

## **Transistorivahvistin toiminnan ja lämpenemisen tutkiminen**

### **1. Tarkoitus:**

Työssä perehdytään tyypillisiin bipolaaritransistoreihin, bipolaaritransistorivahvistimeen sekä mitataan transistoriasteen toimintapiste ( $I_C$ ,  $U_{CE}$ ) ja keskeiset AC-vahvistusominaisuudet.

Työn tavoitteena on tukea teoriaopetusta ja antaa konkreettinen kuva transistoriasteen toiminnasta ja sen lämpenemisestä.

### **2. Välineet:**

- "1-asteinen transistorivahvistin"-vahvistinkytkenä
- digitaalinen yleismittari FLUKE 179
- dekadivastus
- oskilloskooppi HP54602B
- tasajännitelähde Teklab 12V / 15V
- funktiogeneraattori HP33120A
- lämpökamera FLIR

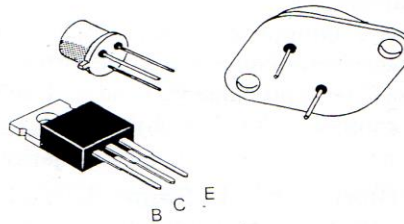
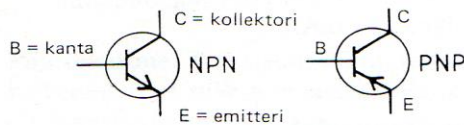
### **3. Teoriaa**

Teoriaa löytyy jaetusta materiaalista ja oppikirjasta, Analogiaelektroniikka s.136-144, s.148-156. Jäähdytys-elementin mitoitus s. 248-250.

## Transistorirakenteet

Transistorirakenteita on kahta tyyppiä; NPN- ja PNP-transistoreja. Kuvassa on esitetty NPN- ja PNP-transistorien piirrosmerkit ja liitântöjen nimitykset. Käyttökohde ja transistorin läpi kulkeva virta määräävät transistorin koon ja koteloinnin.

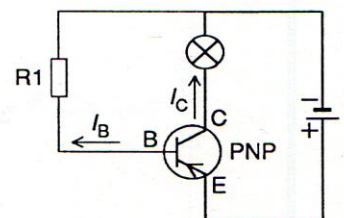
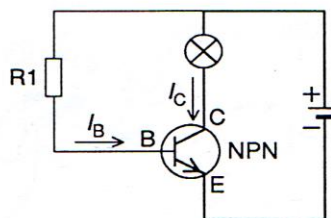
Piirrosmerkit



Transistorin piirrosmerkissä **nuoli ilmaisee virran kulkusuunnan**. Jotta transistori johtaisi, se on kytkettävä virtapiiriin päästösuuntaan. Esimerkkikuvassa transistorit on kytketty päästösuuntaiseen jännitteeseen, jolloin kanne-emitteri-piirissä kulkee kantavirta (ohjausvirta) ja kollektori-emitteri-piirissä kollektorivirta (päävirta). NPN-transistori johtaa, kun sen kannalle (B) ja kollektorille (C) on kytketty positiivisempi jännite kuin emitterille (E). Tällöin ohjaus- ja päävirta kulkevat transistorin läpi nuolen suuntaan. PNP-transistorissa taas emitterille on kytkettävä positiivisempi jännite kuin kollektorille ja kannalle.

### Esimerkki

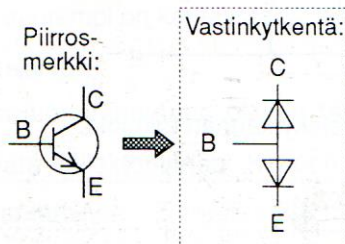
NPN- ja PNP-transistorin kytkentä virtapiiriin. Vastuksella R estetään liian suuren kantavirran  $I_B$  kulku transistorin kanta-emitteripiirissä.



