



Transistorit

Yleistä

Merkittävin elektroniikan kehitysaskel toisen maailmansodan jälkeen on ollut transistorin keksiminen. Se on pienikokoinen, vähän tehoa kuluttava puolijohteisiin perustuva komponentti, joka keksimisensä jälkeen on lähes kokonaan syrjäyttänyt aiemmin käytetyn elektroniputken kaikessa sähköisen signaalin muokkauksessa ja vahvistamisessa.

Transistorit voidaan jakaa kahteen suurempaan ryhmään: Bibolaaritransistoreihin ja kanavatransistoreihin. Bibolaaritransistoreissa alkuosa "bibolaarinen" tarkoittaa sitä, että ko. transistoreissa sekä elektronit, että aukot osallistuvat toimintaan.

Nimen loppuosa puolestaan kuvaa transistorin toimintaa virransiirtäjänä pieniresistanssisesta piiristä suuriresistanssiseen piiriin (engl. transfer + resistor => transistor). BJT on lyhennys sanoista "bibolar junction transistor"

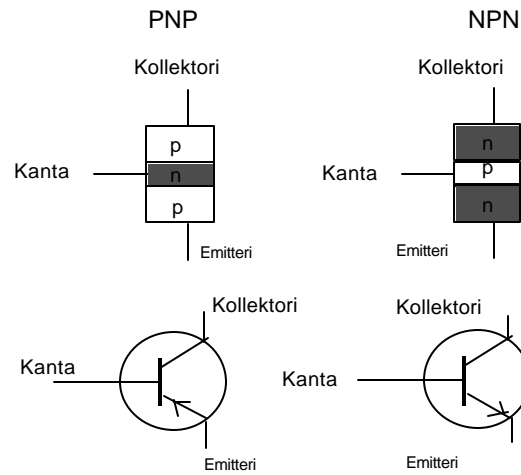
Kanavatransistori eli FET on puolestaan unipolaarinen komponentti, jossa jännitteellä ohjataan joko elektronivirtaa (n-kanava FET) tai aukkovirtaa (p-kanava FET).

Työnkuvaus

Työssä tutustutaan ainoastaan bibolaaritransistoriin. Transistorista selvitetään toimintakunto yleismittarilla ja määritetään ominaiskäyrät sekä estovirta mittaamalla. Lisäksi tutustutaan siihen kuinka lämpötila vaikuttaa transistorin toimintaan ja määrätään transistorin h- parametriarvoja.

Bibolaaritransistori

Transistori koostuu kahdesta puolijohdevyöhykkeestä, jotka vuorotellen ovat p- tai n-tyyppisiä. N-tyyppisessä puolijohdevyöhykkeessä elektronit ovat enemmistönä ja näin ollen päävarauksenkuljettajina. Vastaavasti P-tyyppisessä puolijohdevyöhykkeessä aukot ovat enemmistönä ja kuljettavat positiivista alkeisvarausta. Sen perusteella missä järjestyksessä nämä puolijohdevyöhykkeet ovat transistorissa voidaan transistorit luokitella joko PNP- tai NPN-transistoreiksi. Ainoa ero PNP- ja NPN-transistoreiden välillä on virran kulkusuunta niiden sisällä, minkä takia niiden käyttöjännitteiden on oltava vastakkaiset.



Kuva1: PNP- ja NPN transistorien rakenne ja piirrosmerkit

Transistorin keskimäinen vyöhyke on kanta B (base), ja uloimmat ovat emitteri E (emitter) ja kollektori C (collector). Transistorissa on siis aina kaksi pn-liitosta eli rajapintaa, joka erottaa p- ja n-tyyppiset alueet toisistaan. Rajapinnassa sen ympäristöstä häviää liikkumiskykyiset varaukset ja näin syntyy ns. tyhjennysalue. Rajapinnan molemmille puolille muodostuu vastakkaismerkkiset varauskerrokset, n-puolelle positiivinen ja p-puolelle negatiivinen. Varauskerrosten välille muodostuu sähkökenttä, joka pysäyttää elektronien ja aukkojen liikkumisen rajapinnan yli. Tyhjennysalue ei näin pääse leviämään koko puolijohde kiteeseen. Sähkökentän muodostuminen tyhjennysalueella aiheuttaa pn-liitokseen jännitteen, jota sanotaan diffuusiojännitteeksi. Diffuusiojännitteen suuruus on pn-piissä 0,6...0,7 V ja pn germaniumissa 0,2...0,3 V.

