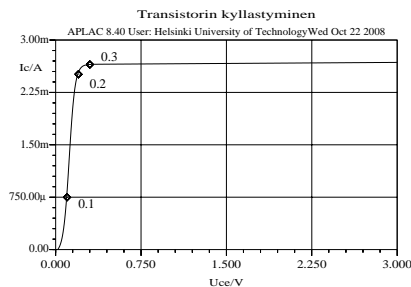
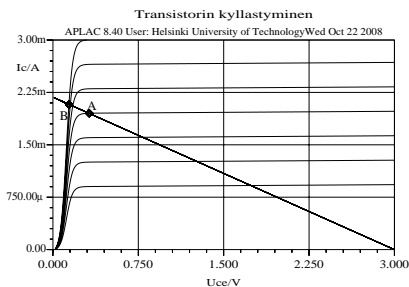
**Kuva 8.** Transistorin piirimalli sulkuutilassa — virta ei kulje mihinkään suuntaan.

**Kyllästystilassa** (*saturation*)  $U_{CE}$  on lähellä minimiarvoaan, eikä  $I_C$  enää juuri kasva vaikka kantavirtaa suurennettaisiin (vrt. kuva 9). Jännite riippuu transistorin parametrien lisäksi myös ulkopuolisista komponenteista, mutta on tyypillisesti suuruusluokaltaan 0,1...0,3 V (piste B kuvassa 10). Jo pisteiden A ja B välillä transistori toimii epälinearisesti. Kuormitussuoran yhtälö (vrt.  $y = kx + c$ ) seuraa Kirchhoffin jännitelaista:

$$-U_{CE} - R_C I_C + V_{CC} = 0 \Rightarrow I_C = -\frac{1}{R} U_{CE} + \frac{V_{CC}}{R} \quad (3)$$



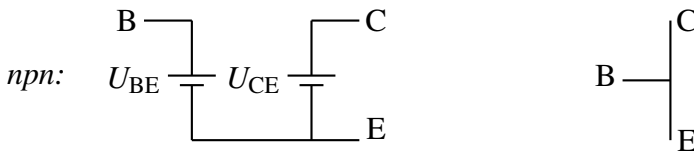
**Kuva 9.** Transistori kyllästyy liian suurilla  $R$ :n arvoilla, koska jännite  $U_{CE} = V_{CC} - R I_C$  ei pysty pienemään negatiiviseksi eikä edes aivan nollaan. Kyllästyminen näkyy  $\beta$ :n pienenemisenä, minkä takia myös  $I_C$  jää odotettua pienemmäksi.





**Kuva 10.** Toimintapiste on kantavirran  $I_B$  määräämässä kohdassa kuormitussuoralla. Vasemmalla olevassa kuvassa kantavirtaa muutetaan, jolloin toimintapiste siirtyy kuormitussuoraa pitkin. Oikealla kantavirta on vakio, mutta jännitettä  $U_{CE}$  säädetään esimerkiksi vastuksella  $R$ . Transistori kyllästyy, jos  $I_B$  menee liian suureksi tai  $U_{CE}$  liian pieneksi; säätövara loppuu, koska ominaiskäyrät romahtavat alas kohti origoa.

Kyllästytilassa transistorin likimääräiseksi **sijaiskytkennäksi** riittää kaksi tasajännitelähdettä:  $U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$  ja  $U_{CE} \approx 0,2 \text{ V}$ , jotka on emitteripuolelta kytketty yhteen. Jännitteet ovat *npn*-transistorilla positiiviset. Virtavahvistusta  $\beta$  **ei nyt** saa käyttää, koska sen arvo ei kyllästysalueella ole vakio. Tälläkin sijaiskytkennällä saavutettu tarkkuus kyllästytilanteessa on yllättävän hyvä. Tarkkuutta voi vielä parantaa kuvan 12 paloittain lineaarisen mallin avulla. Tarkempi menetelmä kyllästyneen transistorin käsittelyyn on seuraavan alaluvun Ebers–Moll-sijaiskytkentä. Aivan yksinkertaistettuna sijaiskytkentänä voidaan käyttää jopa oikosulkuja, koska molemmat *pn*-liitokset ovat kyllästytilassa päästösuuntaisia (kuva 11). Taulukkoon 1 on koottu yhteenveto transistorin toimintatiloista.



