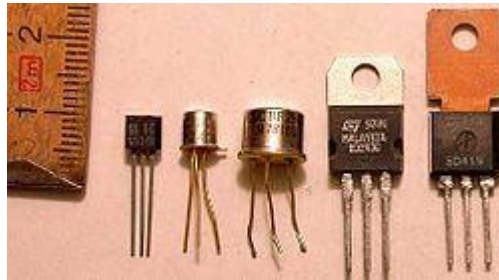


4. Transistori

Transistori on kolmeliitoksinen puolijohdekomponentti, joka voi toimia kytkimenä, vahvistimena tai muistin elementtinä. Transistorit jaetaan yleensä kahteen päätyyppiin: bipolaaritransistoreihin (liitostransistori, *bipolar junction transistor*, BJT) ja kanavatransistoreihin (FET). FET on toimintaperiaatteeltaan transkonduktanssivahvistin, eli sen läpi kulkeva virta on verrannollinen tulon jännitteeseen. Bipolaaritransistori puolestaan toimii virtavahvistimena. Oheiskomponenttien avulla transistoreista voi kuitenkin rakentaa myös muunlaisia vahvistimia ja kytkentöjä.



Kuva 26: Erilaisia transistoreja

Transistorin ja IC-piirien kaupallisen valmistuksen kehityksen suuntaa-antavia lukuarvoja eri vuosilta:

1951 Yksittäinen transistori

1960 Small-scale integration (SSI), < 100 transistoria samalla piirillä

1966 Medium-scale integration (MSI), < 1000 transistors

1969 Large-scale integration (LSI), < 10 000 transistors

1975 Very-large-scale integration (VLSI), > 10 000 transistors

2000 VLSI > 100 000 000 transistoria samalla piirillä

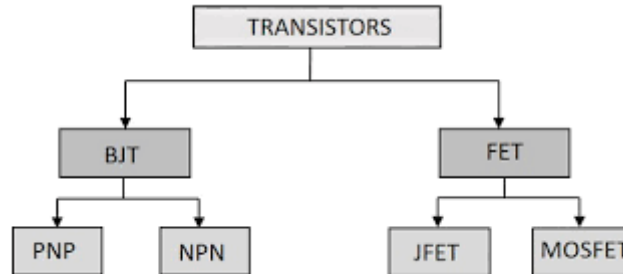
Tärkein transistorin ominaisuus on sen sähköinen ohjattavuus: Ulkopuolisella virralla/jännitteellä voidaan ohjata toisessa piirissä olevaa virtaa/jännitettä.

Transistorin tärkeimmät käyttökohteet lyhyesti ovat:

- kytkin
- vahvistin

4.1 Transistorityypit

Transistoreja on kahta päätyyppiä, bipolaaritransistori (BJT) ja kanavatransistori (FET):



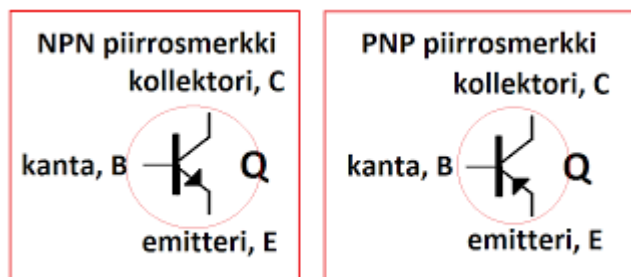
Kuva 27. Transistorityypit

Yleisnimitys transistori tarkoittaa *kolminapaista komponenttia*, jonka *yhdellä liittimellä voidaan ohjata toisissa näkyvää virtaa tai/ja jännitettä*. Transistorin toimintaa kuvaa myös transistorin nimen tausta: *Transfer Resistor*. Transistorin kahden navan välillä näkyvää resistanssia voidaan ohjata ulkoa käsin sähköisesti joko jännitteellä tai virralla. Tässä materiaalissa käydään NPN-transistori perusteellisemmin läpi.

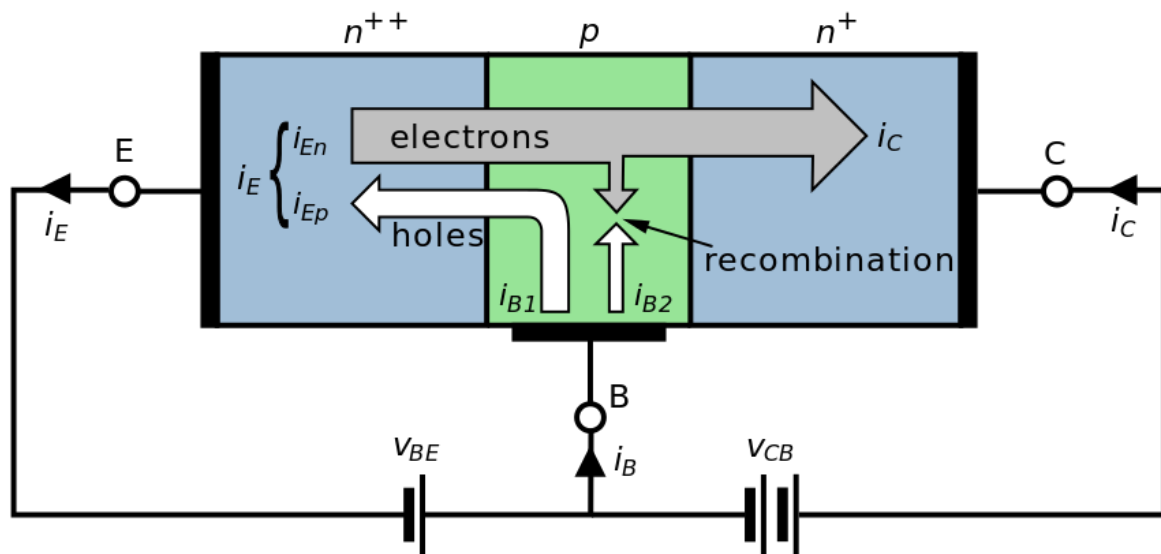
BJT:n ja FETin perusero on, että BJT:ssä *virralla ohjataan virtaa*. FETissä *jännitteellä ohjataan virtaa*.

4.2 Bipolaaritransistori

Bipolaaritransistorissa on periaatteessa kaksi puolijohdediodia vastakkain, jossa äärimmäiset osat ovat kollektori C ja emitteri E ja keskimäinen on kanta B.



Kuva 28: NPN- ja PNP-transistorit. Nuoli osoittaa kollektorin ja emitterin välillä kulkevan virran suunnan.



Kuva 29: NPN-transistorin periaatekuva. Kanta-emitteriliitos on päästösuuntaan biasoitu ja kanta-kollektoriliitos estosuuntaan.

Kollektori ja kanta kytketään aina samanmerkkiseen jännitteeseen. Koska transistorissa on aina kaksi PN-liitosta vastakkain, toinen liitoskohta on estosuunnassa. Emitterin (E) ja kannan (B) välillä on tavallisesti päästösuuntainen jännite, kun transistoria käytetään vahvistimena. Sähkövirran kuljettajat voivat siirtyä helposti kannan ja emitterin välisen PN-liitoksen yli, kun niiden välillä on päästösuuntainen jännite (PN-liitos on itseasiassa piidiodi, jolle kynnysjännite on 0.7 V).

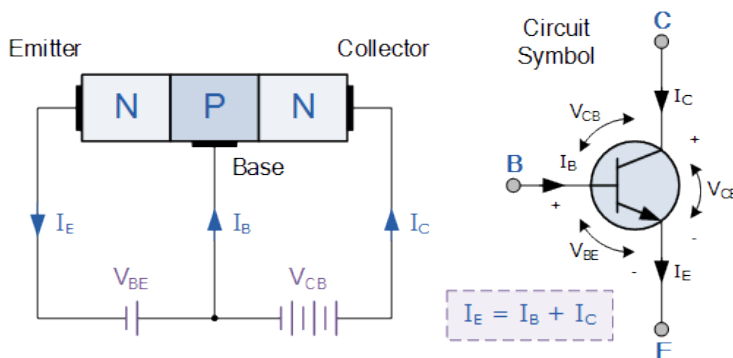
NPN-tyypin bipolaaritransistorissa vahvistettava virta viedään kannalle, jolloin emitteriltä virtaa elektroneja kannan alueelle. Kannalle joutuneista elektroneista suurin osa joutuu kuitenkin kollektorilla olevan voimakkaan positiivisen sähkökentän imaisemiksi, jolloin kollektorilta emitterille on suurempi virta kuin kannalta emitterille. Tämä ilmiö mahdollistaa vahvistuksen. NPN-transistori tulee tyypillisesti johtavaksi, kun kanta-emitterijännite on välillä 0,5–0,7 V ja samanaikaisesti kollektori-emitterijännite on vähintään 0,1 V.

Ei tässä mennä nyt kovin syvälle tuohon elektronien ja aukkojen vaelteluun transistorissa. Kannattaa kuitenkin muistaa, että siinä on periaatteessa kaksi diodia laitettu yhteen. Siten kaikki diodin yhteydessä opitut jutut toimivat transistorillakin.