Transistorin koestaminen

Transistorin toimintakunnon testaaminen yleismittarilla paljastaa lähinnä oikosulut ja katkokset. Sen sijaan mittaus ei ilmaise alentuneita jännitekestoisuuksia tai virtavahvistuskertoimien muutoksia. Ennen transistorin kunnon testausta on datakirjasta katsottava testattavan transistorin tyyppi (npn vai pnp) ja työtä helpottaa jos tietää transistorin liitinnat. Itse testaus suoritetaan samalla tavalla kuin diodin kunnon määrittäminen, koska transistorin vastinkytkentä muodostuu kahdesta diodista. Mittauksissa käytetään mittarin puolijohdemittausaluetta. Taulukosta 1 on viitteelliset arvot ehjän transistorin mittaustuloksista.

Taulukko 1

Mittausväli	NPN-transistori	PNP-transistori
B => C	0.5	katkos
B => E	0.5	katkos
C => B	katkos	0.5
E => B	katkos	0.5
E => C	katkos	katkos
C => E	katkos	katkos

Ensimmäisessä mittauksessa mittarin syöttämä (+)-jännite on kytketty kannalle ja (-)-jännite kollektorille, joten NPN-transistorin tapauksessa kannan (B) ja kollektorin (C) välinen vastindiodi on päästösuuntaan ja mittari näyttää sen yli vaikuttavan jännitteen. Päästösuuntaan kytketyn vastindiodin yli mitatessa mittari näyttää noin 0.5 V ja estosuuntaa katkosta.

Laboratorio työssä käytettiin NPN transistoria tyyppiä 2N2219. Taulukossa 2 on edellisellä mittaustavalla saadut arvot sekä mittauserot mittarin resistanssialueella mitatessa.

Taulukko 2

Mittausväli	U / V	R /MΩ
B => C	0.61	4.28
B => E	0.61	4.29
C => B	katkos	∞
E => B	katkos	∞
E => C	katkos	∞
C => E	katkos	∞

Tulosten perusteella voidaan määrittää, että transistori on kunnossa ja sen kanta on varmuudella tunnistettavissa.

Transistorin käyttöalueen rajat

Transistorin käyttöä rajoittavat sen jännitekestoisuudet ja maksimiteho sekä maksimivirrat. Jännitekestoisuudet ilmoitetaan useilla erilaisilla tavoilla:

U_{cb0} = suurin kollektorin ja kannan välille kytketty jännite kun emitteri on irti, $I_e = 0$

U_{eb0} = suurin kannan ja emitterin välille kytkettävä jännite kun kollektori on irti, $I_c = 0$

U_{ce0} = suurin kollektorin ja emitterin välille kytkettävä jännite kun kanta on irti, $I_b = 0$

Muita transistorin käyttöä rajoittavia tekijöitä ovat:

I_{cmax} = suurin sallittu kollektorivirta

I_{bmax} = suurin sallittu kantavirta

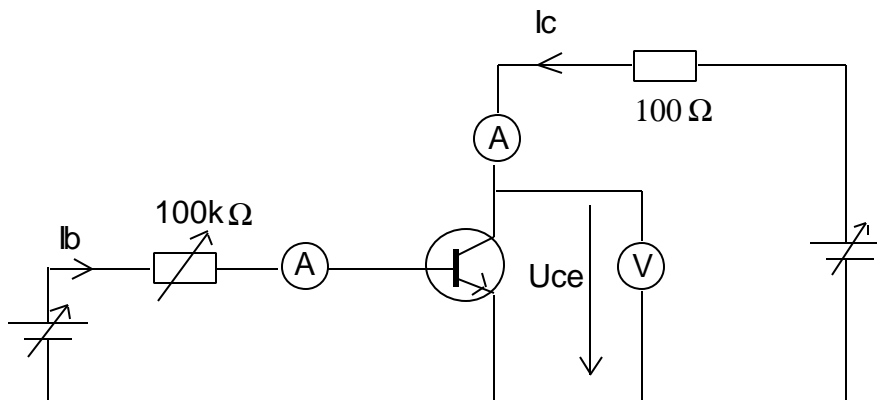
P_{cmax} = suurin sallittu kollektorin tehohäviö

Transistorin ominaiskäyrät

Laboratoriotyössä käytetään kuvan 2 mukaista kytkentää määrittäessä yhteisemitterikytkennän lähdön ominaiskäyrästä. Työssä mitataan ominaiskäyrät $I_c = f(U_{ce}, I_b)$, kun $I_b = 20, 40, 60, 80, 100 \mu A$ ja U_{ce} vaihtelee välillä 0 ... 10 V

Taulukossa 3 on mittauksissa saadut arvot kollektorivirroille ja kollektori-emitteri jännitteille eri kantavirran arvoilla.

Kaaviossa 1 on mittauksen perusteella esitetty transistorin lähdön ominaiskäyrästä