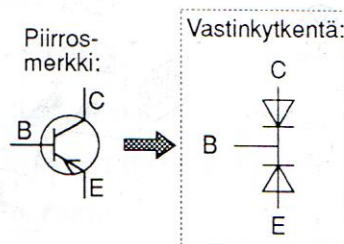
## Transistorin koestaminen

Transistorin kunto voidaan mitata digitaalisella yleismittarilla. Kuvassa on esitetty NPN- ja PNP-transistorin piirrosmerkit ja vastinkytkenät. Transistorien liitinjärjestys on syytä tarkistaa valmistajan tuoteluettelosta tai mittaamalla yleismittarilla.

### NPN-transistori:

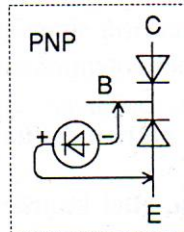
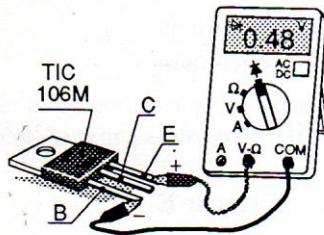


### PNP-transistori:



**Esimerkki**

NPN- ja PNP-transistorin koestus digitaalisella yleismittarilla.



**Mittaustulokset:**

	NPN-transistori	PNP-transistori
B — C	0,5 V	katkos
B — E	0,5 V	katkos
C — B	katkos	0,5 V
E — B	katkos	0,5 V
E — C	katkos	katkos
C — E	katkos	katkos

Kuvassa mittarin syöttämä + -jännite on kytketty emitterille ja -jännite kannalle, joten emitterin (E) ja kannan (B) välinen vastindiodi on kytketty päästösuuntaan ja mittari näyttää sen yli vaikuttavan jännitteen. Päästösuuntaan kytketyn vastindiodin yli mitattaessa mittari näyttää noin 0,5 V ja estosuuntaan katkosta. Ehjää transistoria koestettaessa saadaan taulukon mittaustulokset.

Mittaustietojen perusteella on transistorin rakennetyyppi (NPN, PNP) ja sen liitäntäjohtimet tunnistettavissa.

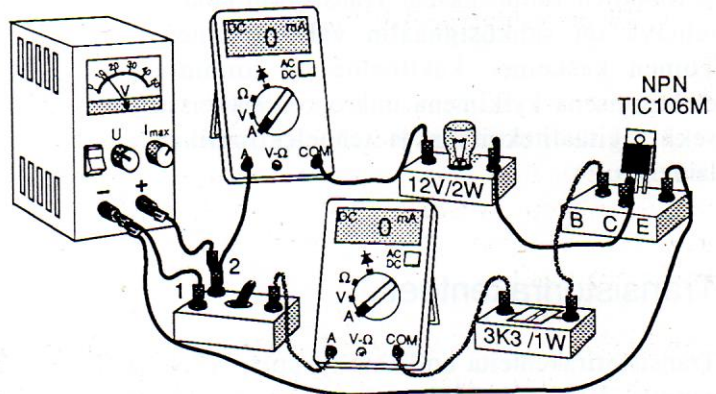
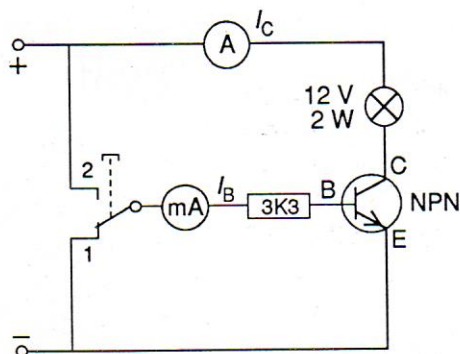


## Transistorin toiminta

Tutustutaan transistorin toimintaan kahden kokeen avulla.

### Koe 1

Kytetään transistorin kannalle ensin jännitelähteen miinus (kytkin asennossa 1) ja sen jälkeen plus (kytkin asennossa 2).