Kantavirran (I_B) muutokset vaikuttavat tietyllä kantavirran alueella lineaarisesti kollektorivirtaan (I_C). Transistorin käyttö vahvistimena perustu siihen, että pieni kantavirran muutos aiheuttaa suuren muutoksen kollektorivirtaan. **Pienellä kantavirralla siis ohjataan suurta kollektorivirtaa.** Pelkässä kollektorissa ei kulje sähkövirtaa pientä vuotovirtaa lukuun ottamatta, mutta pienen kantavirran avulla vähennetään transistorin resistanssia kollektoripiirissä. **Transistorin toimintaa voidaan verrata vastukseen, jonka resistanssi voidaan muuttaa pienellä ohjausvirralla**

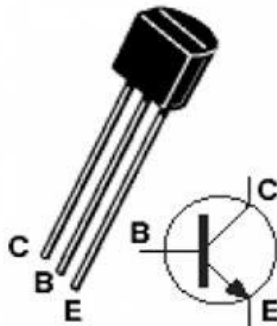
NPN-transistorin toiminta (ns. yhteisemitterikytkennässä) voidaan summata seuraavasti :

- Transistorin johtaessa siinä kulkee pieni kantavirta (I_B) ja iso kollektorivirta (I_C).
- Transistori vahvistaa virtaa. Virtojen I_B :n ja I_C :n suhde, virtavahvistus $\beta = I_C / I_B$ on vakio.
- Kirchoffin virtalain mukaisesti on voimassa $I_E = I_B + I_C$
- I_B on paljon pienempi kuin I_E ja I_C , joten monissa tapauksissa voidaan olettaa että $I_E = I_C$
- Virta pääsee kulkemaan vain, jos kannan (B) ja emitterin (E) välillä oleva jännite (U_{BE}) ylittää piin kynnysjännitteen 0.7 V.
- Kyllästystila: Kun I_C on suurimmillaan, kollektorin (C) ja emitterin välillä virta kulkee esteettä, toisin sanoen resistanssi tällä välillä on nolla (kollektori-emitterijännite $U_{CE}=0$). Tilanne siis vastaa tilannetta, jossa kollektorin ja emitterin välillä on pelkkä johdin (oikosulku).
- Sulkutila: Kun virta I_C on nolla, kollektorin ja emitterin välinen resistanssi on ääretön. Tässä tilanteessa kollektorin ja emitterin välillä on katkos eikä virta kulje ollenkaan (U_{CE} on sama kuin käyttöjännite)
- Näiden kahden ääripään välillä I_C :n suuruutta ja siten kollektorin ja emitterin välistä resistanssia, säädellään kantavirralla I_B .
- Transistorin toimintapiste Q on edellämainittujen kahden ääripään (kyllästystila/sulkutila) puolivälissä, jolloin U_{CE} on puolet käyttöjännitteestä.



Kuva 30: NPN-transistorin virrat ja jännitteet

Seuraavassa kuvassa on tyypillinen bipolaaritransistori. Siinä on kolme jalkaa. Yleensä ne ovat tasaisen sivun suunnasta katsottuna järjestyksessä C, B, E, mutta jalkajärjestys pitää aina tarkistaa transistorin datalehdessä.



Kuva 31: Tyypillisen bipolaaritransistorin jalkajärjestys.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

Toinen tyypillinen bipolaaritransistorityyppi näyttää vasemman kuvan kaltaiselta. Tämän tyyppisissä transistoreissa on emitterin vieressä pieni nyppylä. Oikealla kanavatransistori.



Kuva 32: Bipolaaritransistori ja kanavatransistori

Labratyössä ”Transistorivahvistin” käytetään BC547C-tyyppistä NPN-transistoria. Sen ominaisuudet löytyvät esim. tästä datalehdestä:
<http://www.farnell.com/datasheets/59764.pdf>

Tässä vaiheessa sieltä kannattaa bongata jalkojen järjestys ja virtavahvistuskerroin h_{fe} , joka on välillä 420 – 800 (transistoriyksilöstä riippuen). Siis tämä transistori vahvistaa kantavirran jopa 800-kertaiseksi !

4.3 Transistorin virrat ja jännitteet

Kuvassa 33 nähdään NPN-transistori ns. yhteisemitterikytkennässä. Kuvasta on pääteltävissä, että emitterille menevä virta I_E on summa haaravirroista I_B ja I_C (KOFF1)

$$I_E = I_B + I_C$$

Kantavirta on hyvin pieni verrattuna emitteri- ja kollektorivirtoihin. Virtojen suhteet ilmaistaan vahvistuskertoimilla α ja β .

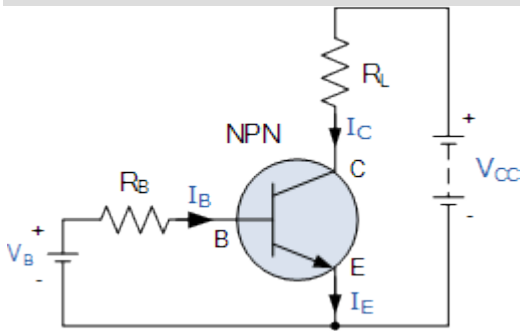
$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Esijännitetyn eli biasoidun transistorin navoissa vaikuttaa kolme jännitettä suhteessa maahan: Emitterijännite V_E , kollektorijännite V_C ja kantajännite V_B . Kollektorijännite on käyttöjännite (kuvassa 33 V_{CC}) vähennettynä kuorman R_L jännitteellä (*MUISTA: lähdejännitteet = jännitehäviöt*).

¹ Käytän tässä materiaalissa jännitteelle V-kirjainta enkä U:ta, johtuen siitä että kuvamateriaalissa on käytössä lähes pelkästään V.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori



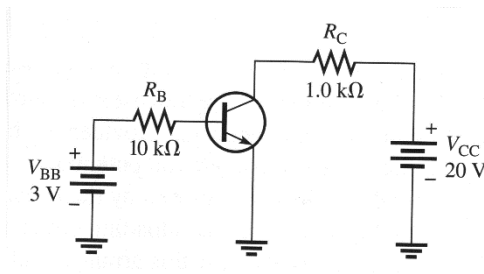
Kuva 33: Yhteisemitterikytketty NPN-transistori

$$V_C = V_{CC} - I_C R_L$$

Emitterijännite V_E on nolla, koska emitteri on kytketty maahan.

Nyt kannattaa hiffata, että kanta-emitteriliitos on itseasiassa diodi. Siten kantajännite V_B on kanta-emitteriliitoksen kynnyksijännite 0.7V.

Esimerkki: Laske virrat I_B , I_C ja I_E sekä jännitteet V_B ja V_C kun virtavahvistus $\beta=50$.



- **V_B :** Emitteri on maapotentiaalissa, joten $V_B=0.7V$.
- **I_B :** Lähdejännite V_{BB} kuluu vastuksessa R_B sekä kanta-emitteriliitoksessa. Edellä todettiin, että $V_B=0.7V$. Siten vastukselle R_B jää $3V - 0.7V = 2.3V$. Virta saadaan Ohmin laista:

$$I_B = \frac{2.3V}{10k\Omega} = 230\mu A$$

- **I_C :** Virtavahvistus tunnetaan, joten

$$I_C = \beta I_B = 50 * 230\mu A = 11.5mA$$

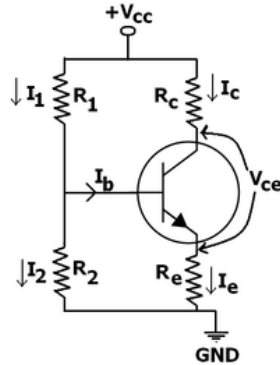
- **I_E :** KOFF1 -> $I_E = I_C + I_B = 11.5mA + 0.23mA = 11.7mA$

V_C : Lähdejännite V_{CC} kuluu vastuksessa R_C ja kollektori-emitteri-liitoksessa. I_C oli laskettu jo edellä, joten

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 20V - 11.5mA \cdot 1k\Omega = 8.5V$$

4.4 Transistorin biasointi jännitteenjakokytkennällä

Transistorin tasajännitteiden asetus eli biasointi tehdään yleensä yhdellä tasajännitelähteellä (eikä kahdella, kuten edellä), kuva 34.



Kuva 34: Biasointi jännitteenjaolla

Vastukset R_1 ja R_2 jakavat jännitteen V_{CC} siten, että kantavirraksi saadaan haluttu arvo. Muistetaan tässä välissä, että mitä transistori tekee: Pienellä kantavirralla ohjataan kollektorivirtaa. Siksi pitää olla joku konsti, jonka avulla säädetään kannalle menevää virtaa, ja helpoin tapa on säätää jännitettä noiden vastusten avulla.

Transistorin tuloresistanssi R_{IN} on se resistanssi, jonka kanta ”näkee”. Ohmin lain mukaan

$$R_{IN} = \frac{V_B}{I_B}$$

Jätetään kannan ja emitterin välinen kynnyisjännite ($V_{BE} = 0.7V$) huomiotta. Silloin

$$V_B \cong V_E = I_E R_E$$

Lisäksi tiedetään, että kantavirta on hyvin pieni, joten I_E on likimain sama kuin I_C .

$$I_E \cong \beta I_B$$

Sijoitetaan V_B :n lausekkeeseen:

$$V_B \cong \beta I_B R_E$$

Sijoitetaan R_{IN} :in lausekkeeseen:

$$R_{IN} = \frac{V_B}{I_B} \cong \frac{\beta I_B R_E}{I_B} = \beta R_E$$

Toisin sanoen tuloresistanssi on emitterin resistanssi kertaa virtavahvistus. Menemättä syvemmälle kaavan johtoon, saadaan kantajännitteelle kaava, joka pätee silloin kun R_{IN} on vähintään 10 kertaa suurempi kuin R_2 .

$$V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

Emitterijännite $V_E = V_B - 0.7 V$

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

Esimerkki: Määritä V_B , V_E , V_C , V_{CE} , I_B , I_E ja I_C .