**Kuva 11.** Transistorin yksinkertaistetut sijaiskytkennät kyllästytilassa. Molemmat *pn*-liitokset johtavat niin hyvin kuin pystyvät.

Koska kyllästytilassa kollektorivirta kyllästyy suurimpaan arvoonsa  $I_{C\text{sat}}$ , pakotetaan transistorin virtavahvistus normaalia pienemmäksi:

$$\beta_{\text{forced}} = \frac{I_{C\text{sat}}}{I_B} < \beta \quad (4)$$

Kyllästytilan ”**pakotettu**” virtavahvistus  $\beta_{\text{forced}}$  määräytyy lähes yksinomaan transistorin ulkopuolisten komponenttien perusteella. Joskus merkitään lyhyesti  $\beta_F$ , minkä voi liian helposti sekoittaa tavalliseen *forward*-suunnan virtavahvistukseen.

**Taulukko 1.** Transistorin kolme toimintatila. Annetut jännitteet ovat tyypillisiä arvoja. Kyllästyksen rajana voidaan pitää noin 0,3 voltin jännitettä, mutta syvemmällä kyllästystilassa  $|U_{CE}|$  laskee vielä hieman tämän alapuolelle — ei kuitenkaan nollaan.  $|U_{BC}|$  muuttuu positiiviseksi jo, kun  $|U_{CE}|$  alittaa 0,7 V, mitä joskus myös pidetään lineaarisen toiminnan rajana. Akronyymit TTL ja ECL viittaavat samannimisiin logiikkapiiriperheisiin.

Toimintatila	BC-liitos	BE-liitos	$ U_{CE} $	$ U_{BE} $	$I_B$	$I_C$	Käyttökohteita
sulku-tila	estos.	estos.	ei määr.	$< 0,5 \text{ V}$	0	0	TTL, ECL, kytkin
aktiivinen tila	estos.	päästös.	$> 0,7 \text{ V}$	$\approx 0,7 \text{ V}$	$\frac{I_C}{\beta}$	$\beta I_B$	vahvistin, ECL
kyllästystilä	päästös.	päästös.	$\approx 0,2 \text{ V}$	$\geq 0,7 \text{ V}$	$> \frac{I_C}{\beta}$	$< \beta I_B$	TTL, kytkin

## 1.6 Bipolaaritransistorin yhtälöt ja ominaiskäyrät

Tutkitaan seuraavaksi transistorin toimintaa ja yhtälöitä hieman tarkemmin. Normaalin toiminnan kuvaamiseen riittää muutama yksinkertainen kaava:

$$i_C = I_S \left( e^{\frac{u_{BE}}{nU_T}} - 1 \right) \quad \Rightarrow \quad u_{BE} \approx nU_T \ln \frac{i_C}{I_S} \approx 0,7 \text{ V} \quad (5)$$