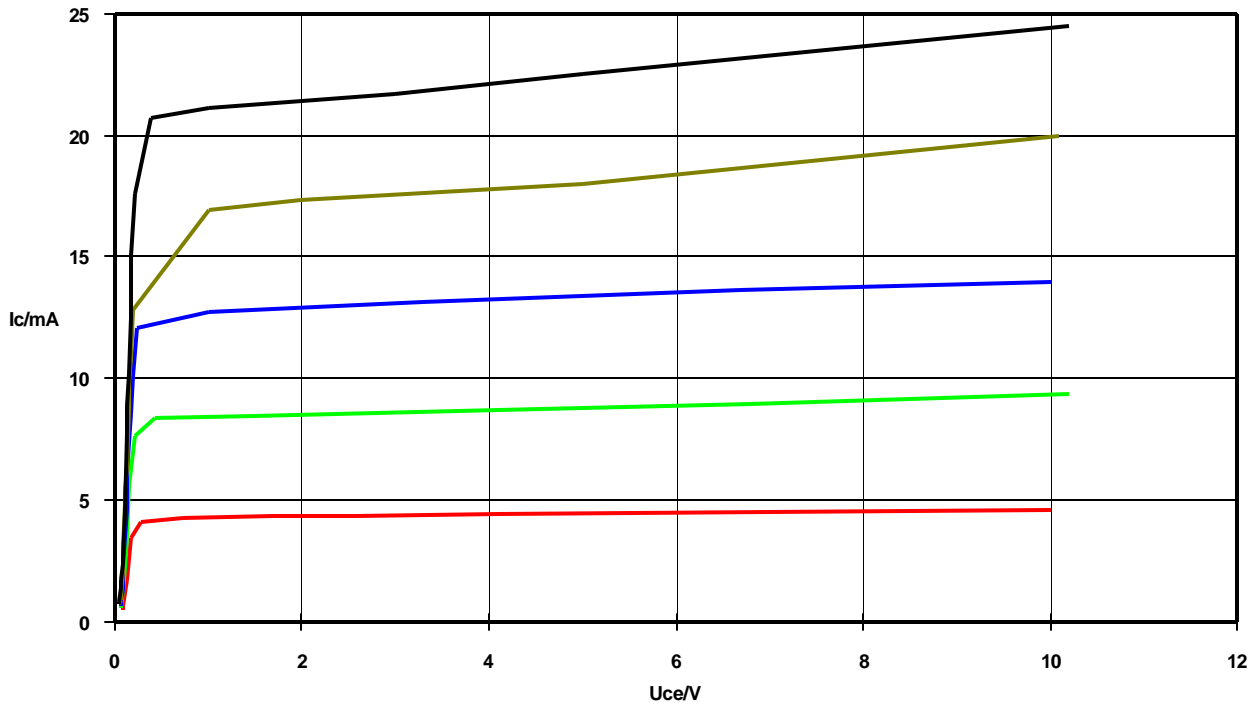


Kuva 2

Taulukko 3

I _b / mA									
20		40		60		80		100	
U _{ce} / V	I _c / mA	U _{ce} / V	I _c / mA	U _{ce} / V	I _c / mA	U _{ce} / V	I _c / mA	U _{ce} / V	I _c / mA
0,086	0,48	0,071	0,58	0,062	0,65	0,056	0,7	0,051	0,75
0,094	0,62	0,074	0,65	0,066	0,74	0,061	0,86	0,054	0,85
0,131	0,68	0,095	1,34	0,070	0,86	0,067	1,04	0,067	1,39
0,187	3,42	0,112	2,17	0,082	1,32	0,085	2,04	0,074	1,73
0,290	4,1	0,134	3,54	0,098	2,34	0,1	3,01	0,082	2,34
0,73	4,27	0,164	5,54	0,128	4,58	0,115	4,84	0,086	2,59
0,17	4,33	0,22	7,61	0,132	5,03	0,12	5,39	0,107	4,52
2,60	4,36	0,43	8,36	0,144	6,12	0,13	6,35	0,130	7,74
4,11	4,42	1,5	8,49	0,17	8,53	0,15	8,8	0,139	8,88
7,00	4,51	4,1	8,74	0,19	10,1	0,16	9,83	0,15	10,2
10,0	4,61	6,8	8,98	0,25	12,1	0,17	10,8	0,17	12,5
		10,2	9,33	1,0	12,7	0,19	12,8	0,186	15,0
				3,3	13,1	1,0	16,9	0,210	17,6
				6,7	13,6	2,0	17,3	0,4	20,7
				10,0	14,0	5,0	18,0	1,0	21,1
						10,1	20,0	3,0	21,7
								5,0	22,5
								10,2	24,5

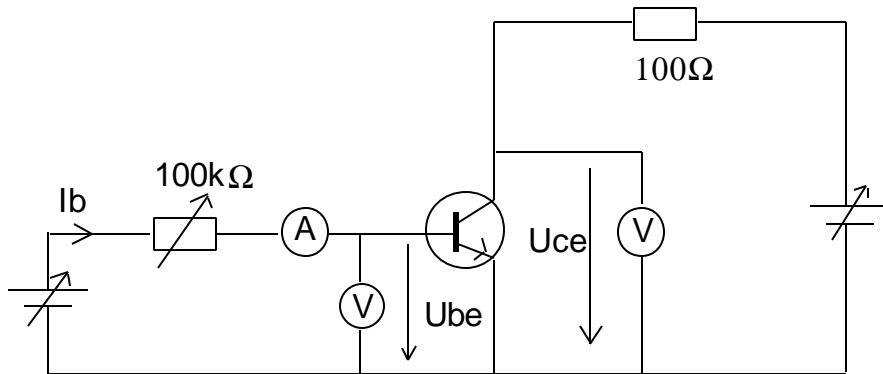
Yhteisemitterikytkennän lähdön ominaiskäyrästä



Kaavio1

Transistorin tulo ominaiskäyrästä yhteisemitterikytkennässä määritellään kuvan 3 mukaisella kytkennä. Ominaiskäyrä mitataan $U_{be} = f(I_b)$ kun $I_b = 0 \dots 100 \mu\text{A}$ ja $U_{ce} = 0 \text{ V}$ ja 10 V