Tuloresistanssi R_{IN} on

$$R_{IN} = \beta R_E = 100 \cdot 1k\Omega = 100k\Omega$$

Kantajännite

$$V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \frac{10k\Omega}{32k\Omega} 30V = 9.38V$$

Emitterijännite $V_E = V_B - 0.7V = 9.38V - 0.7V = 8.68V$

Nyt voidaan herra Ohmin lakia käyttäen laskea emitterivirta.

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{8.68V}{1.0k\Omega} = 8.68mA = I_C$$

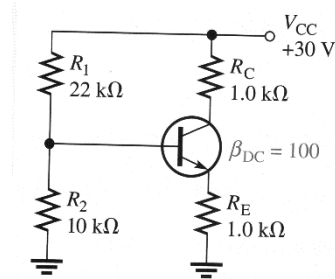
$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 86.8\mu A$$

Seuraavaksi kollektorijännite V_C .

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 30V - (8.68mA)(1.0k\Omega) = 30V - 9.68V = 21.3V$$

Kollektorin ja emitterin välillä oleva jännite V_{CE} on käyttöjännitteen ja V_C :n erotus:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 21.3V - 8.68V = 12.6V$$



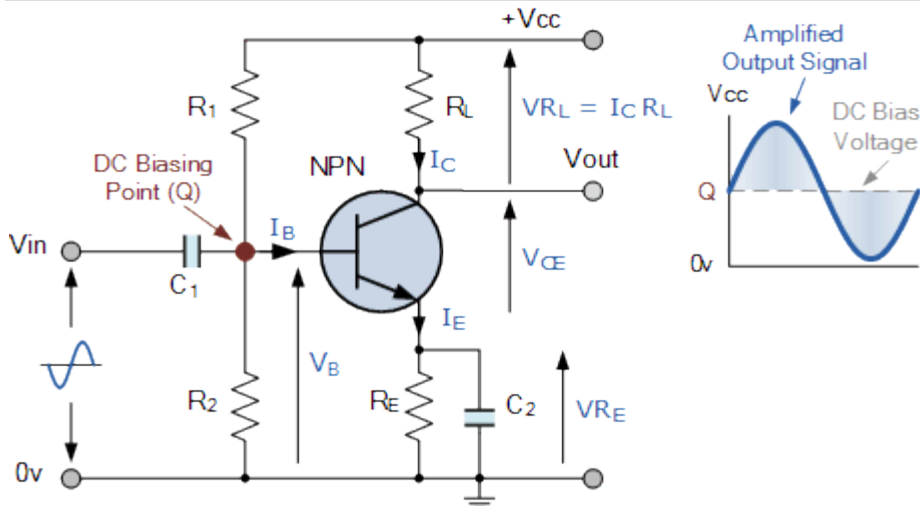
4.6 Transistorivahvistin

4.6.1 Ominaiskäyrä

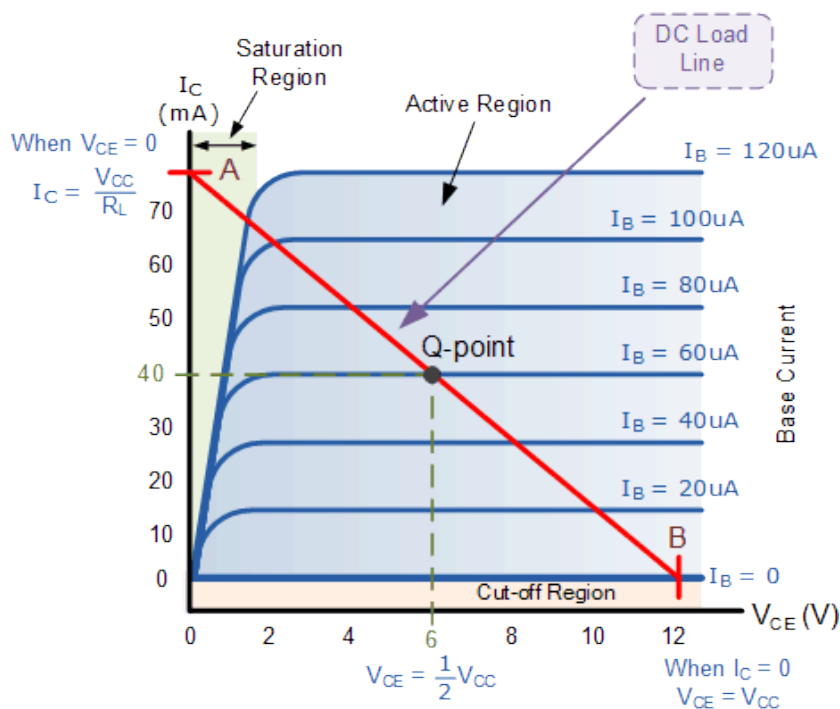
Kuvassa 35 on esitetty transistorivahvistinkytkentä. Se vahvistaa tulojännitteen (V_{in}) amplitudia lähtöjännitteeksi (V_{out}). Tarkastellaan ensin vahvistimen toimintaa eri kollektori-emitterijännitteen V_{CE} arvoilla.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori



Kuva 35: Yhteisemitterikytketty transistorivahvistin



Kuva 36 : Transistorivahvistimen ominaiskäyrät

Kuvassa 36 on esitetty, miten kollektorivirta I_C käyttäytyy kollektorin ja emitterin välisen jännitteen V_{CE} funktiona eri I_B :n arvoilla. Kuvasta nähdään joukko käyriä, joissa on nähtävissä alussa jyrkästi nouseva osa ja sen jälkeen lähes vakiona pysyvä osa.

4.6.2 Kyllästystila

Alun jyrkkä nousu johtuu siitä, että kanta-kollektori- ja kanta-emitteridiodien kynnysjännitteitä ei ole ylitetty. Transistori on oikosulussa. Virta pääsee kollektorilta emitterille esteettä (voidaan ajatella että vedetään kollektori ja emitteri johtimella yhteen). Kollektorivirta kasvaa ohmin lain

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

mukaisesti kuvan 35 merkinnöillä sarjassa olevien vastusten R_L ja R_E aiheuttaman jännitehäviön johdosta:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L + R_E}$$

Virran nopea kasvu loppuu, kun V_{BE} on noin 0.7V ja V_{CE} noin 0.3V – 0.7V. Transistori muuttuu johtavaksi. Kyllästystilan jännite riippuu jonkin verran itse transistorista ja sen ympärillä olevista komponenteista.

4.6.3 Lineaarinen toiminta-alue ja sulkutila

Kun jännitettä kasvatetaan, ei virta enää juurikaan muutu. Tämä on sama ilmiö, mikä havaittiin diodin jännitteen mittauksessa. Diodin jännite ei muuttunut miksikään, vaikka jännitettä nostettiin. Tätä käyrän osaa sanotaan **lineaariseksi toiminta-alueeksi**.

V_{CE} ei voi olla suurempi kuin käyttöjännite V_{CC} . Jos V_{CE} on riittävän suuri, saavutetaan läpilyönti, jolloin virta taas kasvaa nopeasti ja transistori hajoaa (ei näy tässä kuvassa). Jännitteen suuruus, jolla läpilyönti tapahtuu, riippuu transistorista ja joka löytyy datalehdeltä. Kuvassa 37 on labroissa käytettävän transistorin maksimiarvot.

Kun $V_{CE}=V_{CC}$, on transistori **sulkutilassa**. Kollektorivirta on nolla eikä transistori päästä virtaa lävitseen.

Absolute Maximum Ratings*

TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	45	V
V_{CES}	Collector-Base Voltage	50	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	6.0	V
I_C	Collector Current - Continuous	500	mA
T_J, T_{stg}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +150	°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Kuva 37: BC547-transistorisarjan maksimiarvot

Takaisin tutkimaan kuvaa 36. Lineaarisella toiminta-alueella käyrät ovat lähes vaakasuoria. Toisin sanoen V_{CE} :n muutoksilla ei ole juurikaan vaikutusta kollektorivirtaan I_C . Kantavirran muutos sen sijaan muuttaa kollektorivirtaa.

Esimerkki: Kuvasta 36 voidaan lukea, että kun $I_B=20\ \mu A$, on I_C noin 12 mA – 15 mA. Transistorin virtavahvistus on siten $\beta=600 - 750$.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

4.6.4 Kuormitussuora ja toimintapiste

Lineaarisella käyrän osalla I_C :n ja V_{CE} :n välillä on yhteys

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L}$$

Tätä kaavaa sanotaan transistorin **kuormitussuoraksi**. Transistori toimii aina pitkin tätä suoraa. Jos asetetaan kollektorivirta johonkin arvoon, tiedetään heti, mikä on vastaava kollektori-emitterijännite ja päinvastoin. Kuormitussuoran sekä vaaka- ja pystyakselien leikkauspisteet:

- Kun $V_{CE}=0$: $I_C = \frac{V_{CC}-0}{R_L} \Rightarrow I_{C(max)} = \frac{V_{CC}}{R_L}$
- Kun $I_C=0$: $0 = \frac{V_{CC}-V_{CE}}{R_L} \Rightarrow V_{CC} = V_{CE}$

Transistori **toimintapiste** (Q-point, Quiescent point) valitaan yleensä toimintasuoran puolivälistä, jolloin $V_{CE}=0.5 V_{CC}$. Transistorin kantavirta on se I_B :n arvo, joka osuu toimintasuoralle. Esimerkiksi kuvassa 36 $I_B=60 \mu A$.