$$i_C = \beta i_B \quad i_E = i_C + i_B = (\beta + 1) i_B \quad (6)$$

$$i_C = \alpha i_E \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (8)$$

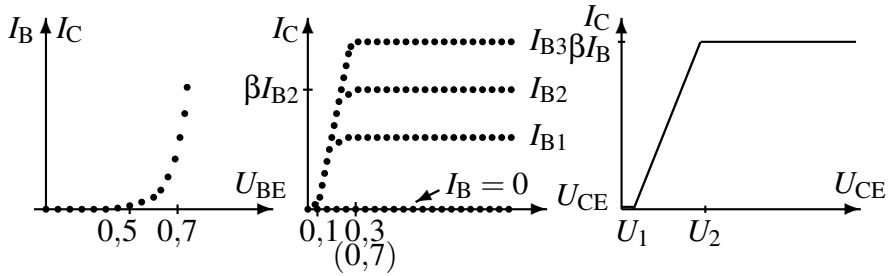
**Saturaatio- eli vuotovirran**  $I_S = A_E J_S$  tyypillinen suuruusluokka on noin  $10^{-15} \text{ A}$  (kerroin  $A_E$  on emitterin pinta-ala ja  $J_S$  saturaatiovirran tiheys). Saturaatiovirta riippuu voimakkaasti lämpötilasta; jos  $I_S = 10^{-24} \text{ A}$  lämpötilassa  $-55^\circ\text{C}$ , se voi nousta yli biljoona-kertaiseen arvoon  $I_S = 10^{-11} \text{ A}$  lämpötilassa  $+125^\circ\text{C}$ . **Emissio kertoimen** arvoksi voidaan yleensä olettaa  $n = 1$ ; erään lähteen mukaan  $n$ :n arvo olisi mikropiireissä pienehköillä virroilla tyypillisesti 1,001 ... 1,01.

Kerroin  $\alpha$  on nimeltään **yhteiskantakytkennän virtavahvistus**. Tavallisesti  $\alpha$  on välillä 0,950 ... 0,998 ja aina pienempi kuin yksi. **Yhteisemitterikytkennän virtavahvistus**  $\beta$  vaihtelee tällöin likimain välillä 20 ... 500; suuremmatkin  $\beta$ :n arvot ovat mahdollisia. Laskuissa voidaan silti usein käyttää nyrkkisääntöä  $\beta = 100$ .

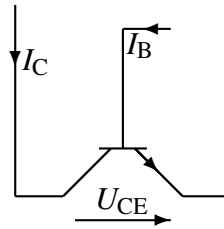
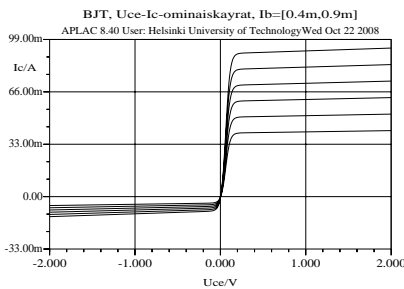
Monet käytännön piirit suunnitellaan niin, että  $\beta$ :n arvoa ei tarvitse tietää, kunhan se on riittävän suuri. Piensignaalitransistoreilla virtavahvistus 100 on helppo ylittää, mutta tehotransistoreilla vahvistus on keskimäärin pienempi kuin sata. Jos puhutaan pelkästä virtavahvistuksesta, tarkoitetaan yleensä nimenomaan kerrointa  $\beta$ . Hyvin suurilla kantavirran arvoilla transistori alkaa muuttua epälineaariseksi;  $i_C$  ei enää olekaan suoraan verrannollinen kantavirtaan vaan pikemminkin  $i_B$ :n neliöjuureen (tämä ei näy prujun käyristä eikä yhtälöistä).

Transistoripiirit pyritään siis yleensä suunnittelemaan siten, että ne eivät ole kovin herkkiä virtavahvistuksen vaihteluille. Samankin valmistussarjan transistoreilla  $\beta$  voi vaihdella melko laajoissa rajoissa, vaikka kerroin  $\alpha$  vaihtelee vain vähän. Lisäksi  $\beta$  on voimakkaasti lämpötilan funktio kasvaen lämmitessään (puolijohteiden ominaisvastus pienenee lämpötilan funktiona toisin kuin useimpien muiden aineiden). Vahvistuksen vaikutusta toimintapisteeseen voidaan vähentää valitsemalla sellainen biasointitapa, jossa on tasavirralla negatiivista takaisinkytkentää. **Biasointi** ("esijännittäminen") tarkoittaa toimintapisteen asettelua kytkemällä piiriin tasajännite, jolla päästään ominaiskäyrällä halutulle kohdalle. Aiemmin tässä luvussa käsitellyt piirit olivat esimerkkejä erilaisista biasointitavoista.