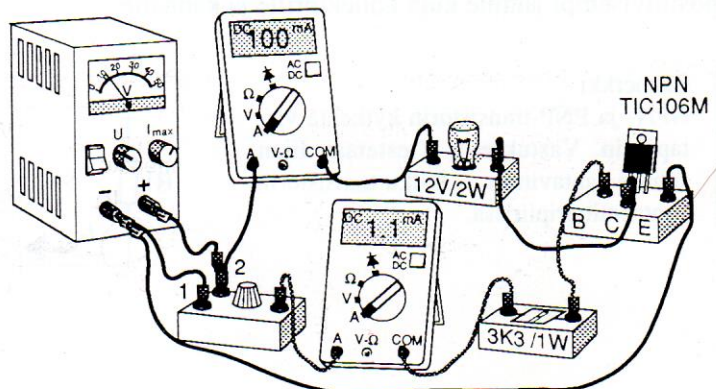
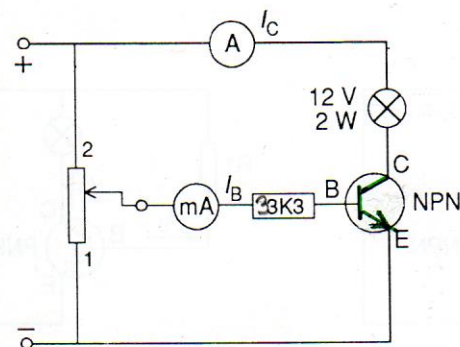
Mittaustulokset ja havainnot:

- Kytkimen asennossa 1 lamppu ei pala ja ohjaus- ja päävirtapiirin A-mittarit näyttävät nollaa. Transistorin läpi ei siis kulje virtaa.
- Kytkimen asennossa 2 lamppu palaa kirkkaasti. Lampun läpi kulkee 150 mA:n virta ja transistorin kannalla 3,5 mA:n ohjausvirta.

**Päättelemme:** Transistori toimii **kytkimenä**. Kun transistorin **ohjausvirta (kantavirta) on nolla, transistori ei johda**, joten se vastaa lampun virtapiirissä auki olevaa kosketinta. **Ohjausvirran kulkiessa transistori johtaa**, jolloin se vastaa kiinni olevaa kosketinta.

### Koe 2

Miten transistori toimisi, jos kantavirta olisi edellisen kokeen arvojen 0 ja 3,5 mA:n välissä. Tehdään toinen koe, jossa vaihtokytkimen tilalla on jännitteenjakovastus.



Mittaustulokset ja havainnot:

- Liu'un asennossa 1 lamppu ei pala. Kun liukua siirretään kohti 2-asentoa lamppu alkaa palaa yhä kirkkaammin.
- Ampeerimittareista havaitsemme, että ohjausvirta suurenee 0...3,5 mA:iin ja lampun läpi kulkeva virta 0...150 mA:iin, kun potentiometrin liukua siirretään 1-asennosta 2-asentoon.  
Transistorin ja lampun läpi kulkevan **virran suuruus riippuu siis ohjausvirran suuruudesta.**
- Kantavirtaa ei kulje eikä transistori johda, ellei kannan B ja emitterin E välillä ole vähintään 0,5 V:n jännite.

**Päättelemme:** Transistori toimii **säädettävänä vastuksena**. Pienellä ohjausvirralla kulkee transistorin läpi (C→E) pieni päävirta, joten transistorin vastus on tällöin suuri. Kun ohjausvirtaa suurennetaan suurenee myös transistorin läpi kulkeva päävirta, koska transistorin vastus pienenee. Kuvan mittaustilanteessa transistorin vastusarvo on 55 Ω, mutta täysin johtavassa tilassa (kun lamppu palaa kirkkaasti) noin 1 Ω.

Tarkastellaan mittaustuloksia, kun lamppu palaa kirkkaasti:

- Transistorin ohjausvirta on 1,5 mA ja ohjausjännite ( $U_{BE}$ ) 0,66 V.
- Lampun läpi kulkee 150 mA:n päävirta ja siihen vaikuttaa 11,7 V:n jännite.

**Havaitsemme, että**

- ohjausteho  $1,5 \text{ mA} \cdot 0,66 \text{ V} = 1 \text{ mW}$  saa aikaan
- lampputehon  $150 \text{ mA} \cdot 11,7 \text{ V} = 1800 \text{ mW}$ .

**Päättelemme:** Transistori toimii **tehovahvistimena**.

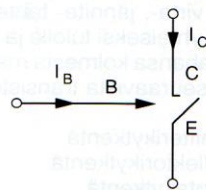
Kokeessa 0...1 mW:n ohjausteholla ohjataan päävirtapiirin tehoa 0...1800 mW:iin eli transistorista ulos saatava teho on 1800-kertainen sisään vietyyn tehoon verrattuna.