Suurin mahdollinen kollektorivirran arvo on $I_{C(max)}$. Kollektorivirta ei kasva tätä arvoa suuremmaksi, vaikka kantavirtaa nostetaan kuinka paljon.

Esimerkki: Kuvan 35 mukaisessa kytkennässä käyttöjännite on 12 V ja kuorman resistanssi 1 k Ω .

- Määritä toimintapiste
- Laske kantavirta toimintapisteessä, kun virtavahvistus on 200.
- Mikä on suurin mahdollinen kollektorivirta ?

- Valitaan $V_{CE} = 0.5V_{CC} = 0.5 \cdot 12V = 6V$.
Kuormitussuoran yhtälöstä

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L} = \frac{V_{CC} - 0.5V_{CC}}{R_L} = \frac{V_{CC}}{2R_L} = \frac{12V}{2 \cdot 1000 \Omega} = 6mA$$

b)

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{6mA}{200} = 30\mu A$$

- $I_{C(max)} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{12V}{1000\Omega} = 12mA$

Transistorivahvistimen yksityiskohtainen mitoitus tehdään labratyönä.

Vielä sananen kytkennän 35 kondensaattoreista. Kondensaattorihan oli komponentti, joka ei päästä tasavirtaa läpi ja johtaa sitä paremmin, mitä isompi taajuus. Tässä kytkennässä kondensaattori C_1

estää tulosignaalin mahdollisen tasajännitekomponentin pääsyn vahvistimelle. Tavoitteena on siis vahvistaa nollan suhteen symmetristä vaihtojännitettä.

Kondensaattorilla C_2 ei ole vaikutusta tasajännitteisiin (C_2 :n resistanssi on ääretön), mutta johtaa suuret taajuudet emitteriltä maahan (C_2 :n resistanssi lähellä nollaa, jolloin kaikki virta kulkee sen eikä vastuksen kautta). Tarkalleen ottaen emitteripiirissä on pieni sisäinen resistanssi, noin R_e , luokkaa muutama ohmi. Pienillä taajuuksilla emitteripiirin resistanssi on $R_E + R_e$. Suurilla taajuuksilla kondensaattori oikosulkee R_E :n ja virran kulkua rajoittaa vain sisäresistanssi R_e .

4.6.5 Vahvistimen AC-jännitevahvistus

Kytetään vahvistin vaihtojännitteeseen ja tutkitaan, mitä tapahtuu. Tulojännite V_{in} syötetään kannalle ja lähtöjännite V_{out} mitataan kollektorilta. Kollektorivirran I_C muutokset aiheuttavat muutoksen kollektorijännitteeseen V_{CE} kuormituspuoran mukaisesti.

Vahvistimen AC-jännitevahvistus A_v ² saadaan kaavalla

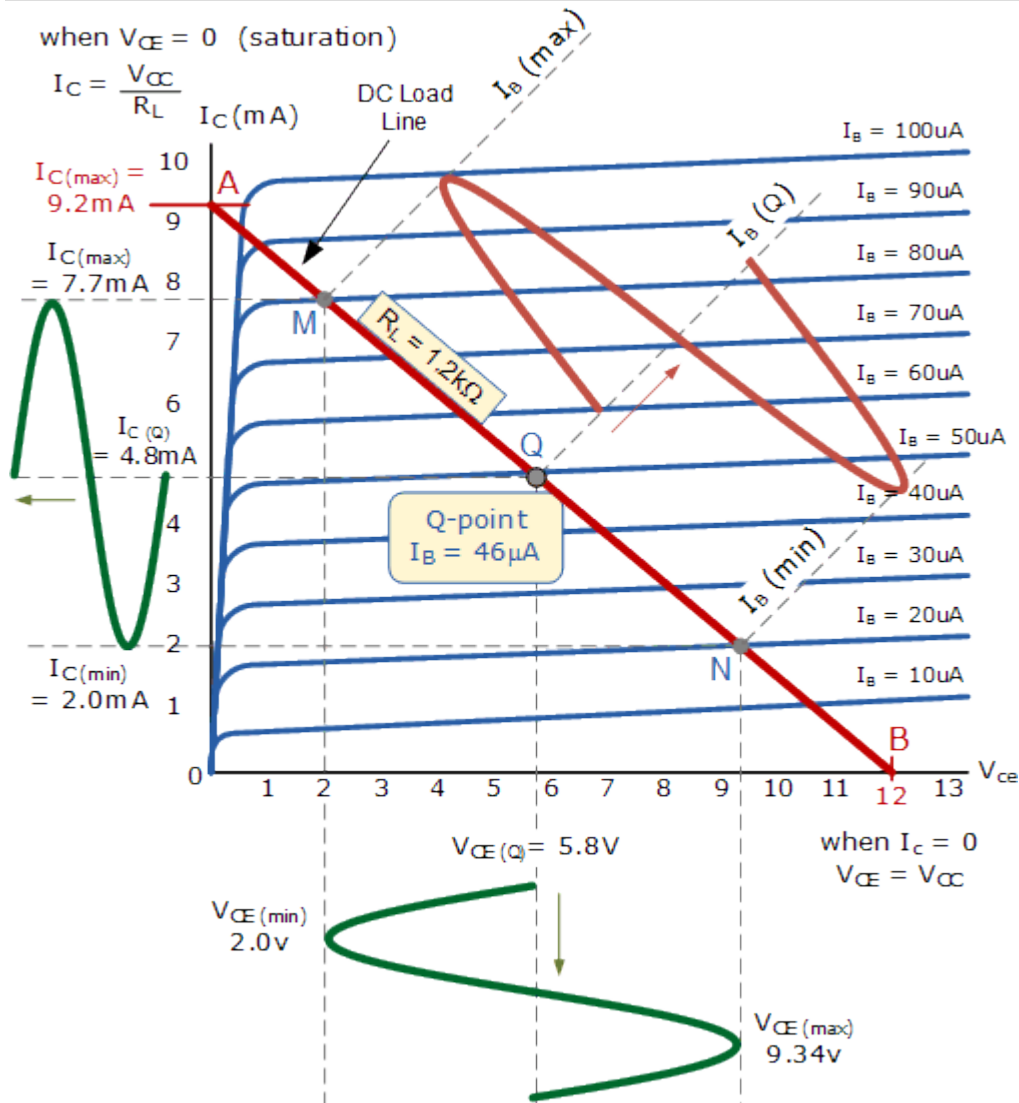
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_C R_L}{I_E R_E} \simeq \frac{R_L}{R_E}$$

Tulo- ja lähtöjännitteet ovat vastakkaisissa vaiheissa.

² Vaihtosähkösuureiden alaindeksit esitetään yleensä pienillä kirjaimilla, tasasähkösuureiden isoilla

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori



Kuva 38: Transistorivahvistimen vaihtojännitevahvistus ja ominaiskäyrät

Edellinen kuvaaja voi näyttää hyvin pelottavalta. Se on kuitenkin varsin havainnollinen. Ruskea signaali kuvaa kannalle tulevaa virtaa. Vahvistimen mitoituksen ansiosta virran nollataso $I_B(Q)=46\mu A$ osuu toimintapisteeseen. Ominaiskäyrästä nähdään, että vahvistin vahvistaa virran arvoon $I_C(Q)=4.6mA$ (siis virtavahvistus on 100). Edelleen ominaiskäyrästä voidaan lukea, että tämä vastaa lähtöjännitteessä $V_{CE(Q)}$ arvo a 5.8 V. Samalla tavoin vaihtovirran kaikki muutkin arvot muuntuvat ominaiskäyrän määräämällä tavalla.

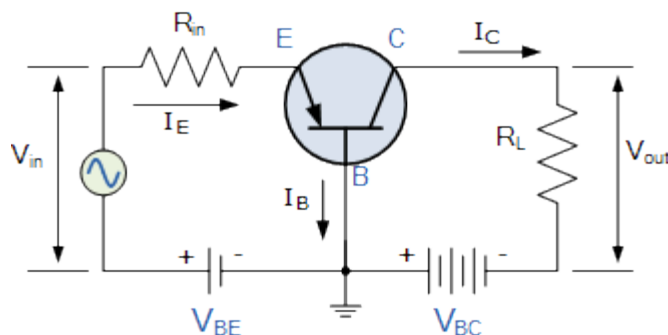
4.7 Muita transistorin vahvistinkytkentöjä

Transistorivahvistimen kolme peruskytkentää ovat:

- Yhteiskantakytkentä (jännitevahvistus, ei virtavahvistusta)
- Yhteisemitterikytkentä (sekä jännite- että virtavahvistus, käsitelty edellä)
- Yhteiskollektorikytkentä (virtavahvistus, ei jännitevahvistusta)

4.7.1 Yhteiskantakytkentä

Kanta (B) on yhteinen sekä tulo- että lähtösignaalille. Tulosignaali V_{in} tulee emitterin (E) ja kannan (B) välille. Lähtösignaali V_{out} on kollektorin (C) ja kannan väliltä. Emitterille menevä virta on melko suuri, koska se on summa kollektori- ja kantavirroista. Siten (seurauksena KOFF1:stä) kollektorilta saatava virta on pienempi kuin sinne syötetty. Yhteiskantakytkennän virtavahvistus onkin siten aina ≤ 1 .