Valmistajan julkaisemassa transistorin datalehdessä esitetään useita erilaisia **ominaiskäyriä**. Kantavirran  $I_B$  käyrä kanta-emitterijännitteen  $U_{BE}$  funktiona on samanlainen kuin diodilla (kuva 12). Usein pystyakselilla on kuitenkin kollektorivirta  $I_C$ . Tällöin käyrän muoto on edelleen sama, mutta pystyakselin skaalaus tietysti muuttuu. Tehotransistoreilla  $U_{BE}$  voi suurilla kantavirran arvoilla kasvaa reilusti yli volttiin mm. sisäisten resistanssien takia.



**Kuva 12.** Transistorin kanta- ja kollektorivirtojen ominaiskäyrät; oikealla paikoittain lineaarinen approksimaatio; ylemmän kulmapisteen paikka  $U_2 \approx 0,3$  V vaihtelee transistorikohtaisesti ja kantavirrasta riippuen. Tehotransistorilla piste voi joskus sijaita vasta yli voltin kohdalla, kun taas piensignaali-transistorilla jopa vain 0,2 V on realistinen arvo. Alempi kulmapiste (n. 0,1 V) on myös merkityksellinen DC-kytkinkäytössä, jossa staattinen jännitehäviö pyritään minimoimaan.



**Kuva 13.** Negatiivisilla jännitteillä  $U_{CE} - I_C$ -käyrät ovat samanmuotoiset kuin positiivisella puolella, mutta virran itseisarvo on paljon pienempi (todellisuudessa ero on suurempi kuin kuvassa, jossa  $\alpha_R$  on selvyuden vuoksi hyvin suuri). Transistori toimii siis selvästi huonommin, jos kollektori ja emitteri vaihdetaan keskenään.  $U_{BE} - I_B$ -käyrä kulkee tällöinkin edelleen samalla tavalla kuin diodin ominaiskäyrä. Kuva on piirretty Ebers–Moll-sijaiskytkennän avulla seuraavin lukuarvoin:  $\alpha_F = 0,99$ ,  $\alpha_R = 0,9$ ,  $n = 1$ ,  $I_S = 1$  fA,  $U_A = 50$  V.

Laskuissa oletetaan usein, että kannan ja emitterin välille syntyy kantavirran biasoimana eli esijännittämänä  $pn$ -liitoksen vakiotasajännite  $U_{BE} = \pm 0,7$  V (plusmerkki  $nnp$ -transistorilla). Transistoria käytetään usein lämpötila-anturina, koska  $U_{BE}$  pienenee vakiovirralla lämpötilan funktiona n. 2 ... 3 mV/K. Tärkein syy tähän on voimakkaasti lämpötilasta riippuva saturaatiovirta.

Toinen tärkeä transistorin ominaiskäyrä on kollektorivirta kollektori-emitteri-jännitteen  $U_{CE}$  funktiona (kuvat 12 ja 13). Koska virran  $I_C$  suu-

ruus riippuu kantavirrasta, on  $I_B$  käyrien **parametrina**. Parametri tarkoittaa tässä muuttujaa, jonka arvo pidetään vakiona samalla, kun toisen muuttujan arvoa muutetaan. Käyrien väliin jäävillä  $I_B$ :n arvoilla voidaan  $I_C$  laskea lineaarisesti interpoloimalla. Ominaiskäyrän "vaakasuuralla" osalla transistori toimii lineaarisesti ( $\beta$  ei riipu virrasta eikä jännitteestä!). Kantaemitteripiiri on kuitenkin diodin ominaiskäyrän takia epälineaarinen, mikä on ehkä merkittävin signaalin vääristymistä aiheuttava seikka bipolaaritransistorilla — feteillä tilanne ei ole yhtään parempi.

Liian pienellä  $U_{CE}$ :n arvolla transistori **kyllästyy** — ohjattu lähde ei enää kykene tuottamaan riittävän suurta virtaa, mikä näkyy virtavahvistuksen  $\beta$  pienenemisenä. Transistorin  $I_C - U_{CE}$  -ominaiskäyrä voidaan esittää myös paloittain lineaarisena approksimaationa. Kuvan 12 oikeanpuoleinen käyrä pätee likimääräisesti kaikilla  $I_B$ :n arvoilla.