## Transistorin toimintatilat

Jos ajatellaan transistori virralla ohjatuksi vastukseksi, sillä on seuraavat kolme toimintatilaa.

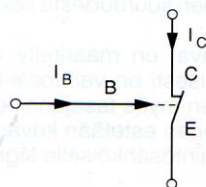
### 1. Aukitila

Kantavirta  $I_B = 0$ , jolloin myös kollektorivirta  $I_C = 0$ . Koska  $I_C$  ei kulje, on C-E välin resistanssi äärettömän suuri eli kollektorin ja emitterin välinen kytkin on auki.



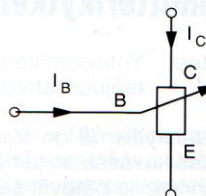
### 2. Kyllästystila

Kantavirta  $I_B$  on niin suuri, että kollektorivirta  $I_C$  on maksimiarvoonsa lähellä oikosulkuvirtaa. Nyt transistori on täysin johtavana eli C-E välin resistanssi on hyvin pieni. Kollektorin ja emitterin välinen kytkin on kiinni.



### 3. Aktiivitila

Kantavirta  $I_B$  on edellisten arvojen välissä. Tällöin transistori toimii säädettävänä vastuksena, koska  $I_B$ :n vaihtelut muuttavat myös  $I_C$ :tä  $h_{FE}$ :n määräämällä tavalla.





## 11.4 Transistorin ominaiskäyrät

Käyttökohteet: Transistorin ominaiskäyrien avulla voidaan tutkia transistorin käyttäytymistä virtapiirissä.

Transistorin *ominaiskäyrien* piirtämistä helpottaa se, ettei esto-suunnan ominaisuuksilla ole käytännön merkitystä. Näin kaikki tarvittavat ominaiskäyrät voidaan piirtää yhteiseen koordinaatistoon. Näillä ominaiskäyriä voidaan esittää transistorin tulo-, siirto- ja lähtöominaisuudet.

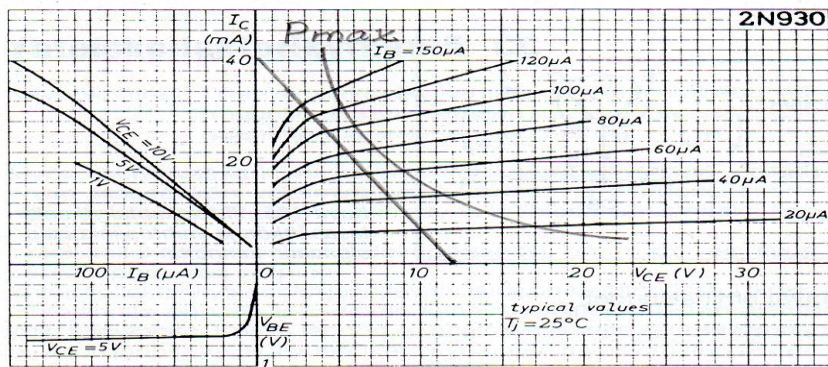
Transistorilla on kolmenlaisia ominaiskäyriä:

- tulokäyrä  $I_B = f(U_{BE}), U_{CE} = \text{vakio}$
- siirtokäyrä  $I_C = f(I_B), U_{CE} = \text{vakio}$
- lähtökäyrä  $I_C = f(U_{CE}), I_B = \text{vakio}$ .

Datakirjoissa transistorin staattiset ominaiskäyrät esitetään usein seuraavan kuvan mukaisesti. Koordinaatiston III neljänneksessä on *tulokäyrä*, joka kuvaa  $U_{BE}$ :n riippuvuutta kantavirrasta  $I_B$ . Käyrä on identtinen diodin ominaiskäyrän kanssa.  $U_{CE}$  pidetään mittauksen ajan vakiona.