Mittaustulokset taulukossa 4 ja ominaiskäyrästä kaaviossa 2

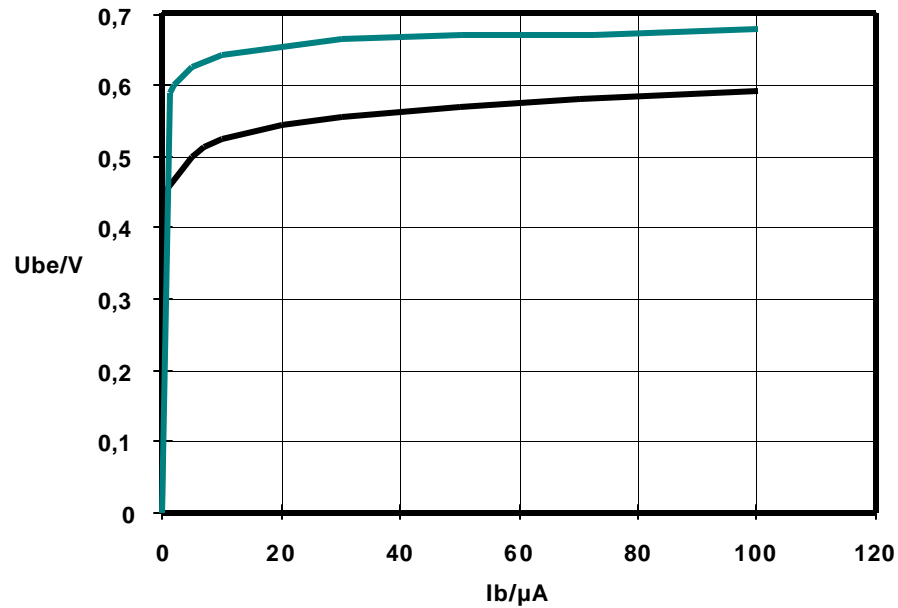


Kuva 3

Taulukko 4

U_{ce} / V			
0		10	
$I_b / \mu\text{A}$	U_{be} / V	$I_b / \mu\text{A}$	U_{be} / V
0	0	0	0
0,1	0,45	1,1	0,59
5,0	0,5	2,0	0,6
7,0	0,513	5,0	0,626
10,0	0,524	10,1	0,643
20,1	0,545	30,2	0,665
30,1	0,556	50,3	0,67
50,1	0,57	72,5	0,67
70,3	0,58	100,1	0,68
100,1	0,591		

Yhteisemitterikytkennän tulon ominaiskäyrästä



Kaavio2

Lämpötilan vaikutus transistorin toimintaan

Laboratoriotyössä ei tehty koetta, jossa mitattaisiin transistorin parametrien arvojen muuttumista jos lämpötila muuttuu. Kuitenkin voidaan pitää jonkinlaisena nyrkkisääntönä, että transistorin arvot muuttuvat seuraavanlaisesti lämpötilan kasvaessa.

U_{be} pienenee noin $2.2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$

β_f kasvaa jopa $1\% / ^\circ\text{C}$

I_{cb0} kasvaa noin $7\% / ^\circ\text{C}$

kytkentää Laboratoriotyössä mitattiin U_{be} -jännite, kun $I_b = 40 \mu A$ ja $U_{ce} = 5 \text{ V}$ kuvan 3 käyttäen.

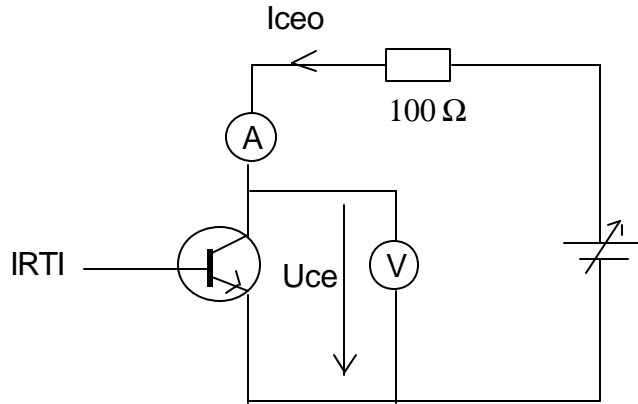
U_{be} -jännitteen arvoksi saatiin 0.662 V

U_{be} :n arvo Mittaushetkellä lämpötila oli n. 20°C , jos lämpötilaa olisi nostettu 50°C :een, niin olisi kyseisessä lämpötilassa ollut noin

$$0.662 \text{ V} - 0.0022 \text{ V} (50 - 20) = 0.596 \text{ V}$$

Transistorin estovirta

Transistorin estovirta I_{ce0} mitattiin kuvan 4 kytkennällä, jossa mitataan kollektorilta emitterille menevä estovirta, kun kanta on irti ($I_b = 0$).