Kuva 39: Yhteiskantakytketty transistorivahvistin

Tulo ja lähtö ovat samassa vaiheessa. Kytkentä toimii myös ”resistanssivahvistimena”, eli tuloimpedanssin R_{in} ja kuorman impedanssin R_L suhde on suuri. Jännitevahvistus saadaan kaavasta:

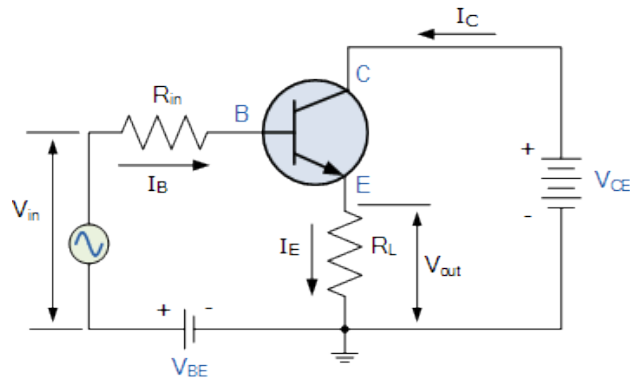
$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_C R_L}{I_E R_{IN}}$$

Huom: Impedanssi (merkitään yleensä Z , näissä kuvissa R) on vaihtovirtavastus. Siis miten komponentti vastustaa vaihtovirtaa. Yksikkö edelleen ohmi. Fyysisesti käytetään samoja vastuksia kuin tasavirroillakin.

Yhteiskantakytkentää käytetään harvoin, lähinnä mikrofonesivahvistimissa ja RF-vahvistimissa kytkennän erinomaisen korkeiden taajuuksien toistokyvyn vuoksi.

4.4.3 Yhteiskollektorikytkentä

Tulosignaali kytketään suoraan kantaan, ulostulo otetaan kuormavastuksen R_L yli emitterin ja maan väliltä. Tällaista kytkentää sanotaan *jänniteseuraajaksi* tai *emitteriseuraajaksi*. Käytetään impedanssisovituksissa (impedance matching), koska sillä on hyvin suuri tuloimpedanssi (satojatuhansia ohmeja) ja pieni lähtöimpedanssi.



Kuva 40: Yhteiskollektorikytketty transistorivahvistin

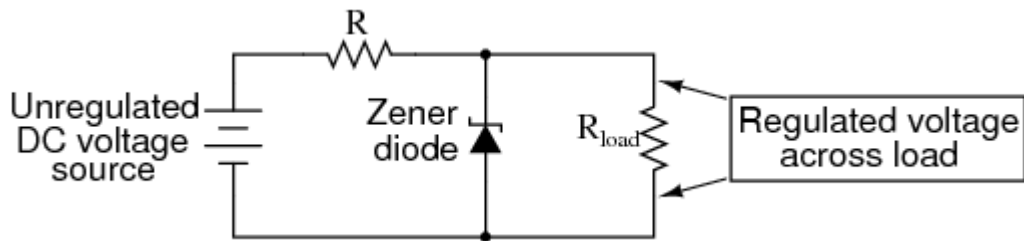
Kytkenän virtavahvistus on suunnilleen sama kuin transistorin virtavahvistus. Kaavat:

$$I_E = I_C + I_B$$
$$A_i = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_C + I_B}{I_B}$$
$$A_i = \frac{I_C}{I_B} + 1$$
$$A_i = \beta + 1$$

Kuva 41: Yhteiskollektorikytketyn vahvistimen virrat ja vahvistuskertoimet.

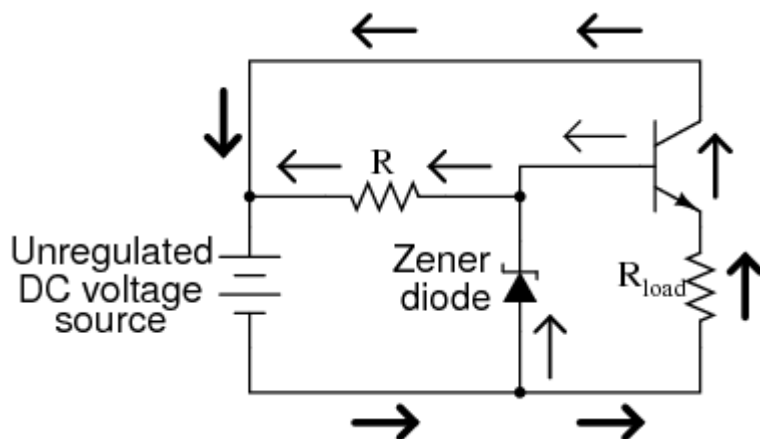
Vahvistinkytkentä on *ei-kääntävä*. Tulo ja lähtö ovat samassa vaiheessa. Jännitevahvistus on aina alle 1:n. Kuormavastukselle menee sekä kannan että kollektorin virrat, joten kytkennän virtavahvistus on suuri. Siis saadaan iso virtavahvistus ilman jännitevahvistusta.

Kytkeä käytetään jänniteregulointiin, siis tasavirtalähteissä, joissa virransyötössä on epätasaisuutta. Tämä pystytään tekemään periaatteessa myös Zener-diodilla, kuten viime kerralla opittiin, mutta Zenerillä ei tietenkään saada virtavahvistusta. Toisaalta Zener voi joutua käsittelemään hyvin suuria virtoja.



Kuva 42: Zener-diodi jännitereguloinnissa

Kuvan 42 kytkennällä saadaan lähtösignaalille virtavahvistus ja lisäksi regulaattorina toimivan Zener-diodin tarvitsee käsitellä vain transistorin kannalta (B) tulevat virrat.



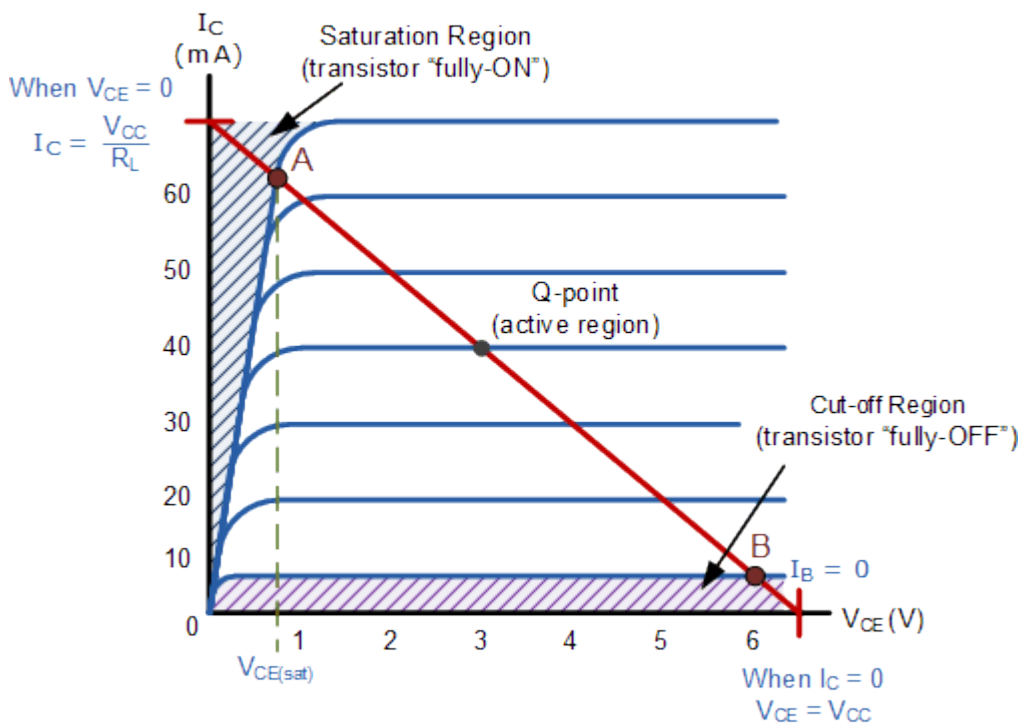
Kuva 43: Yhteiskollektorikytketty jänniteregulaattori.

Seuraavaan taulukkoon on vielä koottu eri kytkentöjen ominaisuudet.

Characteristic	Common Base	Common Emitter	Common Collector
Input Impedance	Low	Medium	High
Output Impedance	Very High	High	Low
Phase Angle	0°	180°	0°
Voltage Gain	High	Medium	Low
Current Gain	Low	Medium	High
Power Gain	Low	Very High	Medium

4.8 Bipolaaritransistori kytkimenä

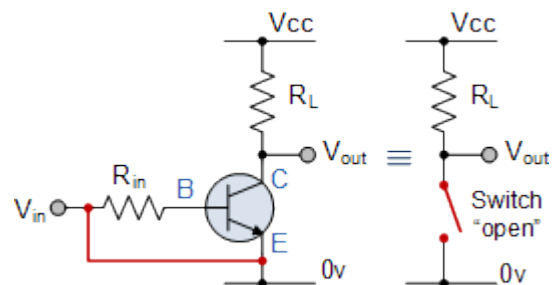
Transistorin toimiessa vahvistimena se toimii ominaiskäyränsä lineaarisella osalla. Kytkinkäytössä transistori on joko kyllästystilassa tai sulkuatilassa.



Kuva 44. Transistorin käyttö kytkimenä ominaiskäyristä tarkasteltuna

4.8.1 Sulku tila (Cut-off region) = "Kytin auki"

Sulku tilassa transistori ei johda virtaa. Kantavirta on nolla, jolloin kollektorivirtakin on lähes nolla. Tarkalleen ottaen tässäkin tilassa kulkee pienen pieni, lähinnä varauksenkuljettajien lämpöliikkeestä johtuva vuotovirta (datalehdessä, kuva 45). Siksi kuvassa $I_B=0$ -käyrä ei kulje vaaka-akselia pitkin.



Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

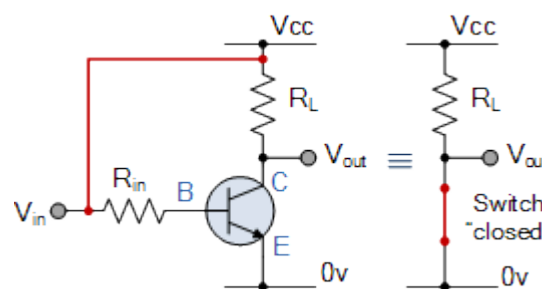
OFF CHARACTERISTICS

$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C = 1.0 \text{ mA}, I_B = 0$	45		V
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_E = 0$	50		V
$V_{(BR)CES}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_E = 0$	50		V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_C = 0$	6.0		V
I_{CBO}	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 30 \text{ V}, I_E = 0$ $V_{CB} = 30 \text{ V}, I_E = 0, T_A = +150 \text{ }^\circ\text{C}$		15 5.0	nA μA

Kuva 45: BC547-sarjan transistorien sulkuutilan parametrit.

4.8.2 Kyllästystila ("Kytkin kiinni")

Kyllästystilassa kollektorivirta I_C on suurimmillaan ja V_{CE} sekä kollektorin ja emitterin välinen resistanssi ovat ideaalitalanteessa nollia. Käytännössä tässäkin tapauksessa kollektorin ja emitterin välillä on pieni resistanssi, joka aiheuttaa pienen jännitteen niiden välille.



Datalehdessä on annettu kyllästystilan parametreja.

ON CHARACTERISTICS

h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$	547 547A 547B 547C	110 110 200 420	800 220 450 800	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 10 \text{ mA}, I_B = 0.5 \text{ mA}$ $I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$			0.25 0.60	V V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 10 \text{ mA}$		0.58	0.70 0.77	V V

SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS

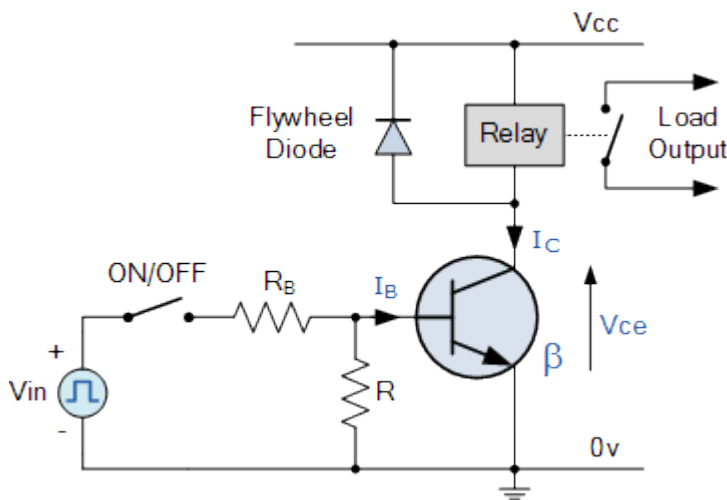
h_{fe}	Small-Signal Current Gain	$I_C = 2.0 \text{ mA}, V_{CE} = 5.0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ kHz}$	125	900	
NF	Noise Figure	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 200 \text{ }\mu\text{A}, R_S = 2.0 \text{ k}\Omega, f = 1.0 \text{ kHz}, B_W = 200 \text{ Hz}$		10	dB

Kuva 46: Ote BC547-sarjan transistorien datalehdessä

4.8.3 Transistori kytkinpiirissä, esimerkki

Tässä esimerkissä transistori ohjaa relettä. Rele voi ohjata jotain suurta virtaa tai jännitettä ottavaa laitetta, kuten moottoria, lämmitysjärjestelmää, pesukonetta, uunia jne.

Induktiivisille kuormille (releet, kelat)) tarvitaan rinnalle kytketty diodi estämään induktiivisten virtapiikkien aiheuttamat ”takapotkut”. Kelan perusominaisuus on, että se pyrkii vastustamaan virran muutosta. Jonkin sortin konservatiivi siis. Kela vastustaa muutosta sitä enemmän, mitä nopeampi muutos on. Tuloksena syntyy ensinnäkin muutosta vastustava jännite, ja siitä edelleen virta. Mitä nopeammin muutos tapahtuu, sitä isomman virran kela synnyttää. Kun laitetaan kytkin äkkiä päälle, se aiheuttaa suuren induktiovirran.



Kuva 47: Transistori releen ohjauksessa

4.9 Kanavatransistorit

Kanavatransistori (Field Effect Transistor, FET) käyttää virran sijasta jännitettä virran ohjaukseen. Transistorin toiminta perustuu sähkökentän vaikutukseen, siitä nimi ”Field Effect”. FETissä on myös kolme jalkaa ja sen ominaisuudet ovat samanlaisia kuin bipolaaritransistorilla (BJT). Monissa käytännön sovellutuksissa ei ole väliä, kumpaa käyttää. FETit voidaan rakentaa paljon pienemmiksi kuin BJT:t ja niiden virran- ja tehonkulutus on pienempiä. Niitä käytetään esimerkiksi integroiduissa piireissä, kuten digitaalitekniikasta tutuissa CMOS-logiikkapiireissä. FETeillä on myös jaottelu N- ja P-tyyppeihin. FET on kuitenkin luonteeltaan *unipolaarinen*, eli toisin kuin BJT:ssä, sen toiminta perustuu *joko* elektroneihin *tai* aukkoihin, mutta ei molempiin.

FETin on erittäin suuri tuloimpedanssi (tuhansia ohmeja), jonka ansiosta se on herkkä havaitsemaan tulojännitteen muutoksia, mutta haittapuolena on, että se tuhoutuu herkästi staattisen sähkön vaikutuksesta.

Kaksi päätyyppiä ovat *Liitoshila-FET* (Junction Field Effect Transistor, **JFET**) ja *eristehilatransistori* (Insulated-gate Field Effect Transistor, IGFET). Näistä jälkimmäinen tunnetaan tutummalla nimihirviöllä *Metallioksidi-puolijohdekanavatransistori* eli Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor eli **MOSFET**.

FETissä on kolme nastaa. Keskimmäiseen nastaan tuodulla ohjaussignaalilla voidaan kontrolloida komponentin läpi menevää virtaa.

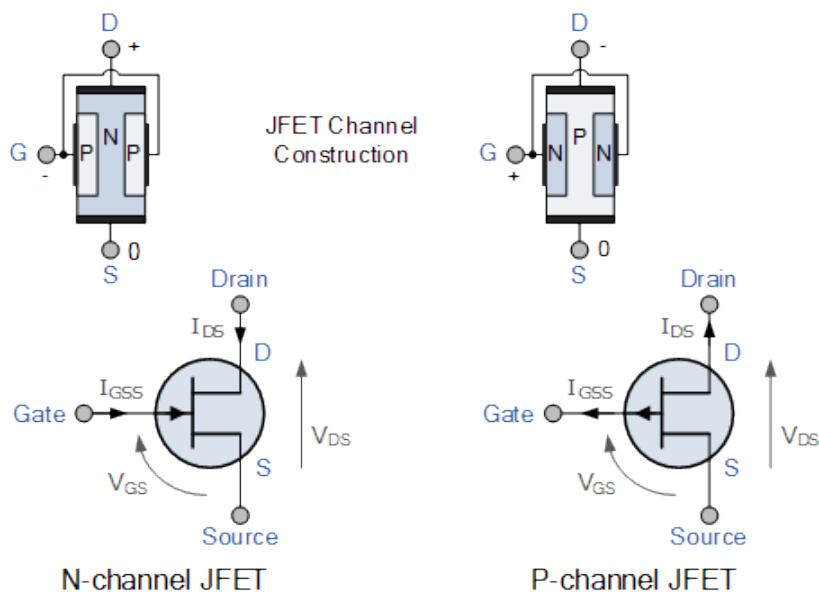
4.9.1. JFET

JFET:issä on kolme erityyppistä liitäntää: *lähde* (source, **S**), *nielu* (drain, **D**) ja *hila* (gate, **G**). JFET muodostuu kahden puolijohderajapinnan välissä olevasta kanavasta, joka yhdistää lähteen ja nielun. Kolmas liitäntä hila ei ole kosketuksissa suoraan kanavaan, vaan rajapinnan vastakkaisella puolella oleviin alueisiin.