II neljänneksessä on *siirtokäyrä*, joka kuvaa kollektorivirran  $I_C$  riippuvuutta kantavirrasta  $I_B$ . Myös tässä mittauksessa  $U_{CE}$  pidetään vakiona, mutta mittaus tehdään muutamalla  $U_{CE}$ :n arvolla. Kuvaa ei ole täysin suora, koska virtavahvistus  $h_{FE}$  kasvaa virran  $I_C$  kasvaessa.

Tärkein käyrästä on I neljänneksessä oleva *lähtökäyrä*, joka kuvaa kollektorivirran  $I_C$  riippuvuutta  $U_{CE}$ :stä. Mittauksessa  $I_B$  pidetään vakiona, mutta mittaus tehdään useilla  $I_B$ :n arvoilla. Tämän neljänneksen käyristä voidaan tutkia mm. transistorin tasavirtavahvistusta.



Kuva 186. Esimerkki yhteis-emitterikytketyn transistorin ominaiskäyristä

Lähtökäyristä nähdään, että kantavirta määrää lähes yksinomaan kollektorivirran suuruuden. Samoin nähdään, että kollektorivirta

alkaa merkittävästi kulkea vasta tietyn kollektorijännitteen arvon tultua ylityksi. Tätä arvoa kutsutaan *kyllästymisjännitteeksi*. Sekä kanta- että kollektorivirtapiirit ovat tasavirtapiirejä, joiden resistanssit voidaan laskea ominaiskäyrien avulla halutussa pisteessä.

$$R_{in} = \frac{U_{be}}{I_b}$$

$R_{in}$  = ottoimpedanssi

$$R_{out} = \frac{U_{ce}}{I_c}$$

$R_{out}$  = antoimpedanssi

Lähtökäyristä nähdään myös transistorin tasavirtavahvistus. Tuloimpedanssi samoin kuin virtavahvistuskin ovat jonkin verran riippuvaisia kollektorijännitteen suuruudesta.

$$h_{FE} = \frac{I_c}{I_b}$$

$h_{FE}$  = tasavirtavahvistus

**Saturation voltage**



## 11.5 Transistorivahvistimen toimintapiste ja -suora

Käyttökohteet: Toimintapisteen ja -suoran avulla voidaan transistoripiirin ominaisuuksia tutkia graafisesti.

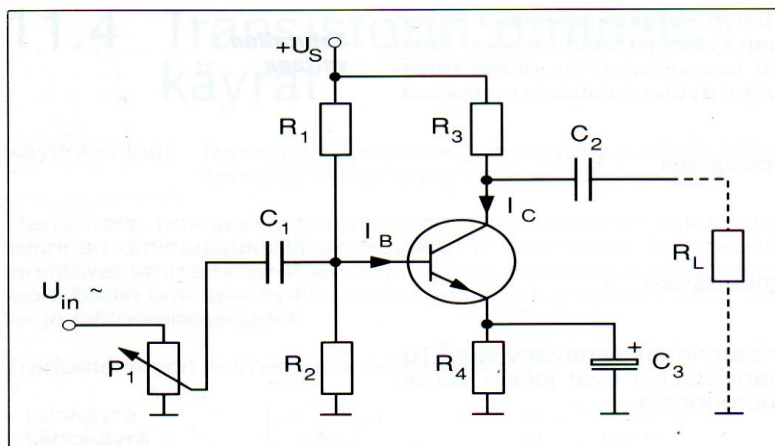
Kuten diodipiirissä *toimintapiste* ja -suora ovat erinomainen tapa tarkastella myös transistoripiirin toimintaa muuttuvissa olosuhteissa. Toimintasuora piirretään transistorin lähtökäyrästään.

Tässä on esimerkikykentänä valourkujen yksiasteinen yhteis-emitterikytketty tulovahvistin. Tasajännitteen  $+9\text{ V}$  aiheuttaman vakiokantavirran  $I_B$  suuruutta voidaan vaihdella vahvistettavan signaalin  $U_{in}$  avulla. Nämä muutokset vaikuttavat edelleen kollektorivirtaan  $I_C$ .