Kuva 4

Mittauksessa arvolla $U_{ce} = 10V$ estovirraksi saatiin $I_{ce0} = 0.9\mu A$

h-parametrien määrittäminen transistorille

Transistoriasteen analysointi on h-parametreilla varsin systemaattinen menetelmä. h-parametrit korvaavat kuitenkin vain pelkän transistorin, joten kytkennän muut komponentit on otettava kuitenkin erikseen huomioon. h-parametrit voidaan määrittää graafisesti transistorin ominaiskäyrien perusteella. Käytännön elektroniikkasuunnittelussa tämä menetelmä ei ole kovin käyttökelpoinen, mutta parametrien ja ominaiskäyrien ymmärtämisen kannalta menetelmä on varsin havainnollinen.

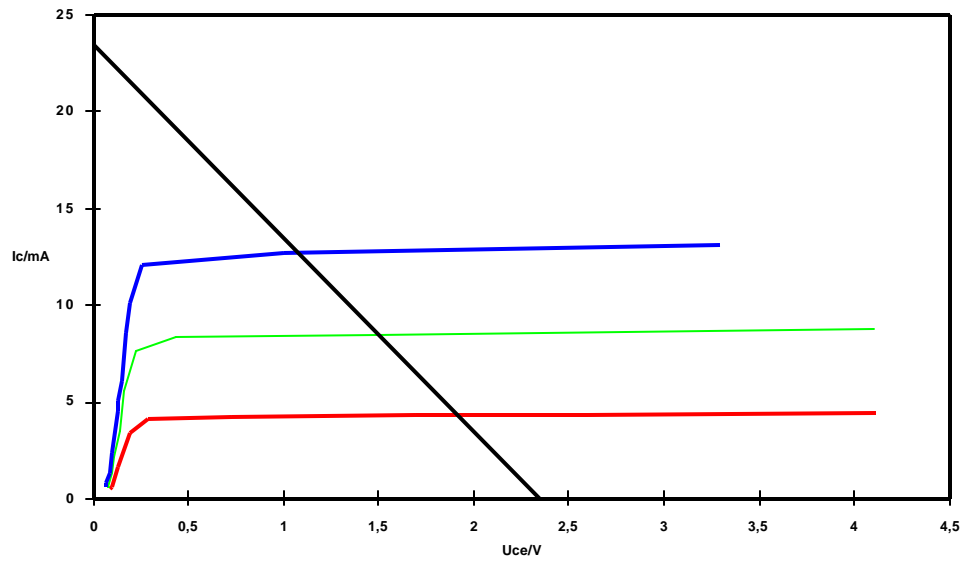
Transistoreiden h-parametri voidaan määrittellä kulmakertoimina, joiden arvo määritetään toimintapisteessä.

Kaaviossa 3 on esitetty osa lähdön ominaiskäyrästä. Kuormituspuoran määrittämiseksi U_{ce} :n arvoksi on määrätty 1.5V. U_{cc} on laskettu kaavalla

$$U_{cc} = U_{ce} + I_c \times R_c \quad (\text{huom. tässä tapauksessa } R_c = R)$$
$$= 1.5V + 8.49mA \times 100\Omega$$
$$= 2.35 V$$