Sekä kanava että sitä ympäröivien rajapintojen toisella puolella sijaitsevat kaksi muuta aluetta on seostettu (*dopattu*) siten, että kanava on sähköisesti vastakkaisen tyyppinen kuin kaksi muuta aluetta. JFET jaotellaankin kahteen eri tyyppiin kanavan seostuksen mukaan: n-tyyppi (kanavalla negatiivinen seos) ja p-tyyppi (kanavalla positiivinen seos). Periaatteessa "D"- ja "S"-elektrodit ovat keskenään vaihdettavissa, jos se sopii paremmin kytkennän fyysiseen rakentamiseen, kunhan kytkentä myös muuttuu vastaamaan näiden elektrodien uusia merkityksiä.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

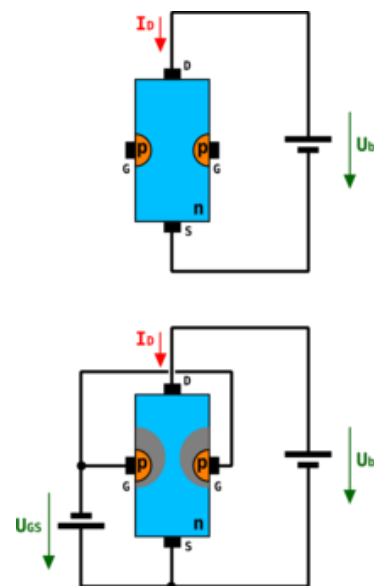


Kuva 48. JFETin rakenne ja jännitteet

Jos D- ja S-nastojen välillä vaikuttaa positiivinen jännite V_{DS} , pääsee virta I_{DS} kulkemaan helposti pitkin kanavaa (viereisessä kuvassa sininen alue). Jännitteen V_{DS} napaisuus on sellainen, että hilan G ja kanavan välinen pn-liitos on estosuuntaan biasoitu. Virran suuruutta kanavassa säädetään kanavan resistanssia muuttamalla. Tämä tapahtuu hilan (G) avulla.

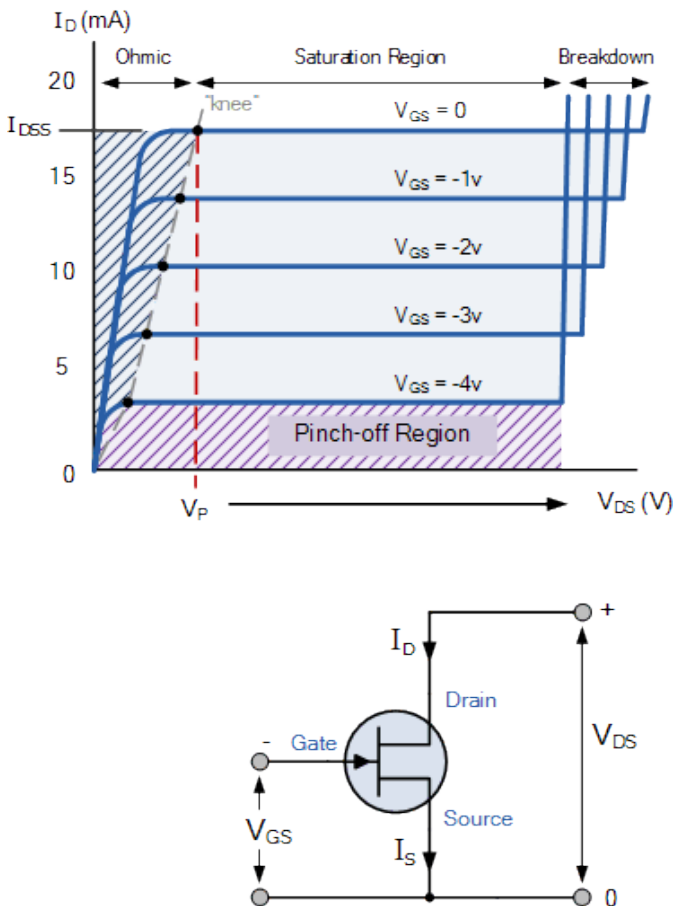
Hilajännitettä V_{GS} kasvatettaessa tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia, levenee ja kanava kutistuu kanavan resistanssin kasvaessa. Tyhjennysalue ei ole symmetrinen, vaan se on leveämpi kanavan päässä, joka on lähempänä nielua, koska hilan ja kanavan välinen estojännite on siellä korkein.

Hilajännite ohjaa kanavan johtavuutta. Toisin kuin MOSFET:it, JFET:it toimivat aina estovyöhyketilassa, eli ne ovat aina johtavia, vaikka hilalla ei olisi jännitettä.



Sitä hilajännitettä, jolla kanava kuristuu kokonaan umpeen (resistanssi ääretön, $I_D=0$), sanotaan kuristusjännitteeksi V_P (pinch-off voltage). N-kanavainen JFET johtaa siis, kun hilajännite V_{GS} on alueella $-V_P > V_{GS} > 0$.

JFETin ominaiskäyrä on oheisen kuvan mukainen:



Kuva 49. N-kanavaisen JFETin ominaiskäyrät ja käyrien mittauskytkentä

Alussa näkyvä käyrien nouseva osa on ns. **ohminen alue** ja se vastaa BJT:n kyllästysaluetta.

FETissä kanava on auki koko matkaltaan ja virta I_D pääsee kulkemaan kanavan läpi verrannollisesti V_{DS} :ään Ohmin lain mukaisesti.

Jos V_{DS} kasvaa niin suureksi, että pn-liitoksen yli vaikuttava estosuuntainen jännite saavuttaa kanavan yläpäässä sellaisen arvon, että kanava pyrkii kuristumaan umpeen, niin virran I_D kasvu pysähtyy. JFET siirtyy **vakiovirta-alueelle**. Tämä vastaa BJT:n lineaarista osaa.

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

Huomaa edellä, että V_{GS} :n suurin arvo on nolla. Pienemmät arvot ovat negatiivisia jännitteitä. Suurin virta I_{DSS} , joka FETin kautta voi kulkea silloin kun se toimii normaalisti, saadaan V_{GS} :n arvolla nolla (kuva 49).

JFETin sulkutila (*pinch-off region*) vastaa tilannetta, jolloin kanava on täysin kiinni ja resistanssi ääretön. Tarpeeksi suurella V_{DS} :n arvolla kanava hajoaa ja virta kasvaa nopeasti ja hallitsemattomasti (*breakdown region*).

Vielä pari kaavaa ☺☺

Lineaarisella osalla virta kanavassa kulkeva virta I_D saadaan kaavasta:

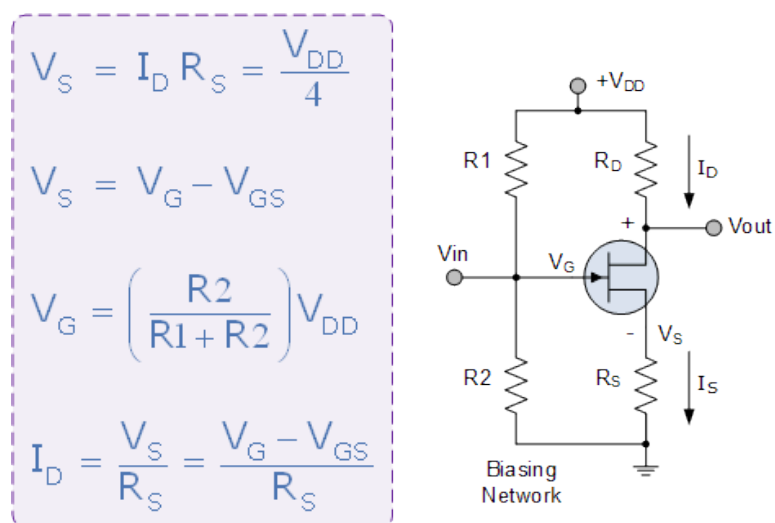
$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right]^2$$

Kanavan resistanssi (transresistanssi) on vastaavasti

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} = \frac{1}{g_m}$$

missä g_m on ns. *transkonduktanssi*.

JFETiä voidaan käyttää vahvistimena, kuten BJT:tä. Tässä esitetään yhteislähdevahvistin (Common Source Amplifier) ja sen biasontikaavat.



Kuva 50. Yhteislähdevahvistin

4.9.2 MOSFET

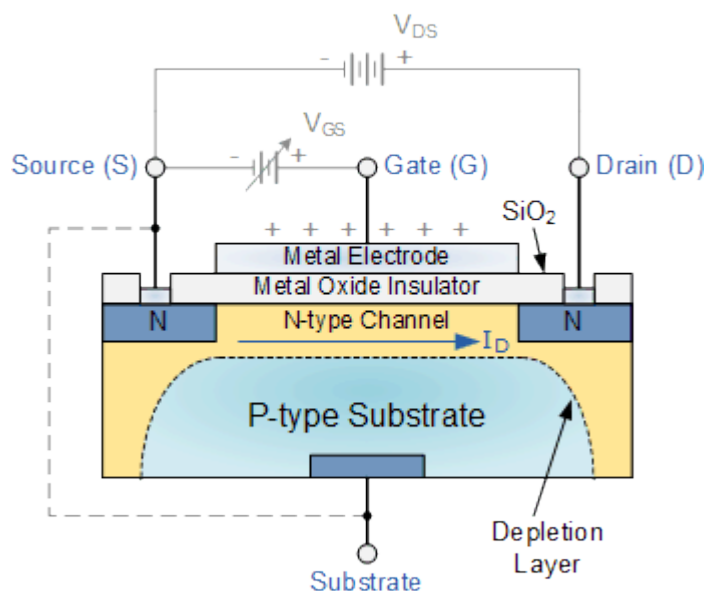
MOSFETteja on avaus- ja sulkutyyppejä ja molemmista vielä N- ja P-tyypin versiot.

- Sulku-MOSFET: Ilman jännitettä V_{GS} se toimii kuten suljettu kytkin (johtaa). Jännitettä V_{GS} käytetään avaamaan kytkin (ei johda).
- Avaus-MOSFET: Ilman jännitettä V_{GS} se toimii kuten avoin kytkin (ei johda). Jännitettä V_{GS} käytetään sulkemaan kytkin (johtaa).

Edellisestä seuraa, että avaus-MOSFET ei kuluta ollenkaan virtaa eikä siis sähkötehoa silloin kun se ei johda. Siksi sitä käytetään niin paljon mikroprosessoreissa ym. pientä virrankulutusta tarvitsevilla laitteilla.