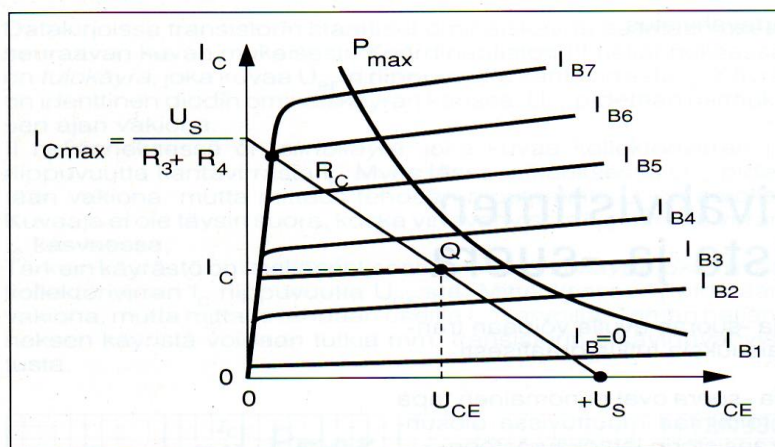
Toimintapisteen ja -suoran avulla voidaan tarkastella tämän vahvistinkytkennän virtojen ja jännitteiden riippuvuutta toisistaan.

Toimintasuoran alapään paikan määrittämistä varten ajatellaan transistori ensin täysin johtamattomaksi, jolloin jännite  $U_{CE}$  on syöttöjännitteen suuruinen. Toimintasuoran yläpään paikka määräytyy, kun ajatellaan transistori täysin johtavaksi, ts. siinä kulkee suurin mahdollinen kollektorivirta  $I_{Cmax}$ . Toimintapisteen  $Q$  paikka toimintasuoralla valitaan kantavirran avulla.

Joissakin tapauksissa on piirrettävä erikseen DC-toimintasuora ja AC-toimintasuora. Tämä koskee esimerkiksi tällaista kytkentää, jossa emitterivastus ( $R_4$ ) on ohitettu emitterikondensaattorilla ( $C_3$ ) paremman lämpötilavakavuuden saavuttamiseksi. Emitterikondensaattori muuttaa toimintasuoran yläpään paikkaa.



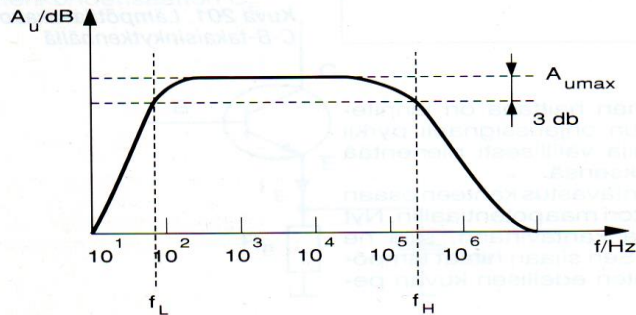
Kuva 187. Transistorivahvistin



Kuva 188. Transistorivahvistimen toimintapiste ja -suora. Kuvaan on merkitty lepotoimintapiste  $Q$ .

## Vahvistimen kaistaleveys

Jos tulosignaalin taajuus vaihtelee 0 Hz:stä äärettömään, ei mikään vahvistin pysty niitä kaikkia hyväksyttävästi vahvistamaan. Kaikilla vahvistimilla on määrätty ala- ja ylätaajuus, joiden välistä aluetta kutsutaan vahvistimen *toistoalueeksi* eli *kaistaleveydeksi*. Mutta tämän toistoalueen sisälläkään eivät kaikki taajuudet vahvistu yhtä paljon, vaan esimerkiksi seuraavan kuvan mukaisesti. Taajuusasteikon lukuarvot on esitetty vain havainnollisuuden vuoksi.



**Bandwidth**

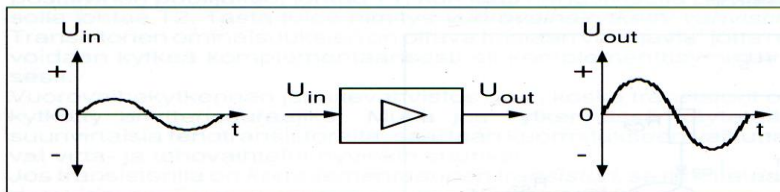
Kuva 203. Vahvistimen kaistaleveyden määrittäminen

**Low High**

On sovittu, että vahvistimen toistoalueen ala- ja ylärajataajuuksella vahvistus on laskenut  $1/\sqrt{2}$  suurimmasta arvostaan. Tämä vastaa vahvistuksen alenemista 3 dB:llä. Äänitaajuusvahvistimen toistoaluetta voidaan verrata ihmisen kuuloalueeseen 20 Hz—20 kHz.