Vastaavasti $U_{cc} / R_c = 235mA$

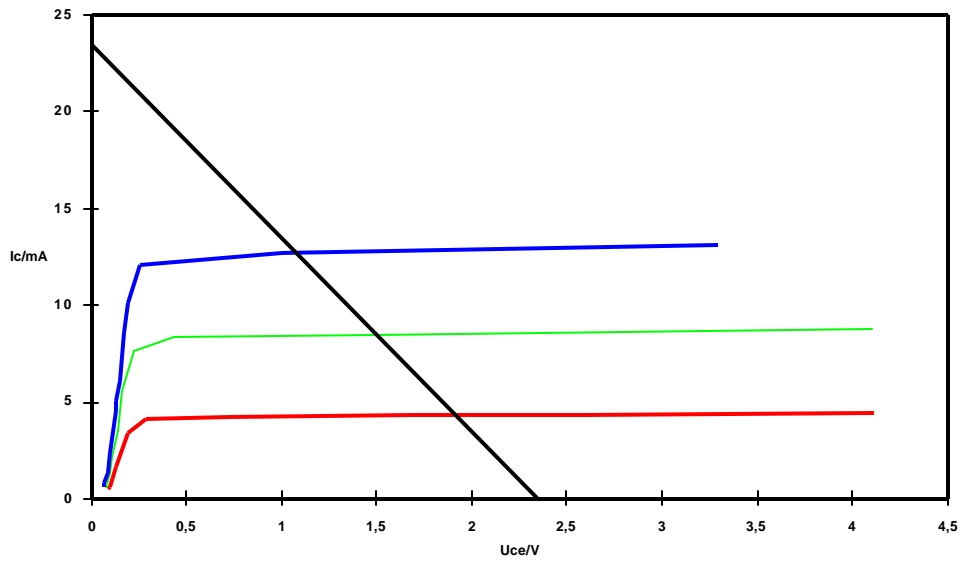
Arvot on saatu mittauksen 2 kohdasta $I_b = 40\mu A$ (Taulukko 3)



Kaavio 3

Kuvaajasta voidaan näin määrittää:

$$\begin{aligned} |h_{fe}| &= \Delta I_c / \Delta I_b, \text{ kun } U_{ce} = \text{vakio} \\ &= 8\text{mA} / 40\mu\text{A}, \text{ kun } U_{ce} = 1.5\text{V} \\ &= 200 \end{aligned}$$



Kaavio 4

Kaaviossa 4 on esitetty graafisesti h_{oe} :n määrittäminen

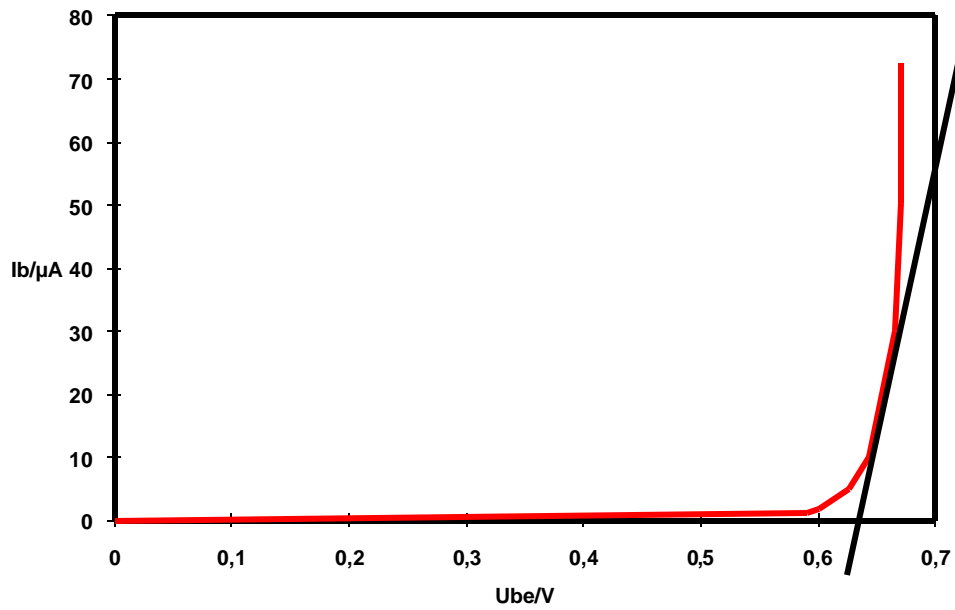
$$|h_{oe}| = \Delta I_c / \Delta U_{ce}, \text{ kun } I_b = \text{vakio}$$