Tässä tarkastellaan N-tyypin avaus-MOSFETia. Se on tämän hetken tärkein puolijohdekomponentti. Nykyiset mikroprosessorit, jotka saattavat sisältää yli 10^8 komponenttia, on toteutettu avaus-MOSFETeilla.

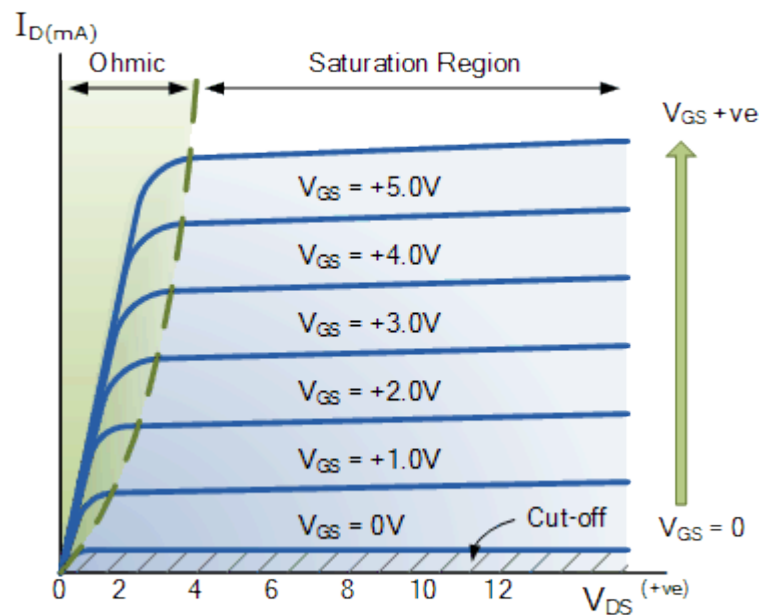
Rakenne on oheisen kuvan mukainen. Alustaksi (*substrate*) nimettyyn p-alueeseen on seostettu kaksi n-aluetta, joihin on kytketty ulkoiset D- ja S-nastat. Hilanasta (G) on erotettu muusta osasta ohuen piidioksidikerroksen avulla. Piidioksidi on hyvä eriste ja MOSFETin hilanastaan ei tästä syystä men normaalisissa toiminnassa lainkaan virtaa, eli $I_G=0$.



Kuva 51. N-tyypin avaus-MOSFET

Toiminta:

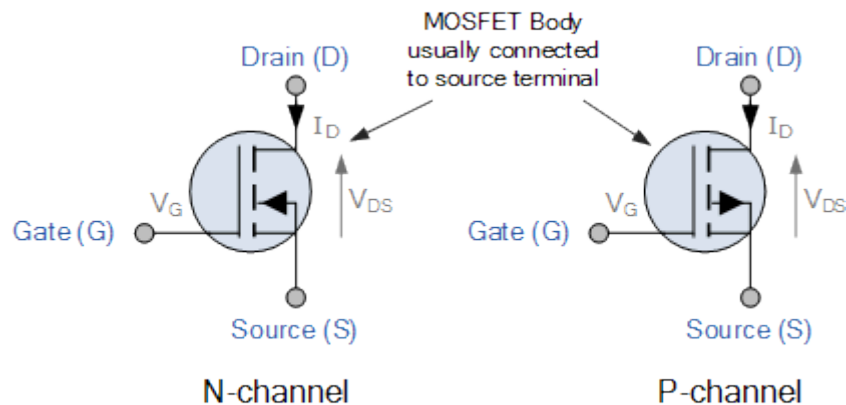
- **$V_{GS}=0$:** Kuvassa 51 D- ja S-nastojen väliin on kytketty jännite V_{DS} . Hilan ja S-nastan välinen jännite V_{GS} on nolla. D-nastaan yhdistetty n-alue on silloin korkeammassa potentiaalissa kuin alustan p-alue, jolloin kyseinen pn-liitos on estosuuntainen. Avaus-MOSFET ei johda ja virta $I_D=0$.
- **$V_{GS} > U_t$:** Jos hila on alustaan nähden positiivinen, se alkaa houkutella D- S-nastojen n-alueilta elektroneja eristekerroksen alla olevaan alustan osaan. Kun hilan S-nastan välinen jännite ylittää arvon U_t , missä U_t on avaus-MOSFETin kynnysjännite (*threshold voltage*), on eristekerroksen alla olevaan alustan osaan muodostunut yhtenäinen elektronikerros. Eristekerroksen alla oleva p-alue on riittävän positiivisen hilajännitteen avulla muuttunut n-alueeksi ja on avautunut kanava, joka yhdistää D- ja S-nastojen n-alueet toisiinsa. Jos D- ja S-nastojen välillä vaikuttaa jännite $U_{DS}>0$, niin virta I_D pääsee kulkemaan muodostuneen kanavan kautta. Eristekerroksen ansiosta hilanastan virta $I_G=0$.



Kuva 52. MOSFET-transistorin ominaiskäyrät

Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori

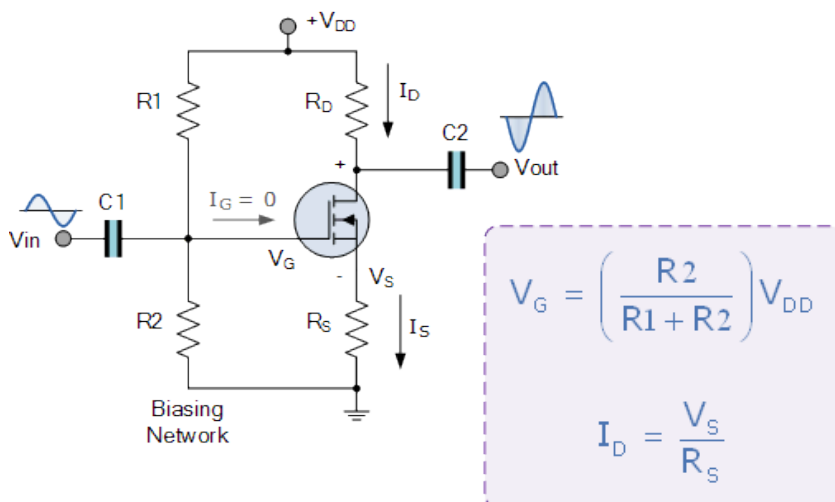


Kuva 53. MOSFETin piirrossymbolit

MOSFET toimii joko kytkimenä (digitaalielektroniikka) tai vahvistimena (analoguelektroniikka) samalla periaatteella, mitä on tarkasteltu jo BJT:n yhteydessä.

- Sulkutila: $V_{GS} > V_t$, MOSFET on "OFF", kytkin auki, resistanssi ääretön.
- Kyllästystila: $V_{GS} > V_t$ transistori on vakiovirta-alueella ja "ON"-asennossa. Kytkin kiinni, resistanssi nolla.
- Lineaarinen (ohminen tila): Transistori on vakioresistanssialueella ja käyttäytyy kuten jänniteohjattu vastus (Kuva 53). Resistanssi määräytyy hilajännitteestä V_{GS} .

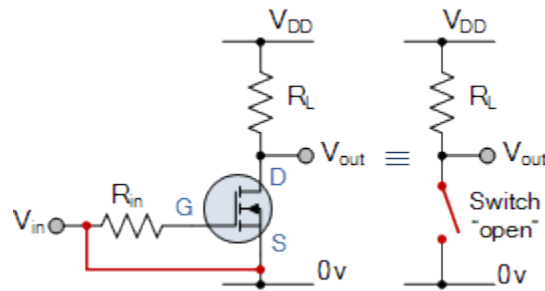
Kuvasta 52 kannattaa huomata, että lineaarinen ja kyllästysalue ovat vaihtaneet paikkaa BJT:hen verrattuna.



Kuva 54. N-tyypin avaus-MOSFET vahvistimena.

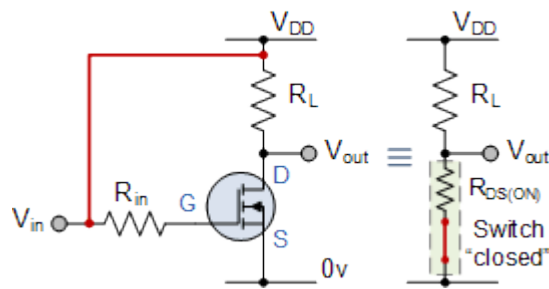
Elektroniikan perusteet 3 op

Osa 3: Transistori



Kuva 55. MOSFET sulkuutilassa

- The input and Gate are grounded (0v)
- Gate-source voltage less than threshold voltage $V_{GS} < V_{TH}$
- MOSFET is “OFF” (Cut-off region)
- No Drain current flows ($I_D = 0$)
- $V_{OUT} = V_{DS} = V_{DD} = “1”$
- MOSFET operates as an “open switch”



Kuva 56. MOSFET kyllästystilassa

- The input and Gate are connected to V_{DD}
- Gate-source voltage is much greater than threshold voltage $V_{GS} > V_{TH}$
- MOSFET is “ON” (saturation region)
- Max Drain current flows ($I_D = V_{DD} / R_L$)
- $V_{DS} = 0V$ (ideal saturation)
- Min channel resistance $R_{DS(on)} < 0.1\Omega$
- $V_{OUT} = V_{DS} = \cong 0.2V$ due to $R_{DS(on)}$
- MOSFET operates as a low resistance “closed switch”