## Vahvistimen särö

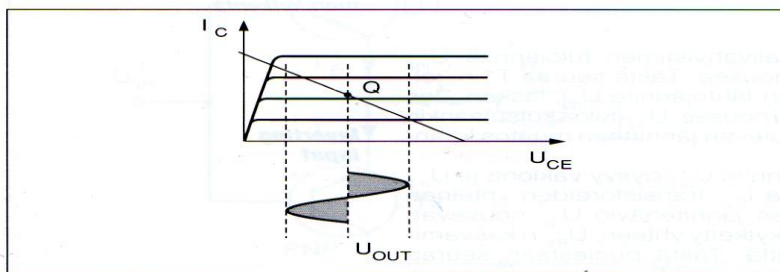
Ideaalinen vahvistin toistaa ohjaussignaalin vaihtelut täsmälleen oikean muotoisina. Käytännössä signaalin säröytyminen on ongelma kaikissa vahvistimissa.



Kuva 204. Tulosignaalin vahvistuminen

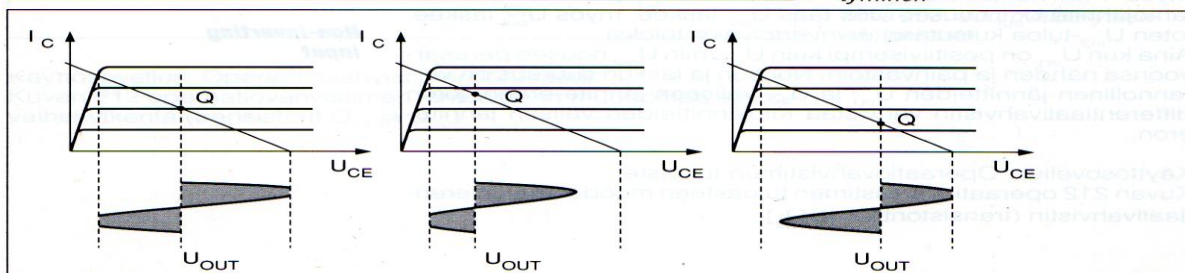
**Distortion**

Transistorivahvistimen *särö* johtuu transistorin epälineaarisuudesta, ts. sen otto-, anto- ja siirtokäyrät eivät ole lineaarisia. Myös liian voimakas tulosignaali tai kytkennän lepotoimintapisteeseen siirtyminen aiheuttaa vahvistettavan signaalin säröytymistä. Moniasteisissa vahvistimissa säröytymistä voidaan pienentää takaisinkytkennöillä ym. piiriteknisillä ratkaisuilla.



Kuva 205. Oikein toimiva vahvistin

Kuva 206. Liian voimakkaan tulosignaalin ja toimintapisteen siirtymisen aiheuttama säröytyminen





#### 4. Mittaukset

4.0 Määritä mittaamalla jaettujen transistorien rakennetyypit ja kunto.

4.1 Mittaa yleismittarilla kytkennän kaikki resistanssit.

Mittaa jännitteet  $U_e$ ,  $U_c$ ,  $U_{Re}$  ja  $U_b$ .