$$= 400\mu\text{A} / 1.7\text{V}, \text{ kun } I_b = 40\mu\text{A}$$

$$= 235\mu\text{A} / \text{V}$$

Parametrien h_{ie} ja h_{re} määrittämistä varten tulon ominaiskäyrästä on merkittävä toimintapiste. h_{ie} :n määrittämistä varten toimintapisteeseen piirretään tangentti käyrälle $U_{ce} = 10\text{V}$. Tangenttia apuna käyttäen luetaan kuvasta pientä U_{be} :n muutosta vastaava I_b :n muutos.

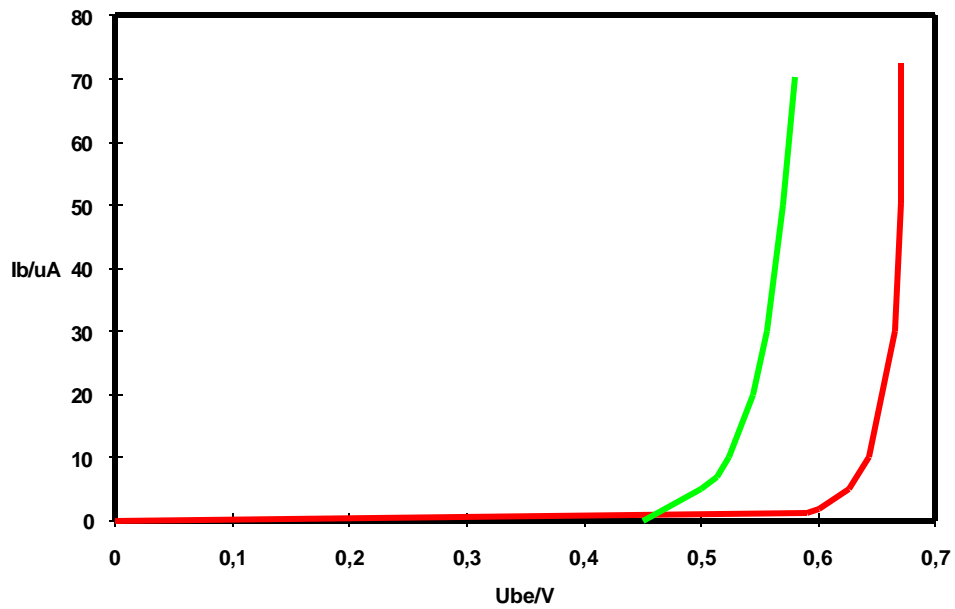
Kaaviossa 5 on esitetty h_{ie} :n graafinen määrittäminen



Kaaviosta 5 voidaan näin määrittellä:

$$\begin{aligned} |h_{ie}| &= \Delta U_{be} / \Delta I_b, \text{ kun } U_{ce} = \text{vakio} \\ &= 0.04\text{V} / 30\mu\text{A}, \text{ kun } U_{ce} = 10\text{V} \\ &= 1.333 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Samoin h_{re} määritellään kaavion 6 mukaan seuraavasti:



Kaavio 6

$$\begin{aligned} |h_{re}| &= \Delta U_{be} / \Delta U_{ce}, \text{ kun } I_b = \text{vakio} \\ &= 0.11\text{V} / 10\text{V}, \text{ kun } I_b = 30\mu\text{A} \\ &= 0.011 \end{aligned}$$

Transistorin h-parametrejä määritellessä täytyy muistaa että arvot riippuvat mm. käytetystä kytkennästä sekä monista muista tekijöistä kuten toimintapiste, lämpötila ja taajuus.

Lähteet: Analogiaelektroniiikan perusteet
Ahola Raimo
Heusala Hannu
Myllylä Risto
Hantro Products Oy

LIITTEET Mittauspöytäkirja 3 kpl