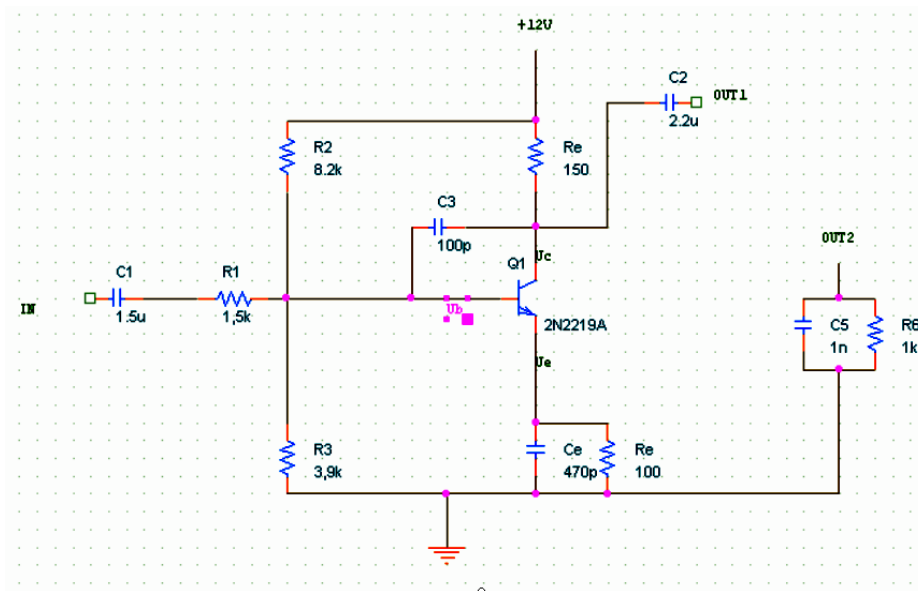
Määritän em. perusteella vahvistimen toimintapiste on ( $I_c$ ,  $U_{ce}$ ).

(Laske niiden avulla transistorin virrat  $I_c$ ,  $I_b$  ja virtavahvistuskerroin).

4.2 Sääda generaattorin outputin tasoa ja tutki oskilloskoopin avulla millä lähtöjännitteen arvolla aaltomuoto alkaa leikkaantua, ja tapahtuuko se samanaikaisesti positiivisella ja negatiivisella puolijaksolla. Mittaustaajuus on 1 kHz.

Päättele toimintapisteen sijainti vertaamalla optimaaliseen toimintapisteeseen.

4.3 Vahvistusominaisuudet voidaan mitata audioanalysaattorilla tai perinteisesti funktiogeneraattorilla ja oskilloskoopilla. Aseta funktiogeneraattorin taajuus on 1 kHz ja antamaan n. 150 mV:n siniaaltoa, joka kytketään vahvistimen tuloon. Yhdistä vahvistimen kuormituspiiri sen lähtöön (OUT1 – OUT2) ja tarkista oskilloskoopilla, että tulo- ja lähtösignaali ovat asiallisia.



4.4 Mittaa lämpökameralla transistorin kuoren  $T_C$  arvo. Piirrä lämpömalli.

Laske lämpömallin perusteella puolijohdeliitoksen lämpötila  $T_J$  arvo.

4.5 Kiinnitä piitahnan avulla transistorille jäähdytyslementti ja toista edellisen kohdan mittaukset.

Päivitä lämpömalli ja laske  $T_J$  arvo.

Extra tehtävä 4.6

Mittaa vahvistimen taajuusvaste (=vahvistus taajuuden funktiona). Taajuusvaste mitataan syöttämällä vahvistimen tuloon funktiogeneraattorilta vakiojännite (AC), jonka taajuutta muutetaan portaittain ja katsotaan vahvistus ( $U_{out} / U_{in}$ ) oskilloskoopilta. Molempia signaaleja valvotaan oskilloskoopilla.

Ohjeita:

- Aseta generaattorin taajuus 1000 Hz ja amplitudi 75-100 mV, jolloin sen lähtöjännite skoopilla on 150 mV:n luokkaa. Tarkista oskilloskoopilla, että lähtösignaali on asiallinen.

Mitattavassa kytkennässä kuormituspiirin tulee olla kytkettynä.

- Sääda oskillaattorin taajuutta ja hae vahvistuksen maksimikohta.
- Sääda taajuutta keskitaajuudesta ylöspäin ylärajataajuuteen saakka ja ota sopivin välein vahvistuslukemat.
- Tee sama keskitaajuudesta alaspäin

Luokka: \_\_\_\_\_

Ryhmä: \_\_\_\_\_

Työ tehty (pvm): \_\_\_\_\_

Opettajan kuittaus: \_\_\_\_\_

---



